

Modellering dijkring 48 met D-HYDRO



Modellering dijkkring 48 met D-HYDRO

Auteur(s)

Geert Prinsen

Rinske Hutten

Govert Verhoeven

Modellering dijkkring 48 met D-HYDRO

Opdrachtgever	Waterschap Rijn en IJssel
Contactpersoon	Naam
Referenties	Karin de Bruyn, Kymo Slager, i.s.m. Rene Piek, Durk Riedstra, Robert Slomp: Leidraad voor het maken van overstromingssimulaties, Deltares rapport 11200537-002, februari 2018. D-FLOW FM User Manual, Deltares, oktober 2019
Trefwoorden	D-HYDRO, overstromingssimulaties, dijkkring 48, model, leidraad overstroming, dijkdoorbraak

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	18-02-2020
Projectnummer	11203514-002
Document ID	11203514-002-ZWS-0002
Pagina's	149
Status	definitief

Auteur(s)

	Geert Prinsen	
	Rinske Hutten	
	Govert Verhoeven	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Geert Prinsen 	Anke Becker 	Gerard Blom 	
	Rinske Hutten			
	Govert Verhoeven			

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de opzet van een D-HYDRO model voor dijkkring 48 en de uitgevoerde berekeningen van het model voor een (beperkt) aantal dijkdoorbraakscenario's. Het model zal door Waterschap Rijn en IJssel gebruikt worden voor te simuleren dijkdoorbraakscenario's voor de landelijke database van overstromingssimulaties (LDO). Het rapport beschrijft de gemaakte keuzes en de ervaringen die zijn opgedaan bij de modelbouw. In die zin is het rapport een naslagwerk en een voorbeeld voor de bouw van D-HYDRO modellen voor andere dijkringen binnen het waterschap. Tevens is in het project aandacht besteed aan visualisatie van D-HYDRO modelresultaten en de eisen voor een gebruikersschil voor derden. Dit wordt ook in dit rapport beschreven.

Inhoud

1	Inleiding	8
1.1	Aanleiding en context van de opdracht	8
1.2	Doel van het rapport	8
1.3	Leeswijzer	9
2	Beschrijving van het projectgebied – dijkkring 48	10
2.1	Beschrijving gebied	10
2.2	Beschrijving gebruikte data	13
3	Opzet van de modelschematisatie	15
3.1	Uitgangspunten	15
3.2	Hoogtemodel	18
3.2.1	Algemeen	18
3.2.2	Bodemhoogtes meren en plassen	20
3.2.3	Tunnels en onderdoorgangen	22
3.3	Verhoogde lijnobstakels	23
3.4	Initiële waterstanden in meren en plassen	25
3.5	Landgebruik/ruwheidslaag	26
3.6	Waterlopen	28
3.6.1	Data	29
3.6.2	Afweging waterlopen in 1D of 2D met testmodel Oude IJssel	30
3.6.2.1	1D test model Oude IJssel	30
3.6.2.2	2D test model van Oude IJssel	31
3.6.2.3	Afweging modelleren waterlopen in 1D of 2D	31
3.6.3	1D waterlopen binnendijks	32
3.6.4	1D Rijntakken	33
3.6.5	Koppelen van de 1D modellen	37
3.6.6	Conversie naar D-HYDRO D-FLOW 1D	39
3.6.7	Validatie van 1D modellen	40
3.7	2D rekengrid	41
3.8	Bres	43
3.9	Modelbouw	45
3.9.1	Inleiding	45
3.9.2	1D	46
3.9.2.1	Randvoorwaarden en laterale debieten	47
3.9.2.2	Kunstwerken en uitlaten	48
3.9.3	2D	49
3.9.4	Overige model parameters	52
3.10	Beleidsmodel en calamiteitenmodel	53
4	Berekeningen	54
4.1	Modeluitvoer	54
4.2	Resultaten van 2D testberekeningen voor Bislich en Spijksedijk	55
4.2.1	Bislich	55
4.2.2	Spijksedijk	62
4.3	Definitie van de berekeningen en gevoeligheidsanalyses met het beleidsmodel	64
4.4	Resultaten van de zes scenario-berekeningen met het beleidsmodel	66

4.4.1	Som 1: Dijkdoorbraak Herwen	66
4.4.2	Som 2: Dijkdoorbraak Loo	71
4.4.3	Som 3: Dijkdoorbraak Loo: gevoeligheid zand/kleidijk bresgroei	77
4.4.4	Som 4: Dijkdoorbraak Loo: gevoeligheid diepte bres	82
4.4.5	Som 5: Dijkdoorbraak Loo: gevoeligheid winter-zomer ruwheidslaag	87
4.4.6	Som 6: $Q=18000 \text{ m}^3/\text{s}$ piekafvoer, alleen overloop (geen dijkdoorbraak)	92
4.4.7	Vergelijking van resultaten	95
4.5	Calamiteitenmodel	98
4.6	Mogelijkheden om maatregelen door te rekenen	99
4.7	Koppeling met andere dijkkringen	103
4.8	Koppeling met schade-slachtoffermodule	103
5	Visualisatie	108
5.1	Inleiding	108
5.2	Crayfish plug-in tool in QGIS	108
5.3	DFX visualisatie	109
5.4	Overig	112
5.5	VR visualisatie	113
6	Gebruikersschil	114
6.1	Inleiding	114
6.2	Aanscherping eisen	114
7	Oplevering	120
7.1	D-HYDRO software en modelschematisaties	120
7.2	Visualisatietools	120
8	Conclusies en aanbevelingen	121
9	Referenties	123
A	Bewerkingstappen modelopzet	125
B	Memo Baseline	131
B.1	Inleiding	131
B.2	Hoogtegegevens	131
B.3	Ruwheid	134
B.4	Oppervlaktewater	135
B.5	Hoogtelijnen	137
B.6	Baseline - Conclusies en aanbevelingen	138
B.7	Aanbevelingen en conclusies	139
C	Memo D-Flow FM uitvoer	140
C.1	Inleiding	140
C.2	Modeluitvoer overstromingssimulatie	140
D	Koppelings- en conversietabellen ruwheidslaag	143
E	Kenmerken visualisatietools	146
E.1	Inleiding	146
F	Stroomschema bij calamiteit	148

Management samenvatting

Het waterschap Rijn en IJssel heeft besloten voor overstromingsberekeningen gebruik te maken van de D-HYDRO software ontwikkeld door Deltares. In dit pilot project is voor dijkkring 48 een modelschematisatie in D-HYDRO opgezet door Deltares in nauwe samenwerking met het waterschap. Het rapport beschrijft de gemaakte keuzes bij het opzetten van de uiteindelijke 1D2D schematisatie, waarin waterlopen als 1D element en het overstroombaar gebied van dijkkring 48 in 2D is opgenomen. Naast een beschrijving van het model bevat het rapport ook een gedetailleerd stappenplan voor de opzet van het model, dat gebruikt kan worden als kookboek/handleiding voor het opzetten van schematisaties voor andere dijkring in het beheersgebied van WRIJ.

Het uiteindelijke 1D2D model bestaat uit een 1D2D model voor de dijkkring (waarin de belangrijkste watergangen binnen de dijkkring in 1D zijn gemodelleerd) en een 1D model voor de Nederlandse Rijntakken. Een 2D D-HYDRO model van de Rijn is niet beschikbaar. Een 1D riviermodel van de Rijn in Duitsland is er wel, maar door institutionele aspecten nog niet beschikbaar. WRIJ zal in overleg met Duitse autoriteiten (NRW) en Rijkswaterstaat WVL gaan om dit wel beschikbaar te krijgen.

Het model van dijkkring 48 is al in een vroeg stadium van het project getest voor 2D simulaties van dijkdoorbraken bij Bislich en Spijk. Het uiteindelijke 1D2D model is getest voor een zestal scenario's voor dijkdoorbraken bij Herwen en Loo. Doordat in de berekeningen meer details zijn meegenomen dan in oude berekeningen met SOBEK2 of DELFT-FLS (uitlaten, secundaire dijken, kerende wegen, tunnels en onderdoorgangen, fijnere resolutie), wijken de resultaten af van oude berekeningen. Zo blijkt bij nieuwe berekeningen dat de uiteindelijke bresbreedte bij dijkdoorbraken veelal kleiner is dan veronderstelde bresbreedte bij oude berekeningen. De gevoeligheid van het model voor o.a. de bresgroeiparameters verdient nader onderzoek. Het globale beeld uit de berekeningen tot nu toe is wel herkenbaar voor het waterschap.

Het model kan door het waterschap worden gebruikt voor nieuwe overstromingssimulaties voor dijkkring 48. Hiermee wordt inzicht opgebouwd in het systeemgedrag bij verschillende dijkdoorbraken, verschillende waarden van modelparameters en verschillende afvoergolven. De simulaties geven ook input om de Landelijke Database Overstromingssimulaties (LDO) te actualiseren. Resultaten uit berekeningen kunnen gebruikt worden voor schade- en slachtofferberekeningen met de D-FIAT schade- en slachtoffermodule (SSM).

In het project is uitgebreid aandacht besteed aan de visualisatie van modelresultaten. De hiervoor nu beschikbare tools zoals QGIS en DFX worden in het rapport beschreven. Dit dient tevens als input voor de visualisatie pilot die in het kader van het TKI-project "Hydrologie in D-HYDRO" door Hydrologic zal worden uitgevoerd. In dat TKI-project werkt Deltares samen met 5 waterschappen en 3 ingenieursbureaus aan de verdere ontwikkeling van de D-HYDRO software, en wordt deze getest en toegepast in een aantal pilots.

De D-HYDRO software, inclusief de DFX visualisatietool, en het model van dijkkring 48 inclusief de gemaakte sommen worden overgedragen aan het waterschap. Hiermee kan het waterschap verder ervaring opdoen met de software en de toepassing.

Een leerpunt uit het hele project is dat het belangrijk is om ervaring met het model op te doen en veel verschillende scenariosommen te maken, zodat het waterschap gevoel krijgt voor het systeemgedrag bij dijkdoorbraken op verschillende locaties en met verschillende parameters. De met het model opgedane kennis is van grote waarde voor het waterschap bij een eventuele calamiteit.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en context van de opdracht

Waterschap Rijn en IJssel is sinds 2018 verantwoordelijk voor het actualiseren van overstromingsmodellen en scenario's voor haar beheersgebied. De huidige modellen en scenario's zijn jaren geleden gemaakt onder verantwoordelijkheid van de provincie Gelderland. Het waterschap wil daarom nieuwe modellen en nieuwe scenario's opstellen. Naast de toepassing voor de landelijke database van overstromingskaarten wil het waterschap ook modellen die bruikbaar zijn voor operationele toepassing tijdens calamiteiten. Voor de toekomst wordt naast deze toepassing ook gedacht aan inzet van de modellen (of daaruit af te leiden deelmodellen) bij regionale wateroverlast door overvloedige lokale neerslag.

Het Waterschap Rijn en IJssel (WRIJ) heeft na een uitgebreide inventarisatie besloten om voor nieuwe modelschematisaties gebruik te gaan maken van het door Deltares ontwikkelde pakket D-HYDRO, met als rekenkern D-Flow FM (Flexible Mesh). Dit pakket wordt Deltares continu verder ontwikkeld met eigen onderzoeksgeld en in projecten. In 2018 is in een TKI project samen met een aantal waterschappen door Deltares de functionaliteit voor 2D dijkdoorbraken in D-HYDRO ontwikkeld en beschikbaar gesteld. In 2019 is in het TKI project 'Hydrologie in D-HYDRO' ook gewerkt aan de implementatie van 1D functionaliteit in D-Flow FM.

Door Deltares en WRIJ is een raamovereenkomst gesloten voor samenwerking bij onderzoek en ontwikkeling (wetenschap en hoogwaardige technologie). In het kader van die raamovereenkomst is het pilotproject modellering dijkkring 48 met D-HYDRO gedefinieerd en heeft het waterschap hiervoor opdracht gegeven in februari 2019.

Doel van het project is om in samenwerking met het waterschap een D-HYDRO schematisatie voor dijkkring 48 op te zetten, en hiermee vervolgens ervaring op te doen door gevoeligheidsanalyses en enkele dijkdoorbraakberekeningen. De opgezette modelschematisatie is een combinatie van 2D overstromingsmodellering (dijkkring 48) en 1D elementen (belangrijke watergangen binnen dijkkring 48, de Rijntakken). Het project resulteert in aanbevelingen hoe zo'n model voor een hele dijkkring kan worden opgezet, zodat in het vervolg ook derden (andere bureaus) voor het waterschap D-HYDRO modellen kunnen opzetten en toepassen. Met het D-HYDRO model van dijkkring 48 en de in de toekomst te ontwikkelen modellen voor andere dijkkringen kan het waterschap de overstromingsscenario's voor haar beheersgebied en voor de landelijke database van overstromingssimulaties (LDO) up-to-date brengen.

Een ander belangrijk aspect van het pilot project is toepassing van door Deltares ontwikkelde visualisatietechnieken. Dit geeft input voor de definitie van een gebruikersschil om D-HYDRO resultaten voor derden binnen het waterschap te ontsluiten. Tevens geeft dit input voor het TKI project "Hydrologie in D-HYDRO" waarin één van de pilots specifiek over visualisatie gaat.

Kennisoverdracht is onderdeel van het project. Daarom is de schematisatie in nauwe samenwerking met het waterschap opgezet. Een training in het gebruik van de D-HYDRO software maakt eveneens deel uit van het project.

1.2 Doel van het rapport

Dit rapport beschrijft de uitgevoerde werkzaamheden, de verschillende stappen bij de modelbouw, controles van het model en de uitgevoerde scenarioberekeningen. Verder wordt ingegaan op visualisatiemogelijkheden en gebruikaspecten.

1.3 Leeswijzer

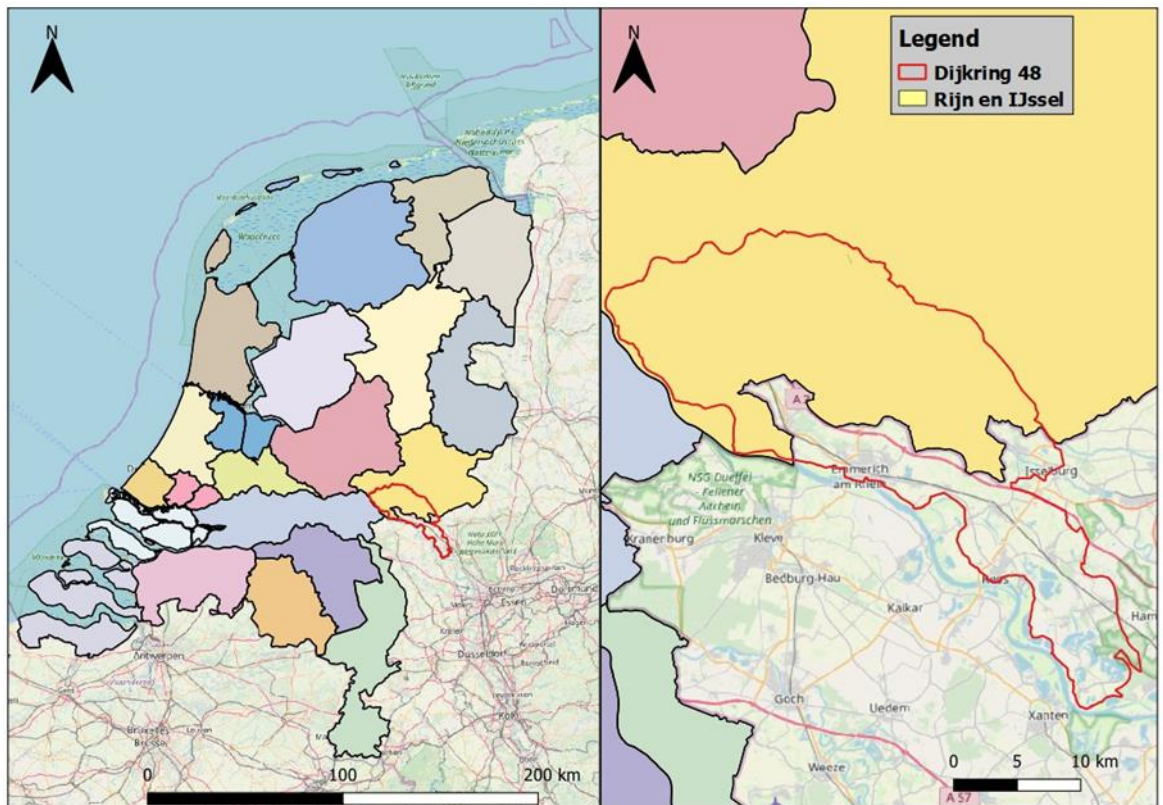
Hoofdstuk 2 bevat een beschrijving van het projectgebied en de gebruikte databronnen. In hoofdstuk 3 wordt uitgebreid ingegaan op de opzet van het model en de daarin doorgelopen stappen en gemaakte keuzes in overleg met het waterschap. In hoofdstuk 4 wordt de modeluitvoer toegelicht en worden de testsommen en scenariosommen beschreven waarmee de correcte werking van het model is geverifieerd. Hoofdstuk 5 en 6 gaan in op visualisatie aspecten en gebruik bij een calamiteit. In hoofdstuk 7 worden de opgeleverde producten beschreven. Tenslotte bevat hoofdstuk 8 een aantal conclusies en aanbevelingen.

Appendix A beschrijft in meer detail dan hoofdstuk 3 de aanbevolen stappen voor de modelbouw, en is bedoeld als een leidraad bij de bouw van D-HYDRO modellen voor andere dijkringen. In de andere appendices worden enkele specifieke aspecten van invoer en uitvoer beschreven.

2 Beschrijving van het projectgebied – dijkkring 48

2.1 Beschrijving gebied

Door het waterschap is dijkkring 48 geselecteerd als pilot gebied. Dijkkring 48 bevat ook een deel van Duitsland. Het totale gebied is ongeveer 560 km², zie Figuur 2.1.



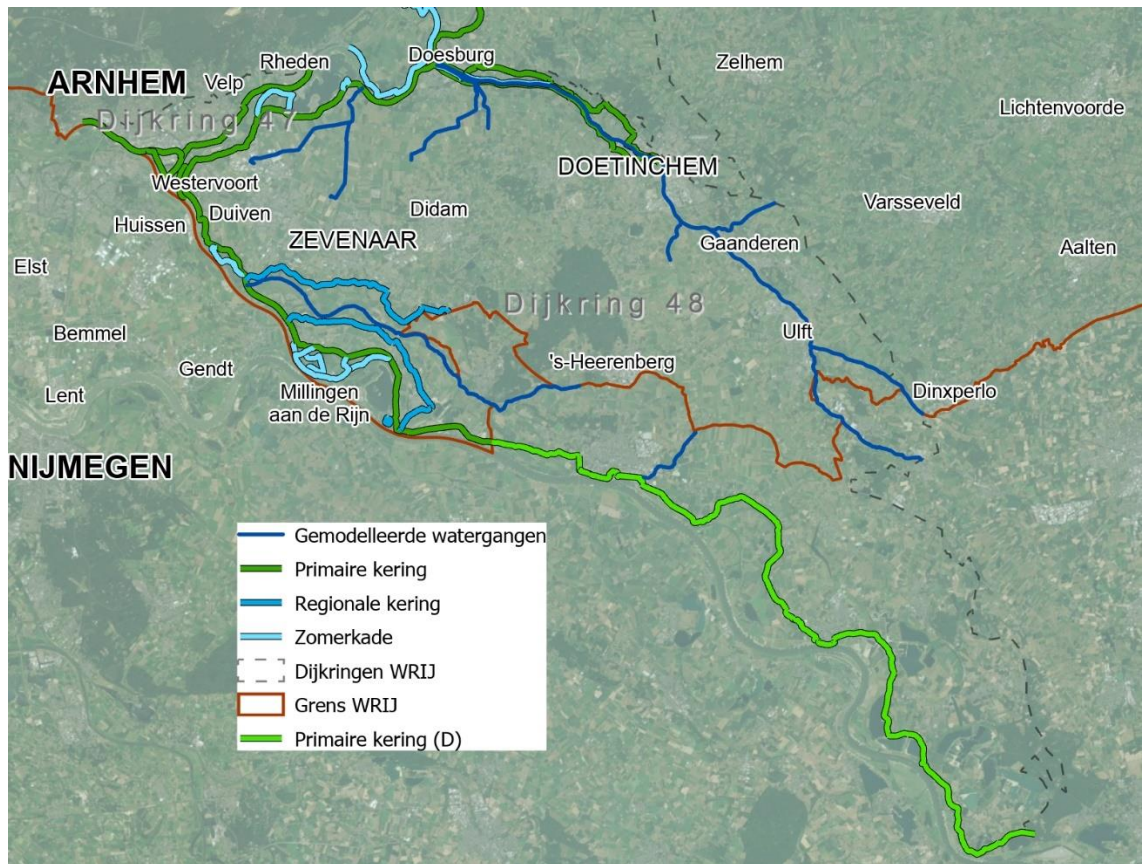
Figuur 2.1 Links de waterschapskaart Nederland met dijkkring 48 aangegeven, rechts ingezoomd op Rijn en IJssel.

Dijkkring 48 is één van de dijkringen in het gebied van Waterschap Rijn en IJssel. Andere dijkringen die deels in het gebied van WRIJ liggen zijn dijkkring 47 (Arnhemse en Velpsebroek), dijkkring 49 (IJsselland), 50 (Zutphen), en 51 (Gorssel). Het gebied van dijkkring 48 wordt begrensd door de dijken langs de Duitse Rhein vanaf Bislich (bij Wesel), het Pannerdens kanaal en de IJssel. Aan de noordoostkant van het gebied liggen dijken langs de Oude IJssel tussen Doesburg en Doetinchem. Nabij Doetinchem stopt de bedijking en stijgt de hoogte langzaam in oostelijke en zuidelijke richting.

Van het beheersgebied van Waterschap Rijn en IJssel vallen de stroomgebieden van de Liemers en de Oude IJssel (deels) binnen dijkkring 48. De belangrijkste waterlopen binnen dijkkring 48 in Nederland zijn:

- De Oude IJssel, met zijrivieren Aa-Strang en Waals Water. De Oude IJssel ontspringt in Duitsland en mondt bij de stuw Doesburg uit in de IJssel.
- Didamse Leigraaf, Didamse Wetering, Wehlsebeek en Hoge Leiding, die bij Bevermeer onder vrij verval (Hoge Leiding) of via gemaal Bevermeer lozen via het Broekhuizerwater op de IJssel bij Doesburg.

- Wijde Wetering, Zevenaarse Wetering en Zwalm, die onder vrij verval of via gemaal Liemers bij Giesbeek lozen op de IJssel.
- Het Grenskanaal, Oude Rijn en Rijnstrangen. Er wordt bij gemaal Kandia in Groessen geloosd op het Pannerdens kanaal. Een deel van het Duitse gebied loost bij Emmerich op de Bovenrijn.



Figuur 2.2 Waterlopen in het gebied van dijkring 48 (tussen Bovenrijn, Pannerdens kanaal, IJssel, en Oude IJssel)

Dijkring 48 heeft ongeveer 98 km waterkeringen, waarvan 53 km in Nederland (Arends, 2014) en (WRIJ, 2015). Dit zijn de dijken langs de Duitse Rhein, en in Nederland de primaire kering langs de Bovenrijn, Pannerdens kanaal en IJssel, en de dijken en kades langs de Oude IJssel tussen Doesburg en Doetinchem.

In het Nederlandse deel van dijkring 48 liggen (delen van) de gemeenten Rijnwaarden, Duiven, Westervoort, Zevenaar, Doesburg, Doetinchem, Montferland en Oude IJsselstreek. Het aantal inwoners van deze gemeenten is ruim 175000 inwoners (Arends, 2014), maar een groot deel van de gemeenten Doetinchem en Montferland ligt op hogere gronden en zal niet overstromen. Een groot deel van de grond in het dijkringgebied wordt gebruikt voor landbouw. Het Rijnstrangengebied en het Montferland zijn landschappelijk waardevolle (natuur)gebieden. Het stedelijk gebied is geconcentreerd langs de lijn Arnhem-Zevenaar-Doetinchem.

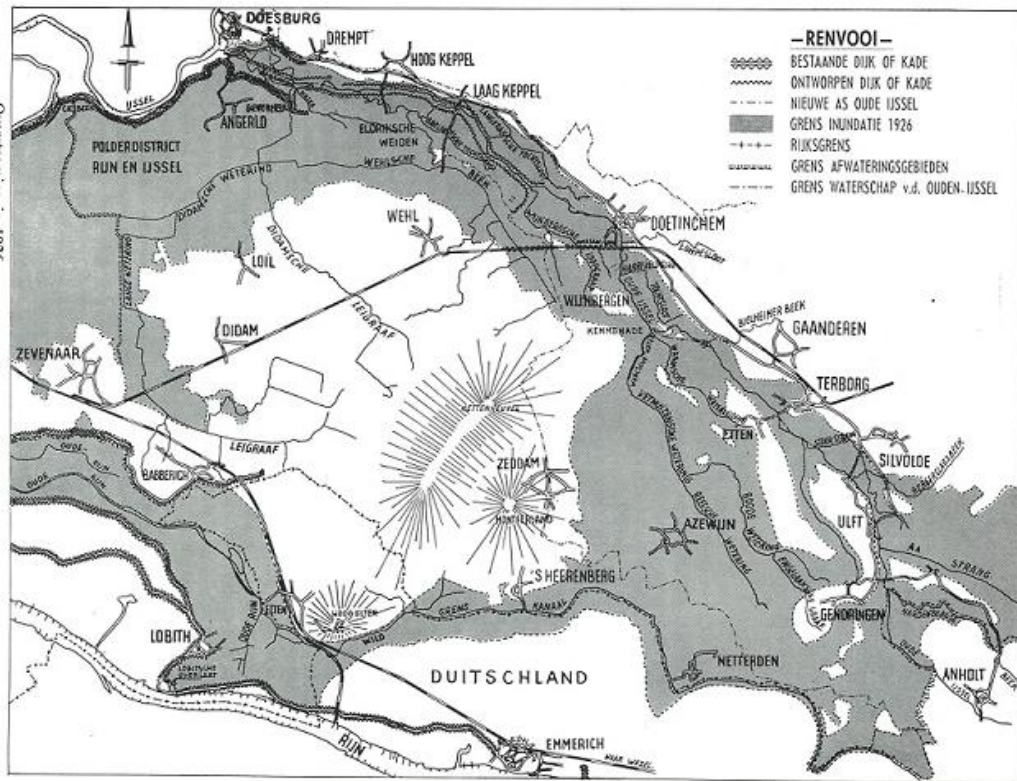
Belangrijke infrastructuur in de dijkring zijn de spoorwegen en snelwegen, zoals:

- de internationale spoorlijn Arnhem – Emmerich;
- de lokale spoorlijn Arnhem-Duiven-Zevenaar-Didam-Wehl-Doetinchem;
- de autosnelweg A12 (A3 in Duitsland) Arnhem-Oberhausen;
- de snelweg A18 (Oud-Dijk – Doetinchem – Varsseveld).

Langs de snelwegen zijn enkele relatief grote bedrijventerreinen. De (snel)wegen en spoorwegen liggen veelal op een verhoogd grondlichaam en kunnen tijdelijk water keren. De laatste overstroming in het gebied van dijkkring 48 was in 1926. In die periode was de Rijnafvoer zeer hoog (afvoerpiek ongeveer 12500 m³/s, dat is iets hoger dan de piekafvoer in 1995). In 1926 was de Spijkse overlaat nog operationeel en brak een regionale kering (Deukerdijk) bij Pannerden langs de Oude Rijn door. Er waren nog niet overal dijken langs de Oude IJssel waardoor laaggelegen delen in Doesburg, Angerlo, Lathum en Westervoort overstroonden. Ook regionale beken in het huidige beheersgebied van Waterschap Rijn en IJssel traden buiten hun oevers. In Figuur 2.3 en Figuur 2.4 uit de literatuur worden voor het rivierengebied en voor het gebied van de Oude IJssel in het bijzonder aangegeven waar in 1926 overstromingen zijn opgetreden. Ook in Duitsland traden overstromingen op, maar deze zijn niet in de figuur opgenomen.



Figuur 2.3 Overstroomd gebied in januari 1926 langs de rivieren in Nederland (Slomp, 2012)



Figur 2.4 Overstroomd gebied in januari 1926 in het gebied van de Oude IJssel (Ver Loren van Themaat, 1966)

2.2 Beschrijving gebruikte data

Omdat dijkkring 48 een grensoverschrijdende dijkkring is, zijn de basisdata niet alleen afkomstig uit Nederlandse databronnen, maar ook uit Duitse databronnen (Nordrhein-Westfalen). De aanlevering van data van het Duitse deel van dijkkring 48 is door het waterschap verzorgd; deze data is afkomstig van <https://www.geoportal.nrw>). Voor het Nederlandse deel is de data deels door het waterschap aangeleverd, en deels uit openbare bronnen verzameld.

De gebruikte basisdata heeft betrekking op:

- Maaiveldhoogtes (hoogtemodel);
- Verhoogde lijnelementen;
- Landgebruik;
- Waterlopen;
- Locaties van wegen, spoorwegen etc.

De gebruikte data en databronnen voor de modelbouw worden nader toegelicht in het volgende hoofdstuk.

Na aanvang van het project bleek dat Deltares voor Rijkswaterstaat in een ander kader bezig is geweest met het maken van een 1D-2D model voor de Rijn en daarnaast gelegen overstroombare gebieden (Becker, 2019). Dit model dekt zowel de Nederlandse Rijntakken als een deel van de Duitse Rijn. Voor dit model is een database met GIS basisdata in Baseline samengesteld (van Doornik en Hoefsloot, 2017). Baseline is een voor RWS ontwikkelde ArcGIS applicatie, waarin basisdata in specifiek voorgeschreven formaten wordt opgeslagen om vervolgens zo veel mogelijk geautomatiseerd 1D en 2D schematisaties voor RWS-beheersgebieden te maken.

De Baseline database was echter op een vrij grove resolutie van 25x25 meter samengesteld, en in het uiteindelijke model is op een grid met resolutie van ongeveer 200x200 meter gerekend.

Dit was om twee redenen:

- omdat het een veel groter gebied betrof; en
- omdat het doel van het uiteindelijke model voor RWS was om te bepalen wat de te verwachten Rijnafoeren bij Lobith zouden zijn, en niet om te bepalen hoe een overstroming zich binnen dijkkring 48 (of andere gemodelleerde gebieden) zou verspreiden.

Echter, in het huidige project gaat het juist om een goede modellering en voorspelling van de gevolgen van een dijkdoorbraak binnen dijkkring 48. Hiervoor is juist een hogere resolutie gewenst. Daarom is uiteindelijk geen gebruik gemaakt van de door RWS in Baseline verzamelde (grover geaggregeerde) data. Voor meer detailinformatie over Baseline wordt verwezen naar Appendix B.

3 Opzet van de modelschematisatie

3.1 Uitgangspunten

Voor de modellering van dijkkring 48 met D-HYDRO is gekozen om een 1D2D model te bouwen. Hierbij is het overstromingsgebied (dijkkring 48) in 2D gemodelleerd. De belangrijkste watergangen binnen dijkkring 48 zijn in overleg met WRIJ als 1D-waterlopen gemodelleerd (zie Figuur 2.2). In de eerste fase van het project zijn de watergangen binnen het beheersgebied van WRIJ ook meegenomen in het 2D model. Bij een dijkdoorbraak in Duitsland is echter een groot debiet via de Oude IJssel te verwachten, dat bij de gewenste 2D resolutie in de Oude IJssel zou leiden tot lange rekentijden en bij grovere resolutie tot minder nauwkeurige resultaten (omdat de watergang dan als een veel te brede 2D cel zou worden meegenomen). Daarom is uiteindelijk gekozen voor een 1D modellering van de belangrijkste watergangen binnen dijkkring 48. Door de combinatie van 1D watergangen met 2D overstromingsgebied kan worden voldaan aan de gewenste nauwkeurigheid en aan de gewenste rekentijden (2 dagen simuleren in 1 uur).

Voor de Rijntakken is gebruik gemaakt van het 1D Rijntakken model van RWS. Er wordt door RWS ook gewerkt aan een 2D D-HYDRO model voor de Rijntakken. Echter, dit 2D model is nog in ontwikkeling, nog niet gekalibreerd en daarom niet tijdig beschikbaar. Daarom is gebruik gemaakt van het 1D Rijntakken model.

Deze inleidende paragraaf geeft een beschrijving van de uitgangspunten en opzet van het model. De verschillende aspecten worden daarna in volgende paragrafen in meer detail toegelicht.

Het uitgangspunt voor het maken van de modelschematisatie en uitvoeren van simulaties is de Leidraad overstromingssimulaties (de Bruijn et. al, 2018, <https://www.helpdeskwater.nl>). Indien er - in overleg met WRIJ - is afgeweken van deze leidraad wordt dat in de volgende paragrafen of in appendix A bij de stappen voor modelbouw expliciet vermeld.

Voor het simuleren van dijkdoorbraken en bresgroei is gebruik gemaakt van de formulering van Verheij - van der Knaap (zie de Leidraad overstromingssimulaties). Deze formulering is in D-HYDRO geïmplementeerd als 2D functionaliteit waarbij de doorbraak langs een opgegeven lijnelement vanuit het midden kan groeien volgens de bresgroei-formulering. Met de dijkdoorbraak en bresgroei-formulering wordt de stroming vanuit het buitenwater (Rijntakken) naar de dijkkring beschreven. Hiervoor is ook één rij 2D cellen aan de rivierkant van de dijken langs de Bovenrijn, Pannerdens Kanaal en IJssel meegenomen om de dijkdoorbraaklocatie inderdaad tussen 2D cellen te kunnen leggen. In de nabije toekomst zal deze bresgroei-formulering ook via een zogenaamde 1D2D Levee-breach in D-HYDRO geïmplementeerd worden zodat 1D riviermodellen makkelijker aan de 2D dijkkringmodellen gekoppeld kunnen worden.

Om de verspreiding van het water over het gebied te berekenen is een ongestructureerd rekenrooster gebouwd. Dit ongestructureerde rekenrooster bestaat uit een cartesisch (rechthoekig) rekenrooster (40x40 meter) met verfijningen bij kerende wegen (20x20 meter) en spoorwegen (10x10 meter). Verder is er een curvilineair rooster gelegd rondom de hele lengte van de primaire dijk, die dijkkring 48 van de Rijntakken scheidt (ook langs de dijk in Duitsland). Bij de overgangen tussen de verschillende resoluties van het rechthoekig rooster (40x40, 20x20, 10x10 meter) en als overgang tussen het curvilineaire en cartesische rooster zijn driehoekige cellen toegepast. Het 2D rekengrid wordt verder toegelicht in paragraaf 3.7.

Lijn-elementen met bepaalde hoogte zijn als zogenaamde 'fixed weirs' in het 2D model opgenomen. Dit betreft keringen, kadevlakken, (spoor)wegen, het geluidsscherm langs de Betuweroute en de primaire dijk, die de Rijn van dijkkring 48 scheidt. Voor het geluidsscherm langs de Betuweroute (dat tot circa 4.5 meter boven maaiveld ligt) is aangenomen dat het keert tot een hoogte van 1.5 meter en dat water er daarna overheen stroomt.

Naast het 2D-rekenrooster en de hoogte van obstakels is een hoogtemodel essentieel voor het overstromingsverloop. Het hoogtemodel (DEM) beschrijft de hoogte van het maaiveld, waarbij vegetatie en gebouwen eruit zijn gefilterd. In het hoogtemodel zijn de bodemhoogtes bij grote plassen en meren verlaagd, en de hoogtes bij onderdoorgangen en tunnels ingebrand. Voor de plassen en meren is tevens een initiële waterstand of diepte voor het 2D-model toegepast. Tenslotte zijn verschillende landgebruiksklassen toegepast voor het maken van twee ruwheidslagen (zomer en winter) voor het 2D gedeelte van de modelschematisatie.

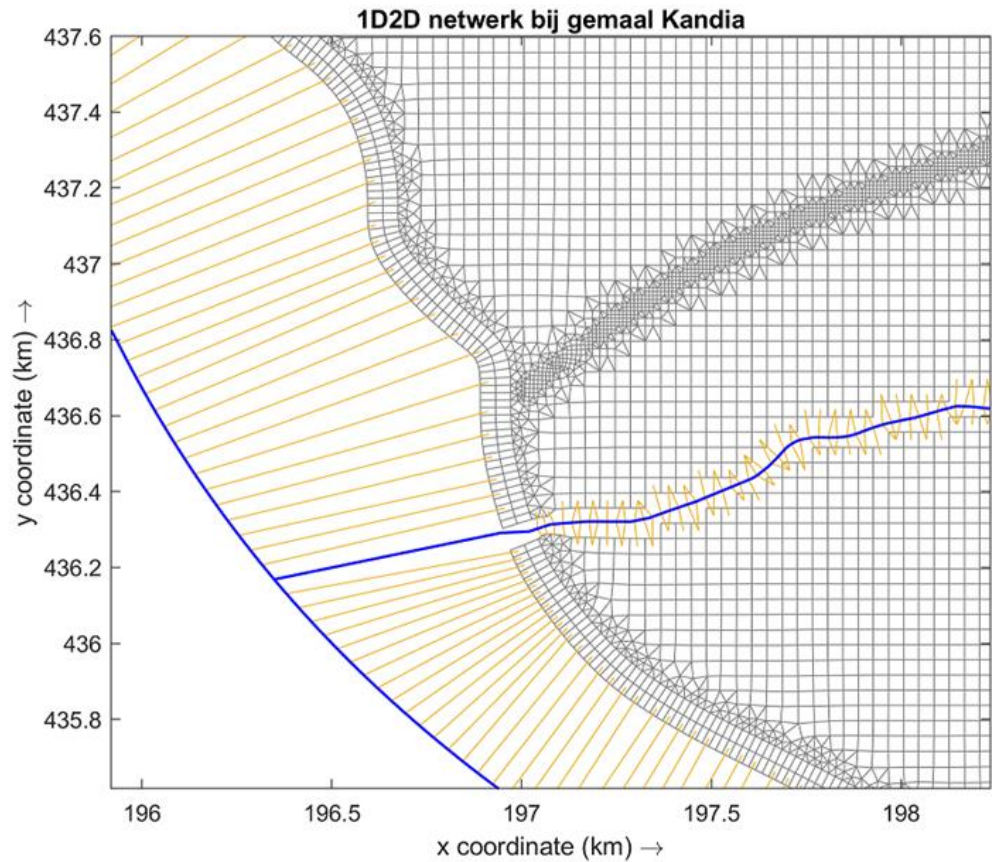
Het 1D gedeelte van de modelschematisatie bestaat uit het Rijntakken model (buitenwater) en de geselecteerde watergangen binnen dijkkring 48. De modelschematisatie 'SOBEK-Rijn-J17_5-v3 van de Rijntakken', beheerd door RWS, is geconverteerd naar het formaat bruikbaar voor de D-Flow FM rekenkern in D-HYDRO. WRIJ heeft watergangen binnen dijkkring 48 geselecteerd met een breedte van minstens 10 meter op maaiveldniveau. De aangeleverde modellen van de watergangen zijn daarna van SOBEK-2 via SOBEK-3 naar D-HYDRO formaat geconverteerd. Het converteren van de 1D modellen van SOBEK-3 naar het bruikbare formaat van D-HYDRO is uitgevoerd volgens de laatste ontwikkelingen met betrekking tot het Deltares RHU (Rural-Hydrology-Urban)-project voor de D-HYDRO software.

Bij het converteren van de 1D schematisaties zijn alle kunstwerken ingesteld op het functioneren tijdens hoogwater. Dat betekent o.a. dat de stuwen op de Nederrijn bij Driel, Amerongen en Hagestein geheel geopend zijn en niet meer met de RTC-module in D-HYDRO hoeven worden aangestuurd. Gemalen binnen dijkkring 48 zijn uitgezet omdat WRIJ aanneemt dat deze het begeven bij een grootschalige overstroming, omdat de stroomvoorziening zal uitvallen en de gemaal-locaties niet meer bereikbaar zijn met noodpompen. De afvoergolf bij Lobith en de Qh-relaties voor benedenstroomse randen van het 1D Rijntakken model zijn gebaseerd op GRADE volgens WBI (Wettelijk Beoordelings Instrumentarium). Voor de instroom van de IJssel, Aa-strang, Bielheimerbeek en Waalse water is uitgegaan van een constant instroomdebiet gegeven in het SOBEK-2 model van WRIJ (een gemiddelde winterafvoer). De andere kleinere waterlopen die via een gemaal op de grote rivieren afwateren hebben geen instroomdebiet in de modelschematisatie. De instroomdebieten bij deze waterlopen zouden leiden tot een te grote stijging in de waterstand bij uitlaten, omdat in de overstromingsberekeningen voor de gemalen bij de uitstroompunten verondersteld wordt dat deze uitgevallen zijn. Om toch goede initiële condities voor de 1D-schematisatie te creëren is er een extra simulatie uitgevoerd waarmee een restart file is gegenereerd. In deze som is de afvoer bij Lobith op 3000 m³/s gezet en zijn alle (laterale) debieten uit het SOBEK-2 model van WRIJ overgenomen.

Het 1D gedeelte van het model is via laterale 1D2D links gekoppeld aan het 2D model om de stroming tussen beide delen te simuleren (zie Figuur 3.1.) Voor de 1D2D links tussen de 1D watergangen binnen dijkkring 48 en het 2D deel zijn kadevlakken in de vorm van hoogte obstakels gecreëerd om ervoor te zorgen dat er alleen stroming plaatsvindt als de watergang buiten zijn oevers treedt of als de waterstand op het 2D grid zo hoog wordt dat het de watergang instroomt.

Alle bewerkingstappen voor de modelschematisatie zijn besproken in wekelijkse overleggen tussen WRIJ en Deltares. De stappen in het proces van modelbouw zijn waar mogelijk met scripts uitgewerkt zodat ze reproduceerbaar en herhaalbaar zijn. Dit omdat voorzien werd dat de modelbouw een stapsgewijs en iteratief proces zou zijn. De uiteindelijke datalagen en modelementen zijn gecontroleerd door WRIJ.

Daarnaast is het belangrijk om mee te nemen dat dijkkring 48 grensoverschrijdend is, in tegenstelling tot andere dijkringen van WRIJ. De gebruikte invoergegevens zijn veelal verschillend qua samenstelling of formaat voor Nederland en Duitsland. Er zijn daarom extra stappen uitgevoerd om coherente modeldata te krijgen.



Figuur 3.1 Weergave rekenroosters in dijkkring 48: 1D model (blauw), 2D rooster (grijs), 1D2D links (oranje)

In de volgende paragrafen worden achtereenvolgens de modelbouw aspecten besproken van:

- Het hoogtemodel (DEM);
- De lijnelementen voor obstakels;
- Initiële waterstanden in meren en plassen;
- Landgebruik en ruwheid;
- Waterlopen;
- Genereren van het rekenrooster;
- Dijkdoorbraak – breslocaties.

De toelichting in dit hoofdstuk is redelijk globaal en beschrijvend. In bijlage A zijn de diverse stappen in de modelbouw in meer detail puntsgewijs opgeschreven. De bijlage is in die zin meer een 'kookboek' en handleiding hoe een model voor een andere dijkkring op te zetten.

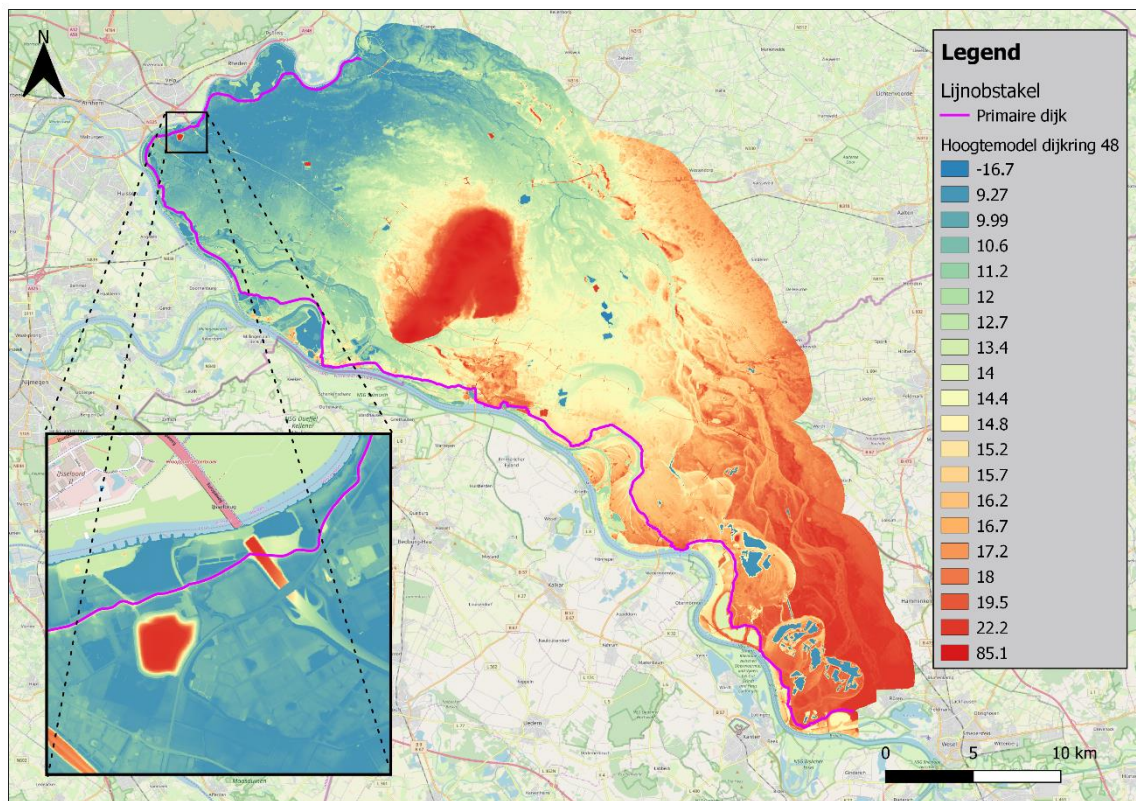
3.2 Hoogtemodel

3.2.1 Algemeen

Het hoogtemodel van dijkkring 48 is gecreëerd op basis van de meest actuele hoogtekarten beschikbaar voor het Nederlandse (2018) en Duitse deel (2014). Dat is voor Nederland het AHN3 DTM met een resolutie van 0.5 meter. In AHN3 zijn niet-maaiveld objecten (vegetatie, gebouwen) uitgefilterd. Voor het Duitse deel is een DTM door WRIJ beschikbaar gesteld met een resolutie van 1 meter (DGM1). Figuur 3.2 geeft het uiteindelijke hoogtemodel van dijkkring 48 weer. Voor de overstromingsberekeningen zou het Montferland eruit geknipt kunnen worden, maar om het model voor wateroverlast als gevolg van neerslag bruikbaar te laten zijn is dat bewust niet gedaan. Het kost bij de huidige overstromingsberekeningen toch geen extra rekentijd omdat het Montferland niet overstroomt.

In eerste instantie was de hoogtekarte beperkt tot het binnendijs gebied van dijkkring 48. De oostgrens van de dijkkring is niet heel scherp. Later is het DTM daarom uitgebreid met het gebied gelegen in een buffer van 2 kilometer ten oosten van de dijkkring. Ook de hoogtekarte voor de uiterwaarden van de Rijntakken is toegevoegd. Deze delen zijn nodig om de hoogtes en stroming bij de randen van het gebied goed in de modelschematisatie te krijgen. Ook is het van belang om bij een overstroming van dijkkring 48 naar dijkkring 49 die rand al goed in het model mee te nemen, inclusief eventueel verhoogde elementen. Hiervoor heeft WRIJ de modelbegrenzings opnieuw bepaald en aangeleverd. De begrenzing met dijkkring 49 loopt langs de hoger gelegen rivierduinrestanten tussen Doetinchem en Doesburg; en ten zuidoosten van Doetinchem zijn de hoge grond lijnen bepaald op basis van oudere overstromingskaarten. Voor vervolgstudies wordt aanbevolen om eenmalig alle actuele hoogtekarten te verzamelen voor een gebied dat bestaat uit de dijkkring inclusief een buffer van 2 kilometer op plekken waar het niet grenst aan het buitenwater, en de uiterwaarden van het buitenwater.

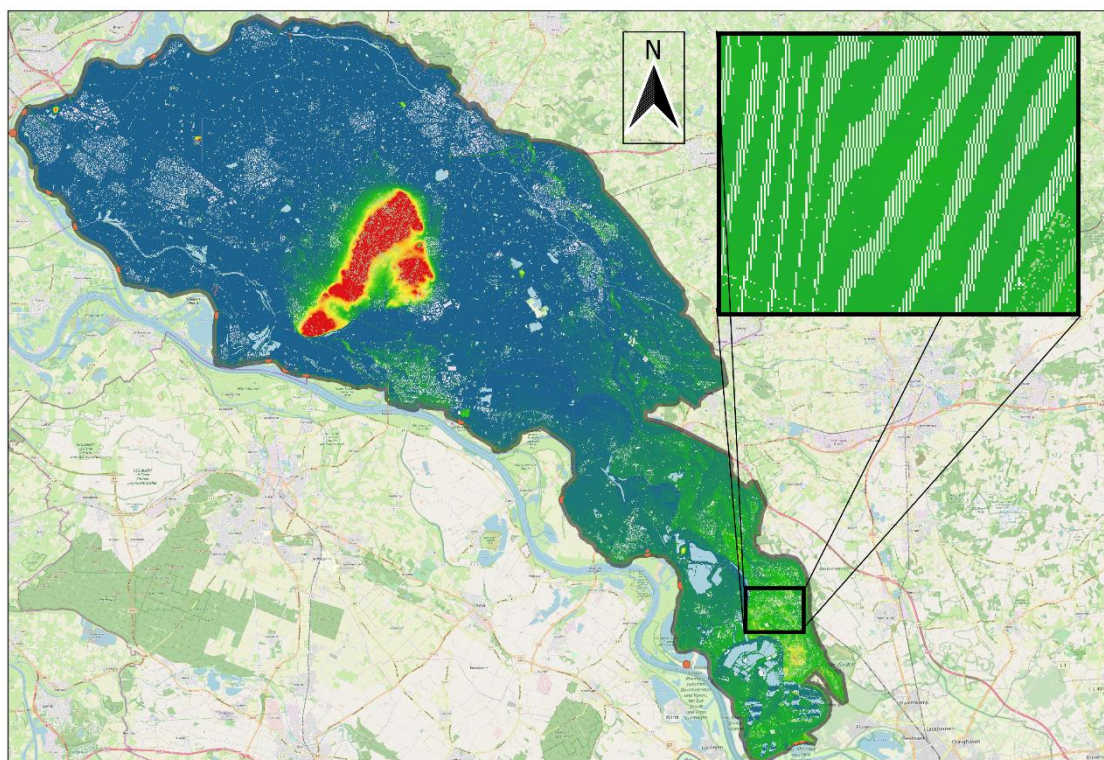
Aangezien de dijkkring grensoverschrijdend is en AHN3 nog niet beschikbaar was voor het gebied via PDOK (Publieke Dienstverlening Op de Kaart), is het AHN3 aangeleverd door WRIJ. De hoogtekarten van de twee landen waren intern bij WRIJ al afgeknipt op de grens en samengevoegd tot één kaart. De aansluiting op de grens was redelijk goed, met hoogteverschillen van minder dan 10 cm. Dit is in overleg met WRIJ als acceptabel bestempeld.



Figuur 3.2. Hoogtemodel dijkkring 48 inclusief primaire dijk

De Duitse hoogtekartaart is gemaakt op basis van laserscandata. In Figuur 3.3 is zichtbaar dat er niet elke vierkante meter een laserscanpunt beschikbaar was in de Duitse brondata; dit komt tot uiting in het strepenpatroon met gaten. Deze gaten en de bestandsgrootte van circa 25 Gb voor het DEM op de resolutie van 0.5m hebben tot het besluit geleid om een basis DEM voor de modellering met resolutie van 2x2 meter af te leiden. Eerst zijn de gaten bij uitgeknipte niet-maaiveld objecten, watervlakken en waterlopen opgevuld door interpolatie. Daarna is het DEM geaggregeerd naar een resolutie van 2x2 meter. Hierbij is een bilineaire interpolatiemethode gebruikt. In de Leidraad overstromingssimulaties wordt een mediane interpolatie voorgesteld, maar hiervan is afgeweken omdat de interpolatie van hoogtes op het rekenrooster in de D-FLOW FM rekenkern gebeurt en hier de mediane interpolatie (nog) niet mogelijk is. Het effect op de resultaten is overigens verwaarloosbaar, ook omdat later met cellen van 5x5 meter tot 40x40 meter is gerekend.

Voor toekomstige modelschematisaties wordt aangeraden om eerst de verschillende kaartbladen samen te voegen, waarna de samengevoegde hoogtekartaart gecontroleerd wordt op oneffenheden. De volgende stap is om de gaten bij de uitgeknipte niet-maaiveld objecten en ter plekke van water op te vullen. Tenslotte kan, indien nodig, de hoogtekartaart geaggregeerd worden naar een grovere resolutie om het hoogtemodel hanteerbaar te maken.



Figuur 3.3 Gaten in de Duitse hoogtekaart doordat niet op elke vierkante meter een laserscanpunt beschikbaar was in de brondata

3.2.2 Bodemhoogtes meren en plassen

Na het creëren van een dicht geïnterpoleerde hoogtekaart zijn bodemhoogtes van watervlakken (meren en plassen) verlaagd. Dat is nodig omdat AHN3 en de Duitse hoogtekaart niet de bathymetrie (onderwater bodemhoogte) bij watervlakken weergeven, maar daar typisch de waterstand weergeven. Daarnaast heeft het opvullen van de gaten ertoe geleid dat de hoogtes bij de watervlakken ongeveer gelijk zijn aan de waterspiegel. Waterlopen zijn hier buiten beschouwing gelaten, omdat ze als 1D elementen in het model zijn verwerkt (zie paragraaf 3.6).

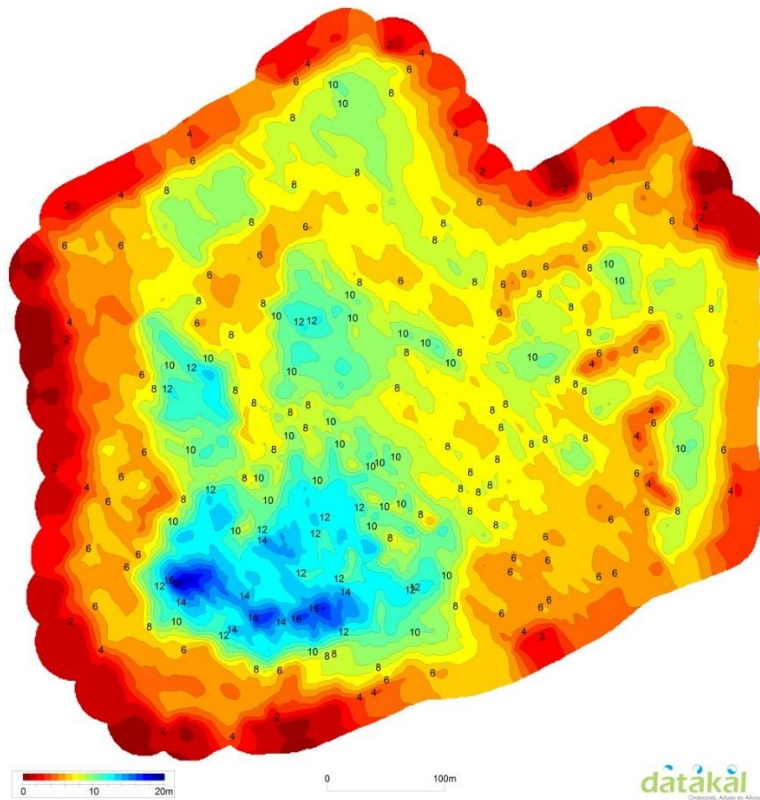
De meren en plassen zijn voor het Nederlandse deel geselecteerd uit de Basis Grootschalige Topografie (BGT) die verkrijgbaar is via PDOK. Voor het Duitse deel komen de meren en plassen uit de Basiskarte-D, aangeleverd door WRIJ. Er is besloten om alleen voor watervlaktes met een groter oppervlakte dan 5 hectare (50000 m²) de bodemhoogtes te verlagen¹ (zie Figuur 3.5). Het verlagen van de hoogtes is toegepast voor een gebied dat tenminste 40 meter aan de binnenkant van de rand van het watervlak ligt. Deze buffer aan de binnenkant is noodzakelijk om te voorkomen dat het water niet gelijk uit de meren en plassen gaat stromen na het initialiseren van je model. De grootte van de buffer hangt samen met gekozen resolutie van het rekengrid en de oppervlakte van de plas. De nieuwe bodemhoogte van het watervlak moet ingevuld worden. Indien de watervlakte een zandwinningsput is, dan is de diepte aangenomen die door WRIJ in een vlakkenbestand was aangeleverd. In andere gevallen zijn de watervlaktes met 10 meter verlaagd.

¹ Dezelfde meren en plassen zijn ook gebruikt om een initiële waterlaag te creëren.

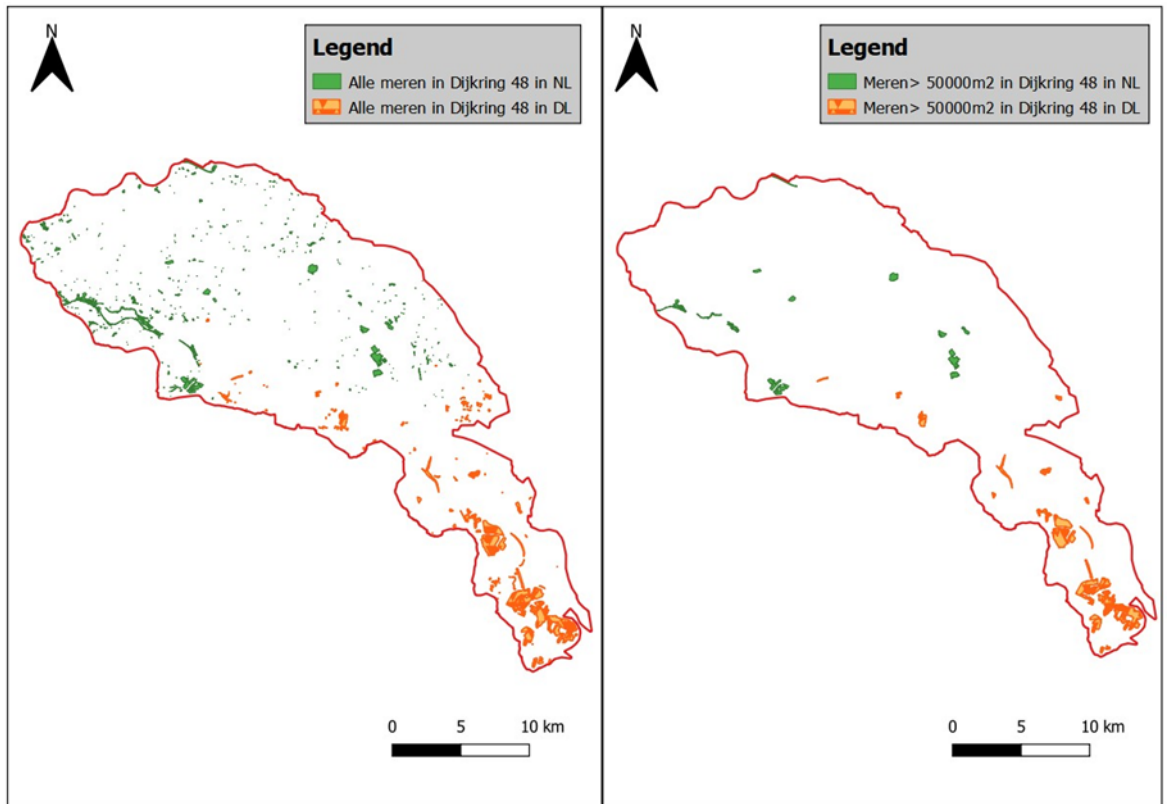
Om de bodemhoogtes te kunnen bepalen is aangenomen dat de minimale hoogte in de opgevulde hoogtekaart bij watervlaktes gelijk is aan de waterspiegel. WRIJ heeft de geselecteerde watervlaktes inclusief nieuwe bodemhoogtes (en initiële waterniveaus) gecontroleerd en aangepast waar nodig. Eén van deze aanpassingen was het toevoegen van 4 kleinere watervlakten. De bodemhoogtes van deze watervlaktes zijn aangepast voor een gebied van tenminste 25 meter aan de binnenkant van de rand van het water ligt.

Via andere bronnen (sportvisserij) is voor enkele plassen een gedetailleerdere dieptekaart van de plassen gevonden op internet. Deze zijn echter niet meer meegenomen in het model omdat ten eerste de invloed zeer gering zou zijn, en ten tweede het relatief veel werk zou zijn om deze te implementeren (de dieptes zijn alleen als een plaatje beschikbaar). Als voorbeeld in Figuur 3.4 de dieptes van het Stroombroek bij Doetinchem, gevonden op de site:

<https://www.hfmiddennederland.nl/actueel/7926/diepteкарten-recreatieplassen-beschikbaar.html>



Figuur 3.4 Dieptekaart Stroombroek (bij Doetinchem)



Figuur 3.5 Links alle meren en plassen uit BGT (NL) en Basislarte-D. Rechts de geselecteerde plassen > 5ha.

3.2.3 Tunnels en onderdoorgangen

Tot slot moeten tunnels en onderdoorgangen in het hoogtemodel worden gebrand. Voor dijkkring 48 zijn de tunnels en onderdoorgangen geïdentificeerd samen met WRIJ, op basis van gebiedskennis, BGT en hoogte-elementen. De diepte is daarna handmatig voor elk element bepaald, waarna het in het hoogtemodel is gebrand.

De rekenkern van D-HYDRO gebruikt van het uiteindelijke hoogtemodel één waarde per rekencel. De gebruiker kan instellen hoe deze waarde bepaald wordt. In dit geval is ervoor gekozen om het gemiddelde van alle waarden in een cel te nemen. De in de Leidraad overstroomingssimulaties aanbevolen mediane methode is nog niet beschikbaar in de rekenkern van D-HYDRO, maar zal in de toekomst als optie worden toegevoegd.

Bij het curvilineair rekenrooster langs de primaire keringen van dijkkring 48 is niet de mediane hoogte gebruikt tijdens het aggregeren, maar is de minimale waarde in elke cel genomen om er zeker van te zijn dat de kruinhoogte van een dijk bij doorbraak kan zakken tot het bodemniveau van het achterland. De primaire dijk wordt hiermee uit het 2D hoogtemodel gehaald en is toegevoegd als lijn-element (zie de volgende paragraaf).

De werkstappen voor het maken van een hoogtemodel zijn puntsgewijs beschreven in Appendix A.

3.3 Verhoogde lijnobstakels

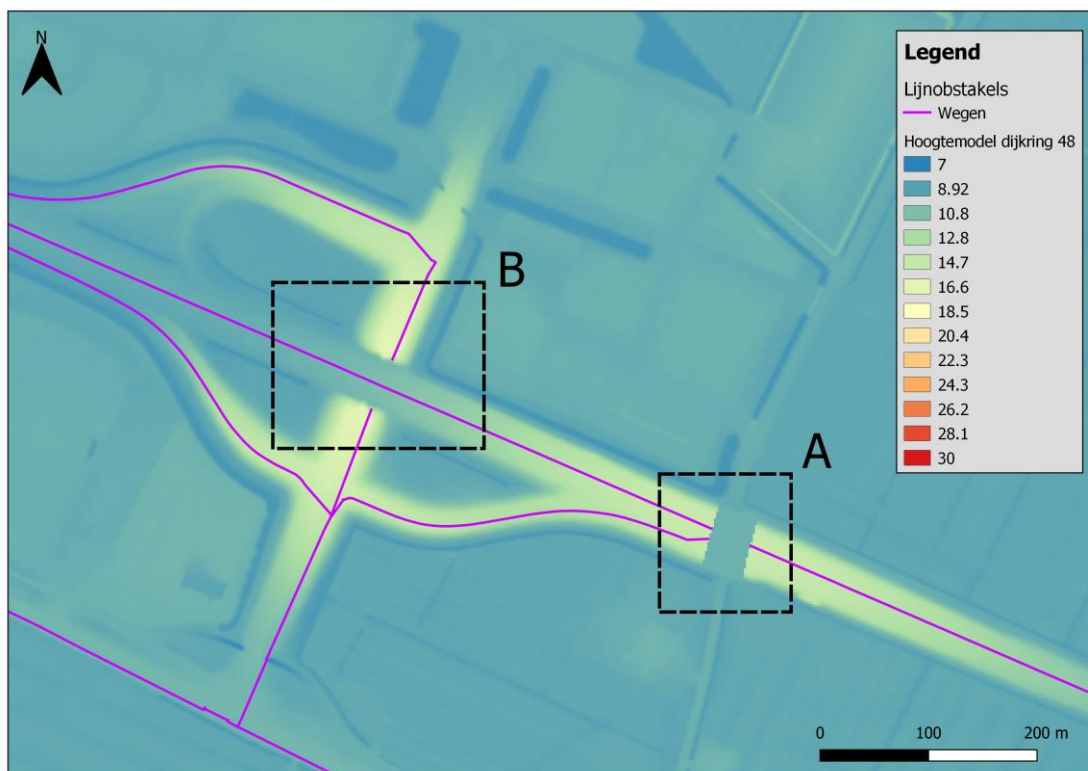
Naast het 2D hoogtemodel hebben obstakels, zoals keringen en hoger gelegen infrastructuur, veel effect op de overstroming over het gebied. De ligging en de maximale hoogte van de obstakels bepaalt waar het gaat overstromen en met welke diepte.

Het is daarom noodzakelijk om deze verhoogde lijn-obstakels te verwerken in de modelschematisatie. De standzekerheid van deze lijnelementen hangt af van het type obstakel en is in overleg met het waterschap vastgesteld. Er is aangenomen dat alle lijn-obstakels (keringen, wegen, spoorwegen etc.) standzeker zijn, dat wil zeggen dat ze niet bezwijken als er water tegenaan staat of overheen stroomt. Voor de geluidsschermen langs de Betuwelijn is aangenomen dat het standzeker is tot een waterdiepte van 1.5 meter, en dat het water er dan overheen stroomt (dus dat het scherm, dat in werkelijkheid hoger is, dan bezwijkt maar tot 1.5 meter wel blijft keren). In werkelijkheid kan een kering, weglichaam of het geluidsscherm bij voldoende belasting na bepaalde tijd bezwijken. Aanbevolen wordt nader onderzoek te doen naar wat de invloed van deze aanname is op het overstromingsverloop. Dat kan door één of meer kritische locaties te modelleren als stuw (of general structure) met RTC-sturing die het bezwijken formuleert als functie van de lokale waterstand voor het kerende element.

In het 2D model van dijkkring 48 zijn de primaire dijk, geselecteerde wegen en spoorwegen, keringen, kadevlakken en geluidswallen verwerkt als hoogte lijnelementen (fixed weirs) (zie Figuur 3.8). Rondom de hoger gelegen infrastructuur is tevens roosterverfijning toegepast (zie paragraaf 3.7 over het 2D rekenrooster). Dit is weliswaar niet voorgeschreven in de Leidraad overstromingssimulaties, maar uit eerdere gevoeligheidsanalyses met D-HYDRO is gebleken dat de berging rondom de lijnobstakels dan beter in de modelschematisaties komt (pilotstudie Bommelerwaard voor waterschap Rivierenland in het eerste TKI-project D-HYDRO). Aan beide kanten van de primaire dijk is een curvilineair rooster gelegd met de dijk als lijnelement in het midden om de dijkdoorbraken goed te kunnen simuleren.

De wegen en spoorwegen komen uit het BGT voor het Nederlandse deel. Voor het Duitse deel is Basiskarte-D gebruikt. In samenwerking met WRIJ is met behulp van het hoogtemodel en GIS (QGIS en/of ArcGIS), en aanvullend satelliet foto's en eerdere simulaties bepaald welke wegen en spoorwegen kerend zijn. De geselecteerde polygonenbestanden van hoger gelegen infrastructuur zijn toegepast voor het verfijnen van het rooster. Deze bestanden zijn daarna tot lijnen geconverteerd met behulp van verschillende functionaliteiten in QGIS en ArcGIS. De primaire dijk, kerende elementen, kadevlakken en geluidswallen zijn als lijnelementen aangeleverd door WRIJ.

De ligging van alle lijnelementen is handmatig gecontroleerd en aangepast door Deltares. Het hoogtemodel is hierbij gebruikt om de correcte ligging te bepalen en aanpassingen bij onderdoorgangen en viaducten uit te voeren. Bij onderdoorgangen en viaducten, zoals tunnels en waterlopen, die zichtbaar zijn in het hoogtemodel (zie bij A in Figuur 3.6) zijn delen verwijderd. Dit is noodzakelijk om goede doorstroming bij deze elementen te behouden. De methode voor het extraheren van de hoogtes van de lijnelementen (later in deze sectie beschreven) kan leiden tot incorrecte hoogtes wanneer de lijnelementen niet zijn weggeknipt bij deze delen. Dezelfde methode vraagt ook aanpassingen van de lijnelementen bij ongelijkvloerse kruisingen van infrastructuur (zie B in Figuur 3.6).

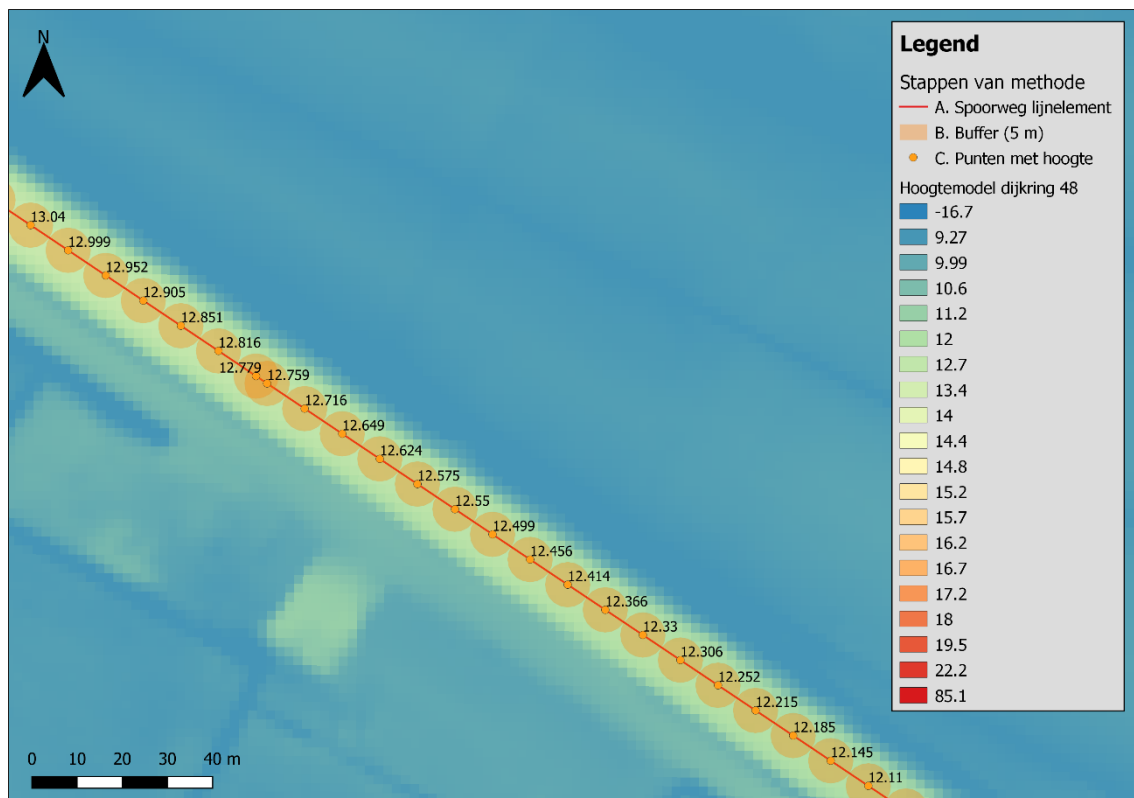


Figuur 3.6 Voorbeeld van lijnobstakels bij onderdoorgang (A) en ongelijkvloerse kruising (B). A laat tevens een onderdoorgang zien die in het hoogtemodel is gebrand.

Om de lijnelementen te converteren tot een formaat bruikbaar voor de D-Flow FM rekenkern en tegelijkertijd de maximale hoogte uit het hoogtemodel te halen is de volgende methode ontwikkeld:

Allereerst zijn de lijnelementen omgezet naar punten met x- en y-coördinaten (zie Figuur 3.7). Elke vertex van een (poly-)lijn is een punt geworden. Als vertices meer dan 10 meter uit elkaar liggen is er een extra punt toegevoegd, zodat minimaal elke 10 meter een punt ligt. Voor elk punt is daarna de hoogte uit het gedetailleerde basishoogtemodel gehaald door de maximale hoogte te bepalen in een buffer rondom elk punt. Het gebruik van een buffer is nodig om de maximale hoogte te extraheren, omdat sommige lijnelementen niet precies op het hoogste deel liggen, en om ervoor te zorgen dat opeenvolgende punten niet te veel in hoogte van elkaar verschillen. Voor spoorwegen, kadevlakken en keringen is een zoek buffer (straal) van 5 meter toegepast. De buffer is respectievelijk 10 en 20 meter voor wegen en de primaire dijk. De op deze manier bepaalde hoogtes zijn dan toegevoegd aan de punten en omgeschreven naar het juiste invoerformaat voor D-HYDRO ('fixed weir' bestand).

Al deze stappen zijn door middel van Python scripts uitgevoerd. De hoogte van de geluidsschermen langs de Betuweroute zit niet in het DEM. Als hoogte van deze schermen is het maaiveldniveau plus de aangenomen standzekerheid van 1.5 meter aangenomen (ook al zijn ze in werkelijkheid hoger, tot ongeveer 4.5 meter boven maaiveld). Bezwijken van de geluidsschermen is niet meegenomen in het model, bij een diepte boven 1.5 m zal water er in het model overheen stromen. In werkelijkheid zal bezwijken waarschijnlijk ook niet gebeuren, omdat de geluidsschermen langs het spoor niet volledig gesloten zijn en water er 'omheen' zal stromen. Tenslotte zijn de 'fixed weir' bestanden gecontroleerd en goedgekeurd door WRIJ.



Figuur 3.7 Voorbeeld van de stappen om de hoogte uit het hoogtemodel van dijkring 48 voor spoorweg lijnelement te bepalen.

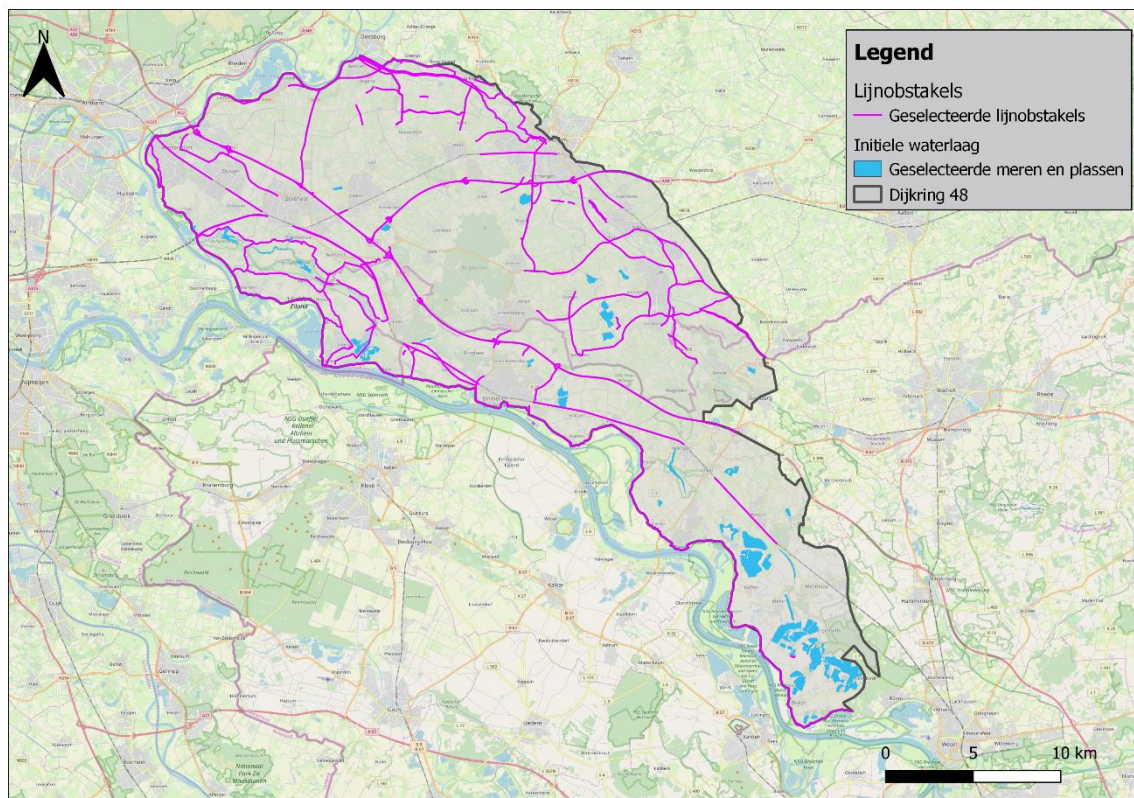
De werkstappen voor het maken van lijn obstakels zijn puntsgewijs beschreven in Appendix A.

3.4 Initiële waterstanden in meren en plassen

De bodemhoogtes van geselecteerde meren en plassen (zie Figuur 3.8) zijn verlaagd in het hoogtemodel van dijkring 48, zoals beschreven in paragraaf 3.2, omdat niet de bodemhoogtes maar de waterspiegels zijn weergegeven in AHN3 en de Duitse hoogtekaart. Om te voorkomen dat tijdens de overstromingssimulaties deze watervlaktes eerst worden opgevuld, is er een initiële waterlaag gecreëerd. Deze initiële waterlaag bevat realistische waterspiegels van de watervlaktes, die eerder zijn gebruikt voor het berekenen van de bodemhoogtes bij watervlaktes in het hoogtemodel.

Voor elke plas is aangenomen dat de initiële waterstand gelijk is aan de minimale hoogte van de watervlakte volgens de opgevulde hoogtekaart. De watervlaktes en de bijbehorende waterstanden zijn daarna naar een raster geconverteerd. Dit rasterbestand is gecontroleerd door WRIJ. Als laatste is de initiële waterlaag op het rooster geïnterpoleerd. Elke cel, die in een (deel van een) watervlakte ligt, heeft de initiële waterstand gekregen.

De werkstappen voor het maken van de initiële waterlaag zijn puntsgewijs beschreven in Appendix A.



Figuur 3.8 Lijnobstakels en watervlaktes toegepast in het 2D gedeelte van het overstromingsmodel.

3.5 Landgebruik/ruwheidslaag

Om het overstromingsverloop binnen dijkkring 48 te kunnen simuleren is een ruwheidslaag noodzakelijk. In de Leidraad overstromingssimulaties (de Bruijn et. al, 2018) wordt aangeraden om landgebruikskarten toe te passen voor het creëren van de ruwheidslaag. Elke landgebruiksklasse krijgt één ruwheidswaarde toegekend, waarna de landgebruikskarte met een conversietabel is omgezet naar een ruwheidslaag.

Voor dijkkring 48 zijn een winter- en zomer- ruwheidslaag gemaakt. De winter-ruwheidslaag is in de meeste sommen toegepast (zie paragraaf 4.3). Alleen in som 5 is de zomer-ruwheidslaag toegepast om de gevoeligheid van het model voor verschillende ruwheden te analyseren.

Het creëren van de ruwheidslaag is op basis van landgebruikskarten LGN7 (Landelijk Grondgebruik Nederland) en Basis-DLM voor respectievelijk het Nederlands en Duitse deel uitgevoerd. Alle landgebruikskarten zijn voor dijkkring 48 aangeleverd door WRIJ. LGN7 is een rasterbestand met cellen van 25 bij 25 meter. Basis-DLM zijn polygonen bestanden. De verschillende klassen van de bestanden zijn eerst in kaart gebracht. De 'ATKIS-Objektartenkatalog Teil B: Basis DLM' is als naslagwerk gebruikt om onderscheid te kunnen maken tussen de verschillende landgebruiksklassen in het Duitse deel van dijkkring 48. (zie <http://www.adv-online.de/icc/extdeu/nav/a63/binarywriterservlet?imgUid=9201016e-7efa-8461-e336-b6951fa2e0c9&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111>)

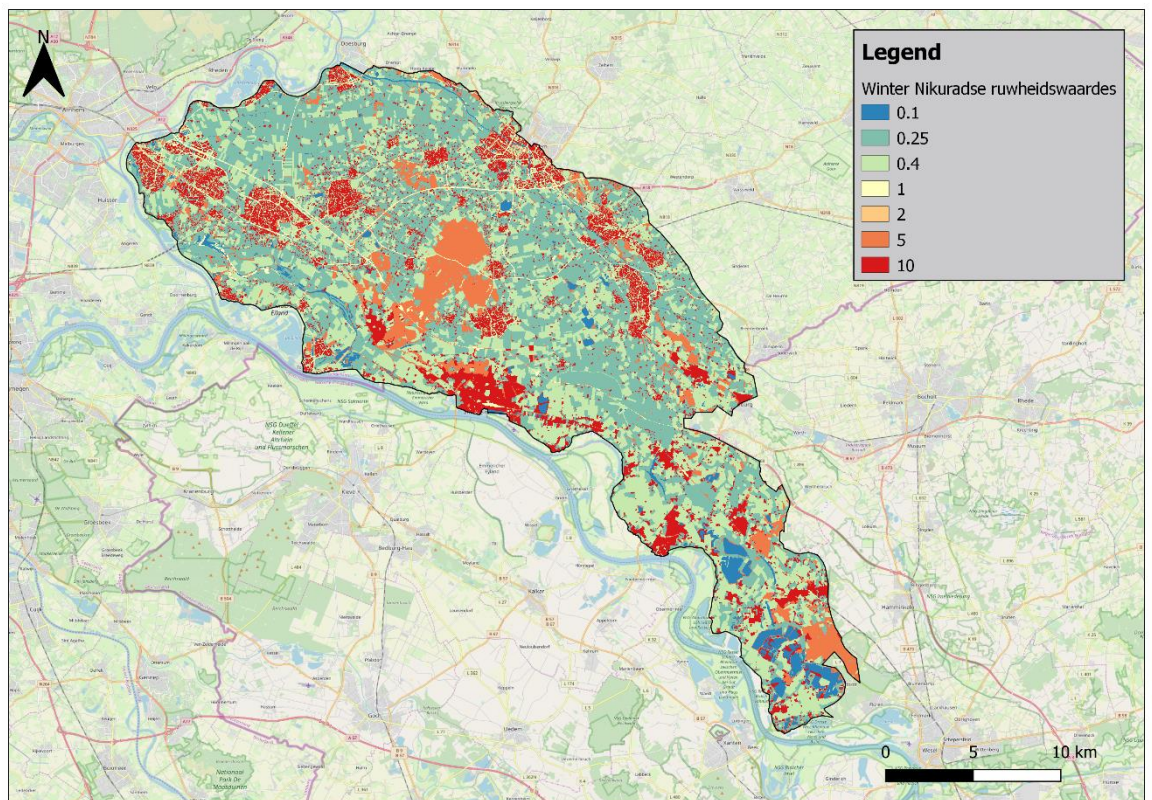
Daarna is een conversietabel opgesteld voor het converteren van landgebruiksklassen naar ruwheidswaardes. De conversietabel is in samenwerking met WRIJ gemaakt. Hierbij is de conversietabel 5.2 uit de Leidraad overstromingssimulaties gehanteerd.

Deze conversietabel geeft een vertaling van landgebruik naar Nikuradse ruwheid voor LGN4, een voorloper van LGN7. De klassen uit LGN7 zijn eerst aan de klassen van LGN4 gelinkt. De website van LGN7 van WUR (Wageningen University & Research) is geraadpleegd voor het koppelen van de klassen LGN7 aan LGN4.

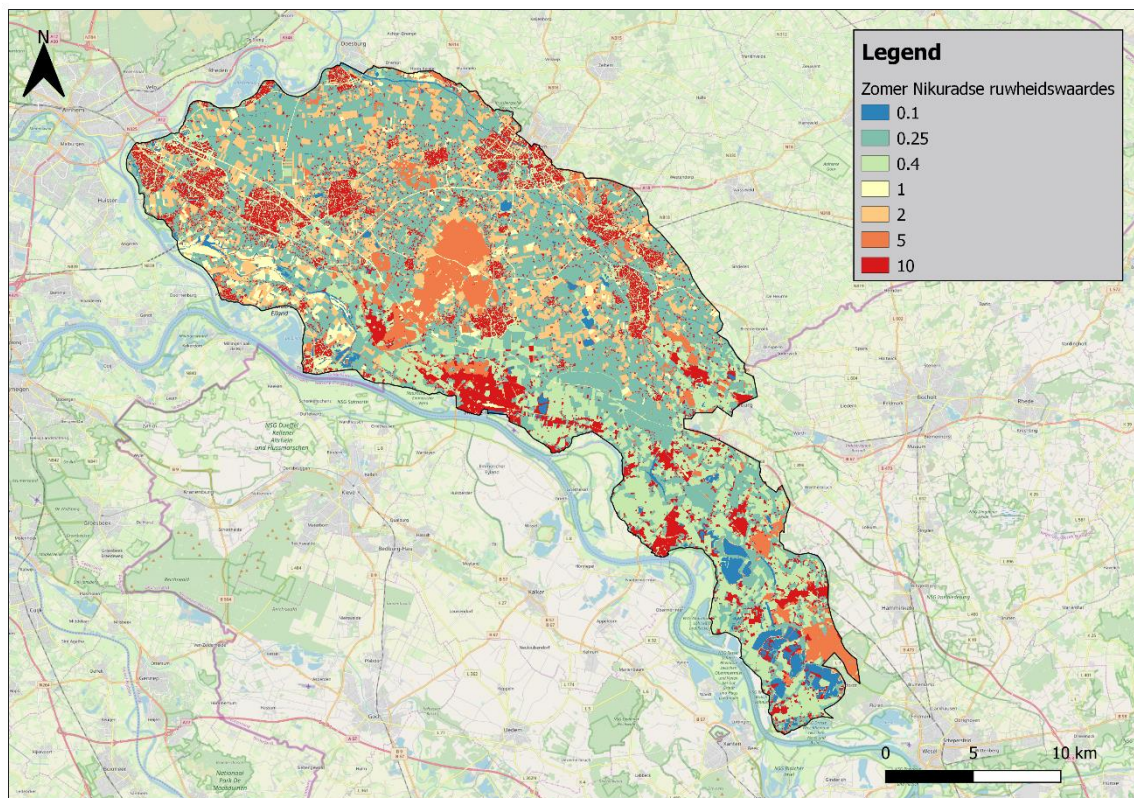
(<https://www.wur.nl/nl/Onderzoek-Resultaten/Onderzoeksinstituten/Environmental-Research/Faciliteiten-Producten/Kaarten-en-GIS-bestanden/Landelijk-Grondgebruik-Nederland/Versies-bestanden/LGN7.htm>)

Daarna zijn de verschillende Duitse landgebruiksklassen gelinkt aan de klassen van LGN7. De koppelingstabellen en de Nikuradse ruwheidswaarde uit tabel 5.2 van de Leidraad overstromingssimulaties zijn gehanteerd voor het bepalen van de winter Nikuradse ruwheidswaarde voor het Nederlandse en Duitse deel. De zomer-ruwheidswaardes zijn bepaald door WRIJ. Alle koppelings- en conversietabellen met de landgebruiksklassen en ruwheidswaardes zijn in Appendix D gegeven.

Vervolgens zijn LGN7 en Basis DLM elk naar een winter- en zomer- ruwheidslaag voor dijkkring 48 geconverteerd met behulp van de tabellen. De ruwheidslagen van het Duitse en het Nederlandse deel van dijkkring 48 zijn vervolgens samengevoegd tot één ruwheidslaag voor de winter en één ruwheidslaag voor de zomer (zie Figuur 3.9 en Figuur 3.10). De resolutie van 25 bij 25 meter uit LGN7 is hierbij overgenomen in de ruwheidslaag.



Figuur 3.9 Winter Nikuradse ruwheidslaag



Figuur 3.10 Zomer Nikuradse ruwheidslaag

Aangezien het rooster verschillende resoluties heeft, is eerst de ruwheidswaarde voor roostercellen, die een ruwheidswaarde bevatten, bepaald door het gemiddelde van ruwheidswaarde(s) te nemen. De ruwheidswaardes in kleine roostercellen, waarin ruwheidswaardes ontbraken als gevolg van de resolutie van de ruwheidslaag, zijn in een tweede bewerkingstap bepaald door middel van triangulatie (vergelijkbaar met Thiessen gewogen middeling van omliggende cellen).

De werkstappen voor het maken van de ruwheidslagen zijn puntsgewijs beschreven in Appendix A.

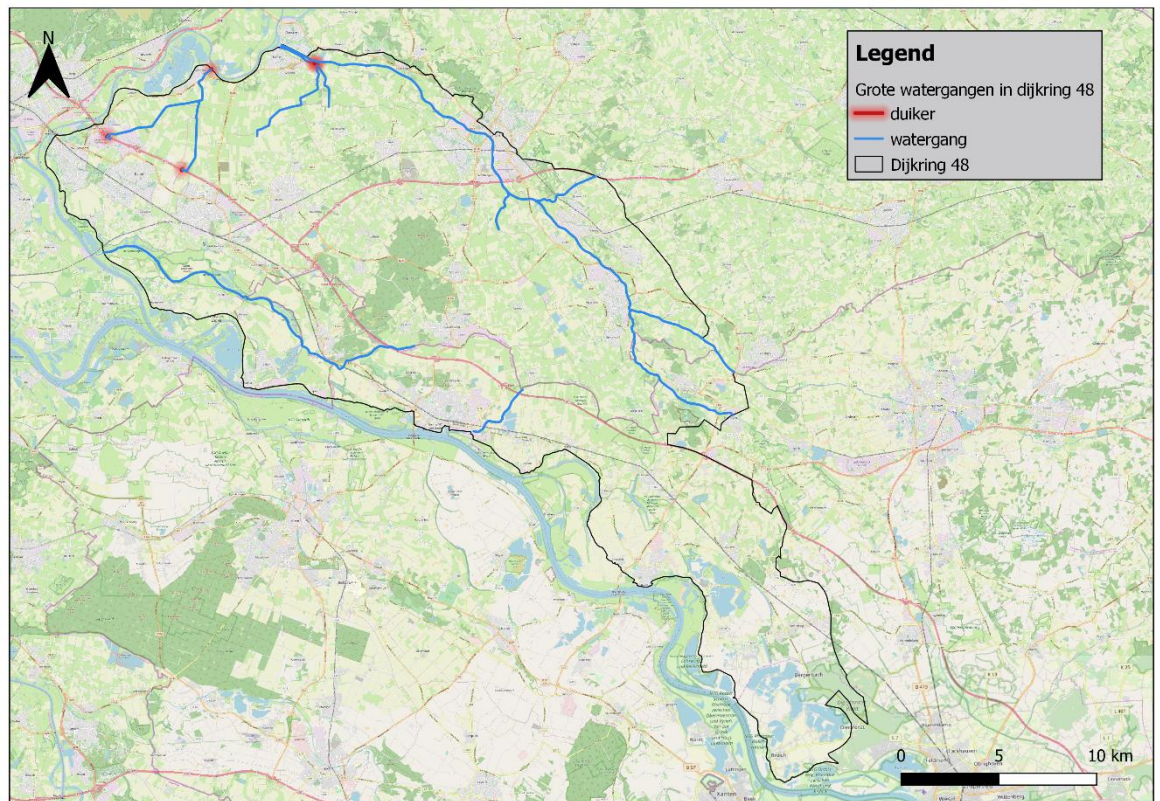
3.6 Waterlopen

Overstromingen planten zich sneller voort via de watergangen dan over land. Daarom is een goede modellering van de waterlopen belangrijk voor het goed modelleren van het overstromingsverloop. Dit bleek eerder bij de dijkdoorbraaksimulaties Bommelerwaard met D-HYDRO, maar was ook al bekend uit eerdere dijkdoorbraaksimulaties (bv. Vallei en Eem, dijkdoorbraak bij de Grebbedijk (Asselman, 2001)). Dit kan ertoe leiden dat gebieden dichtbij watergangen eerder te maken krijgen met een overstroming ondanks dat ze ver van de breslocatie af liggen. Een goede implementatie van de watergangen in het binnendijkse gebied is daarom essentieel voor het overstromingsverloop, zeker als de aankomsttijd van belang is. Dit is het geval voor het waterschap Rijn en IJssel.

Om te garanderen dat de grote watergangen goed in de modelschematisatie zijn verwerkt zonder te veel in te leveren op de duur van de simulatie, is er een analyse uitgevoerd over hoe de watergangen meegenomen moeten worden: als 1D of via kleinere cellen bij de watergangen in 2D. De afweging van het modelleren van de watergangen in 1D of 2D wordt beschreven in paragraaf 3.6.2.

3.6.1 Data

In overleg met het waterschap Rijn en IJssel zijn de grote watergangen met een breedte van minimaal 10 meter en een belangrijke functie binnen dijkkring 48 geselecteerd en meegenomen in het model (Figuur 3.11) Deze watergangen zijn als een lijnvectorbestand aangeleverd door het waterschap. Het lijnvectorbestand bevat de volgende maten van de watergang: lengte, (zij)taluds, bodembreedte, breedte op waterniveau, breedte op insteek met maaiveld, bodemhoogte en normaal peil. Enkele delen van de aangeleverde watergangen zijn eigenlijk duikers. In 2D zijn deze gemodelleerd als een normale watergang en in 1D kunnen ze meegenomen worden als een duiker. Deze watergangen stromen via een gemaal of een stuw van dijkkring 48 naar de Rijntakken. Details over de uitlaten en kunstwerken zijn gegeven in paragraaf 3.9.2.2. Het waterschap heeft ook de 1D-SOBEK-2 modellen van deze watergangen aangeleverd. Voor de Duitse watergangen naar gemaal Emmerich in het model heeft WRIJ aannamen gedaan over de dimensies op basis van luchtfoto's, DEM, waterstandsmetingen en veldbezoek.



Figuur 3.11 Grote watergangen binnen dijkkring 48, minimale breedte ≥ 10 m

Naast de watergangen binnen dijkkring 48 moet ook de Rijn worden gemodelleerd. Een 2D D-HYDRO model van de (Nederlandse) Rijntakken is in ontwikkeling, maar nog niet beschikbaar. Daarom is voor de Rijntakken gebruik gemaakt van een 1D model dat aan het 2D model van de dijkkring is gekoppeld. In eerste instantie is getracht om een (SOBEK-3) model van de Rijn inclusief het Duitse deel van de Rijn op te vragen; dat is het model dat door Rijkswaterstaat is gebruikt om de te verwachten afvoeren bij Lobith bij diverse overstromingsscenario's te bepalen (zie paragraaf 2.2). Echter, de afstemming met Rijkswaterstaat en met NordRhein-Westfalen bleek een tamelijk ingewikkeld en tijdrovend proces. Daarom is besloten om nu gebruik te maken van het standaard Nederlandse Rijntakken model dat wel snel beschikbaar kon worden gesteld. In een later stadium kan alsnog het grotere 1D model (inclusief het relevante Duitse deel van de Rijn) gekoppeld worden.

Het 2D model is opgezet met een curvilineair grid langs de primaire dijken (ook in Duitsland) en is daar dus al geschikt voor gemaakt. Van het SOBEK-3 1D Rijntakken model (vanaf Lobith) is de meest recente versie 'SOBEK-Rijn-J17_5-v3' opgevraagd via de helpdesk water van Rijkswaterstaat, via het internet adres (<https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/modelschematisaties/rivieren/>). Dit SOBEK-3 model is geconverteerd naar een D-HYDRO 1D model en gekoppeld aan het binnendijks gebied.

3.6.2 Afweging waterlopen in 1D of 2D met testmodel Oude IJssel

Uit simulaties met een puur 2D modelschematisatie voor een dijkdoorbraak bij Bislich (deze som wordt gerapporteerd in paragraaf 4.2.1) bleek dat het runnen van de 2D simulatie enkele dagen duurde wanneer de waterlopen in 2D in het model werden verwerkt. Dat was significant langer dan wanneer de watergangen niet werden meegenomen. De langere simulatie tijd werd veroorzaakt door cellen die Courant limiterend zijn, en hangt samen met de kleine cellen die zijn toegepast om de nauwkeurigheid van de 2D watergangen te kunnen waarborgen.

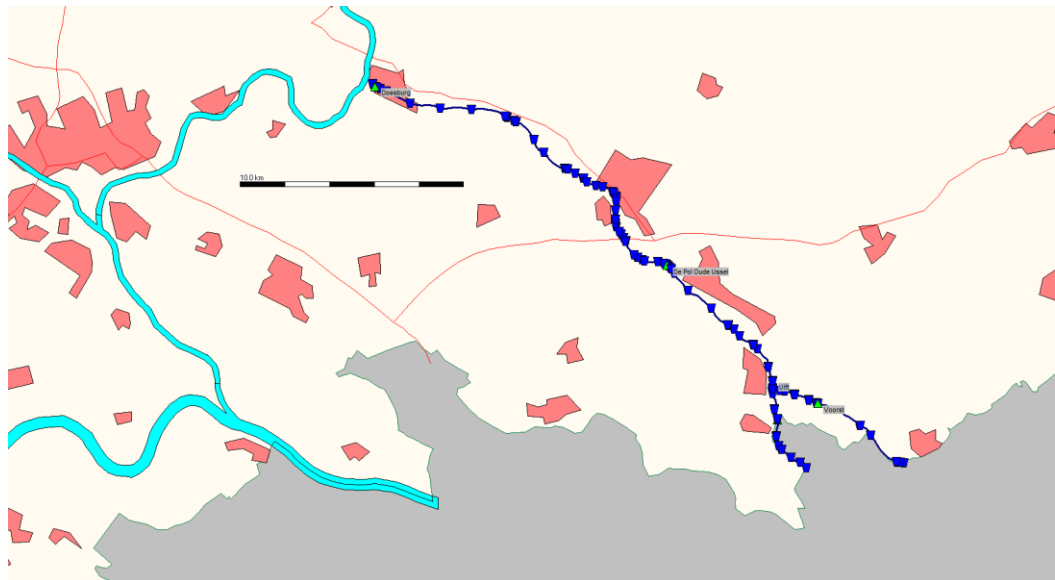
Om de gevoeligheden qua rekentijd nader te onderzoeken zijn twee opties voor het modelleren van waterlopen onderzocht:

- 2D modellering, door het inbranden van de watergang in het 2D-FM model; en
- 1D modellering, op basis van het 1D SOBEK model.

De afweging tussen de 2 opties is aan de hand van een testmodel van de Oude IJssel uitgevoerd. De bovenstroomse takken van de IJssel en Aa-strang zijn hierin meegenomen.

3.6.2.1 1D test model Oude IJssel

Door het waterschap is een SOBEK 2.13 model van de Oude IJssel en Aa-strang beschikbaar gesteld (zie Figuur 3.12). Het model bevat 3 randen, 5 stuwen, 5 meetpunten, 198 cross-sections en 728 rekenpunten (connection nodes en calculation points). Het model schematiseert de Oude IJssel van Doesburg tot Ulft, en heeft vervolgens twee bovenstroomse takken, de IJssel (die een eind langs de grens met Duitsland loopt) en de Aa-strang (Bocholter Aa) tot aan het verste punt stroomopwaarts aan de Duits-Nederlandse grens bij Dinxperlo. Dit model is in SOBEK-2 getest en opgeschoond, geïmporteerd in SOBEK-3 en vervolgens geconverteerd naar een FM 1D model.



Figuur 3.12 SOBEK-2 model van de Oude IJssel en Aa-strang

Het aangeleverde SOBEK-2 model heeft twee bovenstroomse debietranden, met respectievelijk een debiet van 4 m³/s (Issel) en 10 m³/s (Aa-strang). De benedenstroomse rand bij Doesburg is een waterstandsrand. In het model zijn vijf kunstwerken onderscheiden, waarvan er vier met een controller worden gestuurd. Alleen de stuw in Duitsland is een vaste stuw. De gegevens van de stuwen in het SOBEK-2 Oude IJssel model zijn weergegeven in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Gegevens van stuwen in het SOBEK-2 model van de Oude IJssel

Stuw (id)	Naam	Breedte (m)	Ingestelde Kruinhoogte (m NAP)	Minimum kruinhoogte (m NAP)	Maximum kruinhoogte (m NAP)	Bovenstrooms streefpeil (m NAP)
KST54960003	Doesburg	24.0	9.58	5.0	10.0	10.0
KST54530006	De Pol	19.2	11.78	8.05	12.30	12.3
KST54410002	Ulft	21.4	12.88	10.60	13.30	13.3
KST54130003	Issel (DE)	7.0	12.75	12.75	12.75	-
KST54180005	Voorst	13.8	14.19	13.24	15.10	14.75

Verder is in het aangeleverde SOBEK-2 model een afvoercoëfficiënt (discharge coëfficiënt) $C_e=1.3$ en een contractie coëfficiënt (lateral contraction coëfficiënt) $C_w=1.0$ gedefinieerd voor alle stuwen.

3.6.2.2 2D test model van Oude IJssel

Het 2D test model van de Oude IJssel bestaat uit een 2D cartesisch rekenrooster van 40 bij 40 meter voor dijkkring 48. Het rooster is verfijnd bij kerende wegen en spoorwegen tot respectievelijk 20 bij 20 meter en 10 bij 10 meter. Bij de eerder genoemde watergangen van de Oude IJssel is het rooster verder verfijnd tot een celgrootte van 5 meter. Ook is de geometrie van de watergangen in het hoogtemodel verwerkt. Het bodemniveau van de watergangen in het 2D grid gebrand. Hierbij is het verhang op basis van het 1D model meegenomen. De breedte van het inbranden in het DEM is gedaan voor de bekende breedte van de watergang op maaiveldniveau. De stuwen in de Oude IJssel zijn als 2D-kunstwerken in het testmodel aangebracht. Daarnaast zijn er in het 2D model bovenstroomse debietranden opgelegd bij de IJssel en Aa-strang met dezelfde waarden als in het 1D model. Benedenstrooms bij Doesburg is er een waterstandsrand opgelegd. Op deze manier zijn de modellen zo goed mogelijk vergelijkbaar.

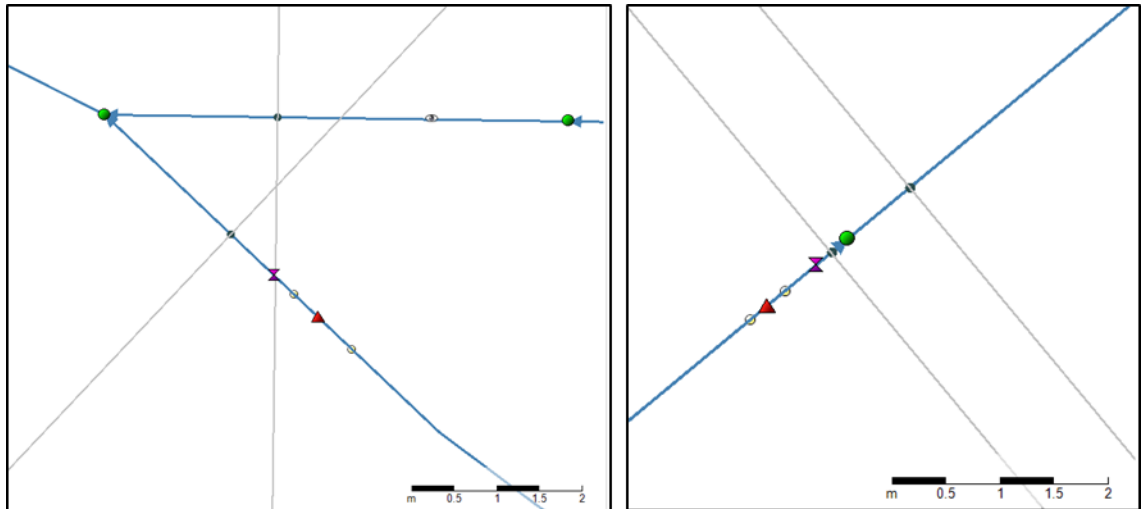
3.6.2.3 Afweging modelleren waterlopen in 1D of 2D

Uit de resultaten van de vergelijking tussen 1D-SOBEK en 2D-FM model van de Oude IJssel blijkt bij een initieel droog systeem een verschil in aankomsttijd van een afvoergolf. Dit lijkt niet aan verschillende weerstandsformuleringen of aan verschillen tussen SOBEK-2 en D-FLOW FM te liggen, maar vooral aan het verschil in volume van de watergangen in het 1D en het 2D model. Voor Ulft blijkt het verschil het duidelijkst voor de IJssel, het verschil voor de Aa-strang is veel kleiner. Het verschil komt doordat bij het inbranden van de watergang in 2D de typische waterloop 4 cellen van 5 m of meer breed is. De Oude IJssel bovenstrooms van Ulft is volgens de 1D cross-sections de minst brede tak en heeft breedtes van 10 tot 15 meter breed. Dit verschil in breedte (en dus in volume) zorgt voor een vertraging in aankomsttijd bij Ulft voor het 2D-FM model ten opzichte van het 1D-SOBEK model. Voor een goede implementatie van het dwarsprofiel van watergangen in 2D is een veel hogere roosterresolutie vereist, maar dat is niet haalbaar door de dan veel langere rekentijden (meer dan een factor 2 in vergelijking met het meenemen van de Oude IJssel in 1D).

Op basis van de te grote rekentijden bij implementatie van de watergangen in het 2D model bij hoge resolutie, en de onnauwkeurige representatie bij grovere resolutie, is besloten om de watergangen als 1D takken in het definitieve model te verwerken.

3.6.3 1D waterlopen binnendijs

Het waterschap heeft een SOBEK 2.13 model van de geselecteerde watergangen aangeleverd. Dit model is eerst in SOBEK 2.13 opgeschoond (optie 'Cleanup 1D/2D Flow Model Data' in het schematisatietaakblok van de SOBEK-2 interface). Vervolgens is het model in SOBEK 3.7.1642543 geïmporteerd en is het aantal korte takken verminderd door knooppunten (connection nodes) te verwijderen. Er is een nieuw rekenrooster gegenereerd met rekenpunten elke 25 meter voor de watergangen binnen dijkkring 48. Het verminderen van het aantal korte takken binnen de schematisatie is noodzakelijk om de rekentijd in SOBEK-3 (en in D-FLOW FM) te verbeteren. Voor de waterlopen binnen de dijkkring is een rekenpuntsafstand van ongeveer 25 meter aangehouden, zodat de koppeling van de rekenpunten aan het 2D rooster (met cellen tussen 10x10 meter en 40x40 meter) een goede ruimtelijke dekking heeft. Bij kunstwerken is vaak een rekenpunt vlak voor en achter het kunstwerk gelegd; op die tak wordt dan de kunstwerkformulering toegepast en deze korte (kunstwerk)tak is niet beperkend voor de rekentijd.



Figuur 3.13 Korte takken (<1 m) tussen 2 rekenpunten bij kunstwerken Bevermeer (links) en Liemers (rechts)

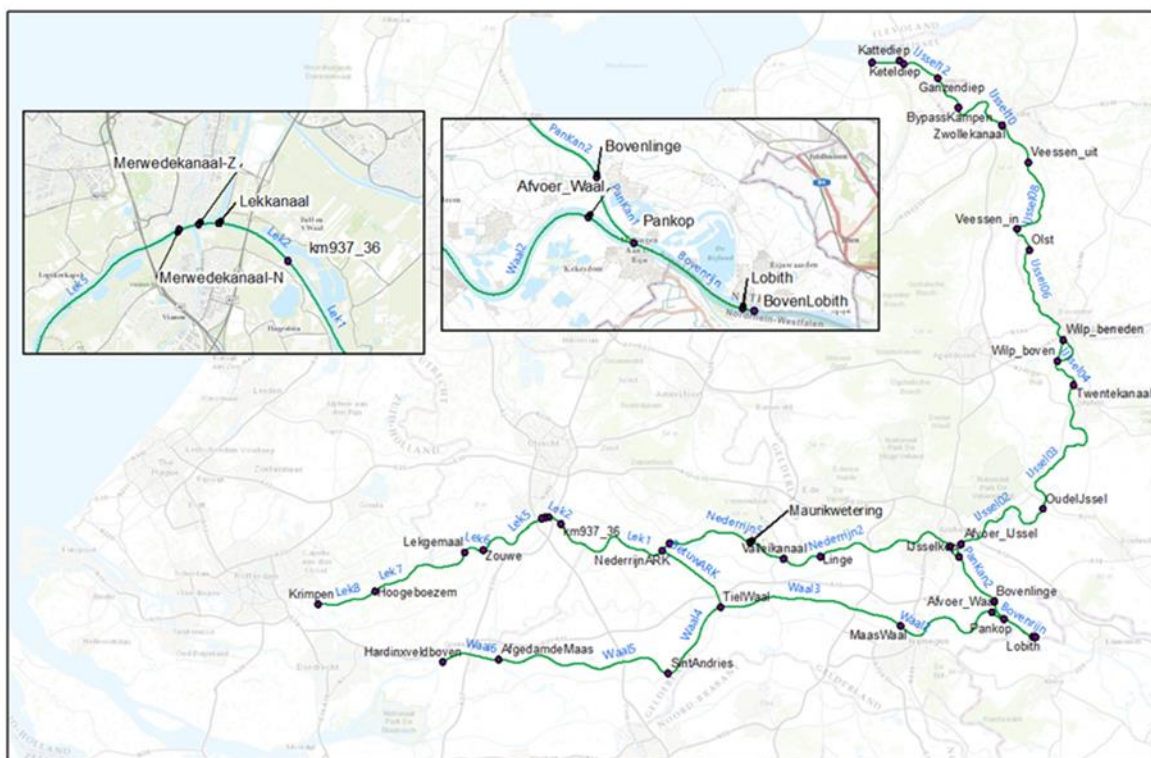
Toch bleek uit eerdere simulaties dat korte takken als gevolg van twee opeenvolgende kunstwerken een groot effect op de rekentijd hebben. Voorbeelden van deze situatie treden op bij een stuw gevolgd door een duiker, zoals bij de uitstroom van de Zwalm (uitstroom De Liemers naar de IJssel), het Broekhuizerwater (uitstroom Bevermeer naar de IJssel) en de Oude Rijn / Rijnstrangen (gemaal Kandia, uitstroom naar het Pannerdens Kanaal). Door de korte takken wordt de rekentijdstep geknepen en wordt de rekentijd van het model langer. De opeenvolgende rekenpunten bij de kunstwerken bij de uitlaten Bevermeer en De Liemers lagen minder dan 1 meter van elkaar (zie Figuur 3.13). Hetzelfde is ook het geval voor de kunstwerken bij het Kandiagemaal. Daarom zijn de stuwen bij deze uitlaten enkele meter bovenstrooms gelegd (zie Tabel 3.2) en enkele rekenpunten verplaatst of verwijderd, om zo te korte afstanden tussen twee rekenpunten (zonder kunstwerk ertussen) te vermijden. Dit is in overleg met het waterschap besloten.

Tabel 3.2 Gegevens over verplaatsing stuwen bij Kandia, de Liemers, Bevermeer

Stuw (id)	Naam	Uitstroom	Originele branch-id	Originele locatie [m]	Nieuwe branch-id	Nieuwe locatie [m]
360	GM10910001_ afsluiter	Kandia- gemaal	LV_3	8.502	LV_542	375.000
LV_ND_106	nodeND_106	De Liemers	LV_2	24.991	LV_2829	158.000
LV_ND_103	nodeND_103	Bever- meer	LV_2884	38.242	LV_2883	54.500

3.6.4 1D Rijntakken

Bij Rijkswaterstaat-dienst helpdesk water is de modelschematisatie ‘Sobek-Rijn-J17_5-v3’ aangevraagd om als schematisatie voor het buitenwater te dienen in dit overstromingsmodel. Deze 1D schematisatie van de Rijntakken is ontwikkeld (gebouwd, gekalibreerd en geverifieerd) door Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat voor watermanagement en operationele toepassing. Het 5^e generatie SOBEK model met Real-Time Control (RTC) bevat de Rijn tussen Lobith, Hardinxveld-boven, Krimpen a/d Lek en het Kattendiep/Keteldiep (zie Figuur 3.14). Baseline is gebruikt als database voor het ontwikkelen van het model ((Berends, 2013) en (Visser, 2018)). Het *gehele* Rijntakken model is overgenomen (dus van Lobith tot Hardinxveld, Krimpen en Keteldiep) en gekoppeld aan het dijkkring 48 model.

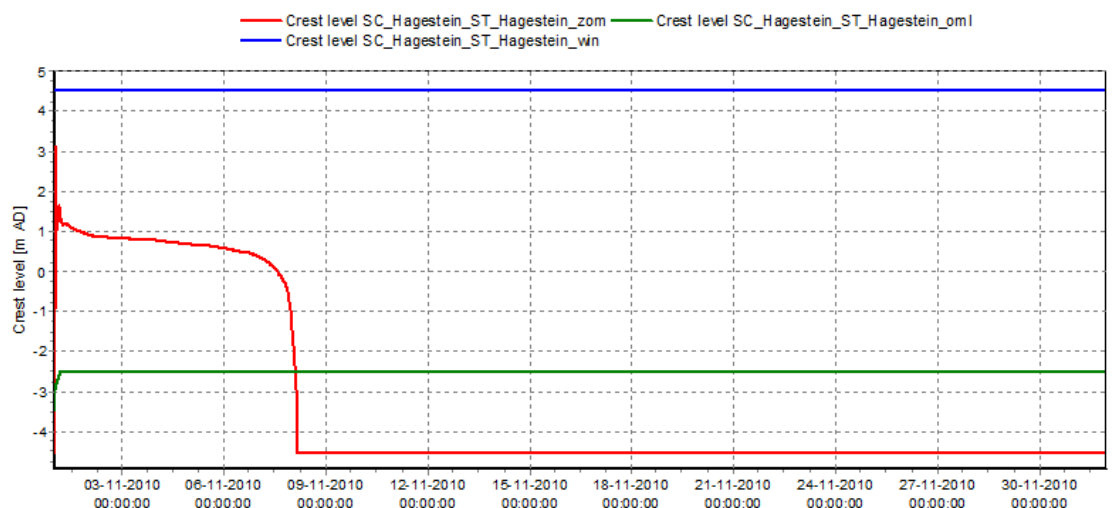


Figuur 3.14 SOBEK-3 Rijntakken model

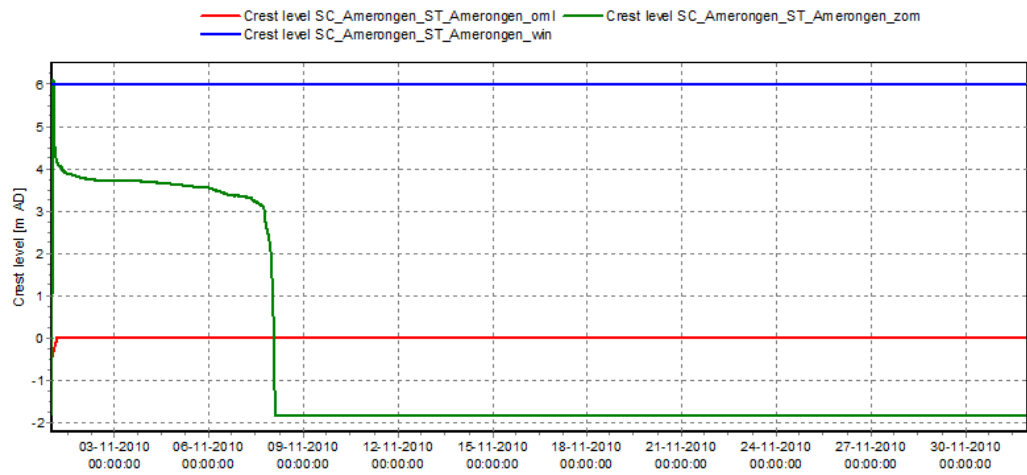
Om het model toe te passen als buitenwater in het overstromingsmodel van dijkkring 48 zijn wel enkele aanpassingen uitgevoerd met SOBEK 3.7.16.42543. Zo is de rekenperiode veranderd naar 1 maand. Daarnaast is de randvoorwaarde bij Lobith, een historische tijdreeks, vervangen door een T=1000 jaar afvoergolf met een piekafvoer 14840 m³/s (Chbab 2016; en Chbab, 2017, blz. 25 tabel 2.7). In datzelfde rapport staat ook de afvoergolfvorm beschreven (figuur 2.16, blz. 32). De benedenstroomse randvoorwaarden in het model waren historische reeksen van de periode november 2010 tot januari 2011. Deze randen zijn daarom aangepast naar de Qh-relaties (tabel 2.5 op blz. 23 van hetzelfde rapport):

- Merk op dat benedenstroomse Q-h relatie bij Ketelbrug (som van Kattendiep en Keteldiep) een aantal keuzes bevat, immers de waterstanden hangen niet alleen af van de afvoer op de IJssel, maar ook van IJsselmeerpeil en eventuele windopzet. Het effect van de door Chbab et al. gedane keuzes voor de berekende waterstanden langs dijkkring 48 (Lobith tot Doesburg) is zeer gering.
- Voor Hardinxveld en Krimpen a/d Lek is door het getij een Q-h relatie lastig, ook hier zijn dus keuzes gemaakt (gemiddeld getij, of juist maximum, minimum?). Voor het huidige project is dat niet kritisch, omdat we nu focussen op de waterstanden langs dijkkring 48, ver bovenstrooms van het getijdengebied.
- Kortom, de toepassing voor dijkkring 48 is nu niet gevoelig voor de keuzes die bij de Q-h relaties in het 1D-Rijntakken model zijn gemaakt. Bij toepassing van het Rijntakken model voor meer benedenstroomse dijkringen moet kritisch worden gekeken welke keuzes voor de benedenstroomse randen passend zijn.

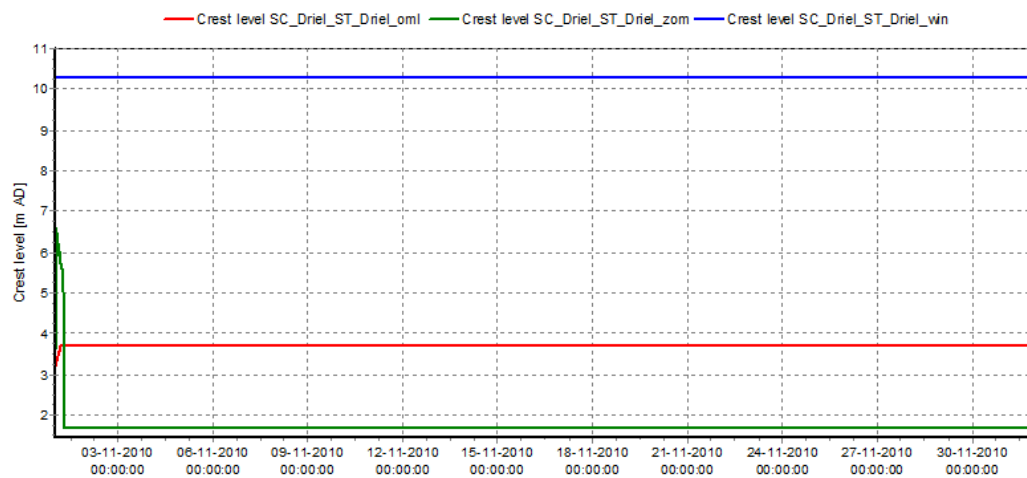
In de modelschematisatie 'Sobek-Rijn-J17_5-v3' worden alle kunstwerken gestuurd met RTC. Aangezien de sturing van kunstwerken met RTC in combinatie met de D-Flow FM kernel in D-Hydro op dat moment nog niet was gevalideerd en bovendien extra rekentijd zou vragen (al is de RTCtools rekentijd op zich ondergeschikt aan de 1D2D rekentijd), is een schematisatie gemaakt waarin de kunstwerksturing met RTC is uitgezet. Dit is mogelijk zonder veel gevolgen, omdat we in de toepassing voor dijkkring 48 focussen op hoge afvoersituaties waarbij de kunstwerken naar verwachting op een vaste stand kunnen worden ingesteld. Met de originele som voor T=1000 jaar afvoergolf bij Lobith is bekeken wat de kunstwerksturing doet. Dit is weergegeven in Figuur 3.15 tot en met Figuur 3.18. Het blijkt dat vanaf een zeker moment de kunstwerken inderdaad met een vaste 'hoogwaterinstelling' gemodelleerd kunnen worden. De kunstwerken zijn op basis van deze resultaten in het te koppelen 1D model daarom ingesteld op waarden zoals aangegeven in Tabel 3.3.



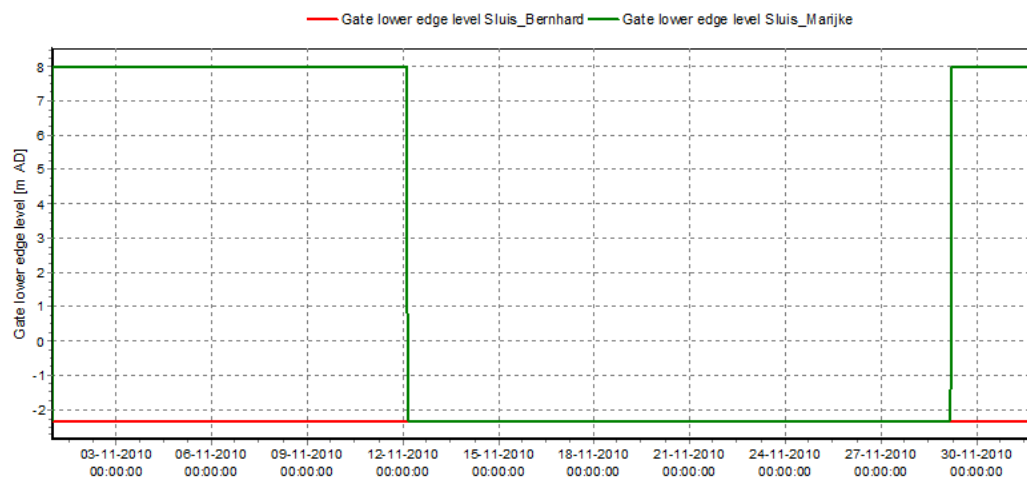
Figuur 3.15 Kruihoogtes van 3 compound elementen bij Hagestein voor de T=1000 jaar afvoergolf bij Lobith.



Figuur 3.16 Kruihoogtes van 3 compound elementen bij Amerongen voor de T=1000 jaar afvoergolf bij Lobith.



Figuur 3.17 Kruihoogtes van 3 compound elementen bij Driel voor de T=1000 jaar afvoergolf bij Lobith.



Figuur 3.18 Gate Lower Edge hoogte bij de Bernhardsluizen en Marijkesluizen, voor T=1000 jaar afvoergolf Lobith

Tabel 3.3 Gekozen constante instellingen van kunstwerken in het te koppelen Rijntakken model

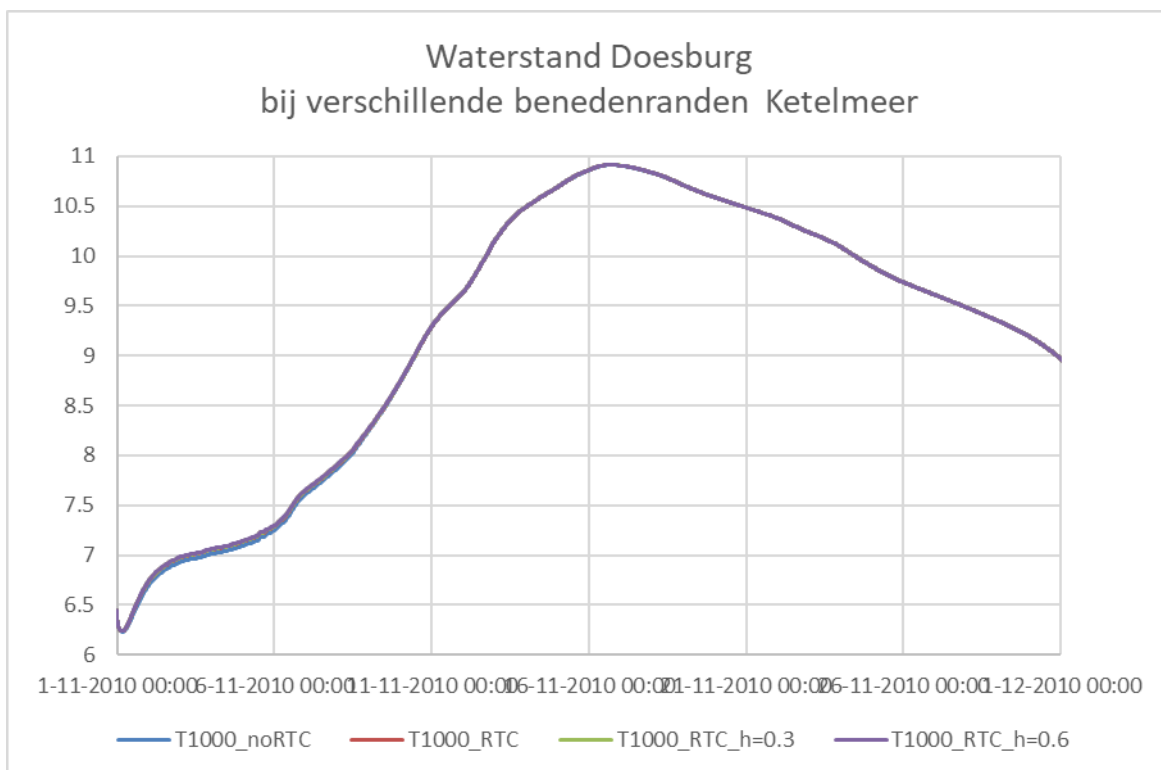
Kunstwerk	Kruinhoogte [m NAP]	Gate Lower Edge [m NAP]
SC_Hagestein_ST_Hagestein_zom	-4.55	
SC_Hagestein_ST_Hagestein_oml (doorlaat)	-2.5	-2.5
SC_Hagestein_ST_Hagestein_win	4.55	
SC_Amerongen_ST_Amerongen_zom	-1.81	
SC_Amerongen_ST_Amerongen_oml (doorlaat)	0	0
SC_Amerongen_ST_Amerongen_win	5.99	
SC_Driel_ST_Driel_zom	1.7	
SC_Driel_ST_Driel_oml (doorlaat)	3.7	3.7
SC_Driel_ST_Driel_win	10.29	
ST_Wilp_boven	7.7	
ST_Wilp_beneden	7.2	
Sluis_Bernhard	-2.35	-2.35
Sluis_Marijke	-2.35	-2.35
Inlaat Veessen-Wapenveld	4.6	
Uitlaat Veessen-Wapenveld	2.6	

De gekozen instellingen komen erop neer dat:

- Van de stuwen Driel, Amerongen en Hagestein zijn de omloopriolen (voor lage afvoeren) gesloten. Strooming vindt uitsluitend plaats via zomer- en winterbed.
- Het ARK Betuwepand is afgesloten (Bernhardsluizen en Marijkesluizen dicht).
- De nevengeul Veessen-Wapenveld staat altijd open, in plaats van pas bij een overschrijding van een waterstand van $h=5.65$ bij het inlaatkunstwerk.
- Kunstwerk de Hondsbroeksche Pleij is in het SOBEEK3 Rijntakken model niet als kunstwerk opgenomen, maar het effect is gemodelleerd door een hogere weerstand op het eerste deel van de IJssel bij hoge afvoeren en een lagere weerstand op de Nederrijn, zodat de gewenste afvoerverdeling met het model wordt gerealiseerd.

Voor het gebied van interesse voor dijkkring 48, dat is van Lobith tot en met Doesburg, zijn voor de doorgerekende periode van 30 dagen (met piekafvoer na 15 dagen) er door de andere kunstwerkinstellingen initieel bij Driel bv. 30 cm verschil in waterstanden, maar na 10 dagen (dus nog 5 dagen voor de piekafvoer) is dit verschil minder dan 0.5 cm. Dit is geverifieerd voor de volgende meetlocaties van het LMW - Landelijk Meetnet Water – die relevant zijn voor dijkkring 48, en die in het model als observation points zijn opgenomen: Lobith, Pannerdense Kop, Looweer, IJsselkop, Driel, De Steeg en Doesburg brug. Verder is voor Doesburg de impact van de modellering van de benedenrand op de IJssel (Keteldiep en Kattendiep, Ketelmeer) getest door in plaats van Qh-relatie een vaste waterstandsrand op te leggen. De impact van de benedenrand op de waterstand bij Doesburg (bij verder identieke invoer en randvoorwaarden) blijkt nihil zoals zichtbaar is in Figuur 3.19.

De berekende piekwaterstand bij Doesburg is wel gevoelig voor de opgelegde afvoergolf bij Lobith: voor een $T=1000$ afvoergolf is de maximale waterstand bij Doesburg 10.91 m NAP, en voor een $T=30000$ jaar wordt de maximale waterstand 11.48 m NAP.



Figuur 3.19 Waterstand bij Doesburg (SOBEK-3) bij verschillende randvoorwaarden Ketelmeer, T=1000 afvoergolf

Als laatste is het rekengrid van het 1D Rijntakken model aangepast. Waar bij het originele SOBEK-3 model de rekenpunten circa 500 meter uit elkaar lagen, liggen de rekenpunten in het aangepaste Rijntakkenmodel 50 meter uit elkaar voor de takken grenzend aan dijkkring 48, en 100 tot 200 meter voor de andere takken in het model. Dit is gedaan om goed aan te sluiten bij het 2D rekengrid van dijkkring 48 en een goede 1D2D koppeling te kunnen maken tussen de rand van het curvilineaire 2Dgrid en het 1D Rijntakken model. Op zich geeft een dergelijke gridverfijning ook weer verschillen in resultaten en zou de kalibratie gecontroleerd moeten worden, maar dat valt buiten de scope van dit project. Wel is geverifieerd dat het originele SOBEK-3 1D Rijntakkenmodel en het D-HYDRO 1D model met verfijnd rekenrooster niet al te grote verschillen in resultaten geven (zie paragraaf 3.6.7).

3.6.5 Koppelen van de 1D modellen

Om de stroming tussen de watergangen en het buitenwater goed te kunnen simuleren, is het noodzakelijk om het 1D model van de watergangen binnen dijkkring 48 (zie paragraaf 3.6.3) en het 1D Rijntakken model (paragraaf 3.6.4) samen te voegen tot één model, waarbij de binnendijkse watergangen zijn gekoppeld aan het Rijntakkenmodel bij de uitlaten van dijkkring 48. Bij deze uitlaten zijn in het originele SOBEK 2.13 model waterstandsranden opgelegd (zie Tabel 3.4). Deze waterstandsranden zijn verwijderd bij de koppeling van de twee modellen. Alleen de waterstandsrand van 11 meter NAP opgelegd bij gemaal Emmerich is gehandhaafd in het model, want het aangekoppelde 1D Rijntakken model begint pas verder benedenstrooms bij Lobith.

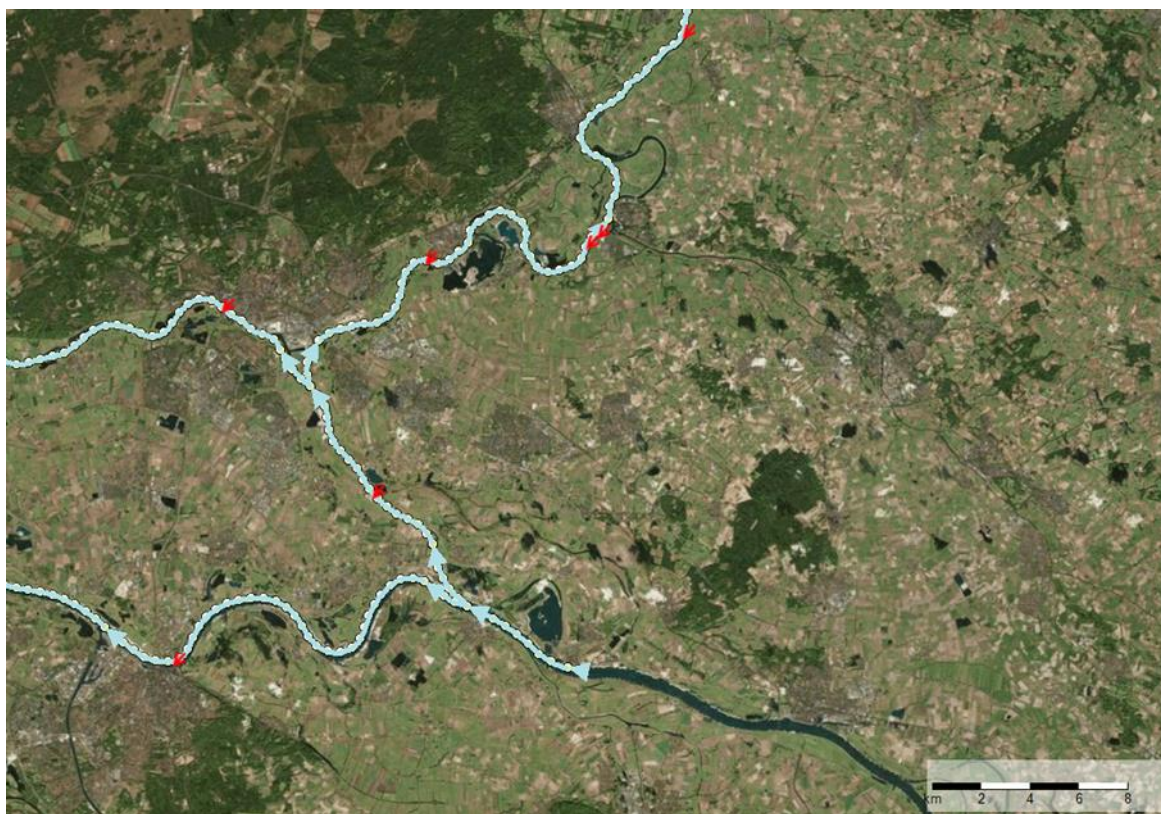
Tabel 3.4 Waterstandranden in het originele WRIJ SOBEK-2 model van watergangen binnen dijkkring 48

Randvoorwaarde id	Uitstroompunt	Opgelegde waterstand [m NAP]
1668	Oude IJssel	6.44
LV_ND_107	Gemaal Kandia	7.00
LV_1219	Gemaal De Liemers	6.00
LV_1249	Bevermeerpand	5.00

In de 'Sobek-Rijn-J17_5-v3' modelschematisatie van de Rijntakken zitten 28 laterale debiet locaties. Deze lateralen zijn historische debieten of via regressie op de historische Rijnafvoer afgeleide laterale debieten. Voor het koppelen van het Rijntakken model met binnendijkse watergangen zijn de laterale debiet locaties die corresponderen met debieten afkomstig uit dijkkring 48 verwijderd. Ze zijn vervangen door een verbinding met de watergangen binnen dijkkring 48. Dit geldt voor 3 van de 4 lateralen, die van zuid naar noordoost, langs het Pannerdens kanaal en de IJssel liggen. (zie Figuur 3.20).

- Lateraal 'PANKAN' (instroom vanuit Oude Rijn bij gemaal Kandia);
- Lateraal 'YSSEL1';
- Lateraal 'YSSEL2' (instroom bij De Liemers en Bevermeer); en
- Lateraal 'OUDEYS' (instroom vanuit Oude IJssel bij Doesburg).

De lateraal locatie YSSEL1 representeert de instroom van Rozendaalsche en Beekhuizerbeek. Deze beken voeren af vanuit de Veluwezoom en niet vanuit dijkkring 48.



Figuur 3.20 SOBEK Rijntakken schematisatie met laterale debietlocaties

Het samenvoegen van de twee SOBEK modellen tot één is met de 'merge' functionaliteit in SOBEK 3.7.16.42543 uitgevoerd. Voor het verbinden van de WRIJ schematisatie met de 1D-Rijntakken schematisatie zijn de takken op de locaties van de uitlaten verlengd tot aan het 1D-Rijntakken model (de takken in het WRIJ model stopten voor het bereiken van het laagste punt van de rivierbedding op Pannerdens Kanaal en de IJssel). Voor de verbindingen tussen de uitlaten van de binnendijkse watergangen en het Rijntakken model zijn zoveel mogelijk de bestaande laterale debiet locaties in het Rijntakken model gehanteerd. Echter, omdat in het originele Rijntakken model slechts één lateraal debiet locatie voor Bevermeer en de Liemers is opgenomen, is een extra locatie toegevoegd om gemaal de Liemers op de juiste locatie te kunnen koppelen.

Verder bleken de laterale debiet locaties van Bevermeer en de Oude IJssel in het 1D-Rijntakken model niet helemaal correct te liggen. De verbindingen zijn daarom iets meer naar benedenstreams op de IJssel verplaatst in overleg met het waterschap (zie Figuur 3.21).



Figuur 3.21 SOBEK Rijntakken model met lateralen IJSSEL2 en OUDEIJS (links), en gekoppeld model (rechts)

3.6.6 Conversie naar D-HYDRO D-FLOW 1D

In de paragrafen hiervoor is beschreven hoe de 1D-modellen gereed zijn gemaakt en gekoppeld aan elkaar in SOBEK-3. Om dit 1D model te kunnen koppelen aan het 2D rekenrooster is het noodzakelijk om het gekoppelde 1D-model met alle binnendijkse watergangen en de Rijntakken te converteren naar D-HYDRO formaat (D-Flow FM 1D format). Dit is uitgevoerd met behulp van de Python conversietool 'convert_to_dflowfm'. Deze tool is ontwikkeld voor het converteren van SOBEK-3 modellen naar D-Flow FM in het RHU-project van D-Hydro software. De tool is beschikbaar via de Open Earth Tools website van Deltares.

(https://svn.oss.deltares.nl/repos/openearthtools/trunk/python/applications/delft3dfm/convert_to_dflowfm/)

Aangezien het project voor dijkkring 48 gelijk opliep met het RHU-project waarin de 1D functionaliteit in D-HYDRO verder is ontwikkeld, is ervoor gekozen om de laatste software ontwikkelingen in het model te implementeren. Daarom zijn na conversie van het SOBEK-3 model naar het D-HYDRO formaat nog enkele kleine tekstuele aanpassingen van de bestanden nodig gebleken, omdat de nieuwe bestandsdefinitie nog op enkele punten is aangepast en dat nog verwerkt is in de conversietool. Naar verwachting komt in de nieuwe D-HYDRO GUI een importer voor SOBEK-2 en SOBEK-3 modellen, o.a. op basis van de nu beschikbare conversietools.

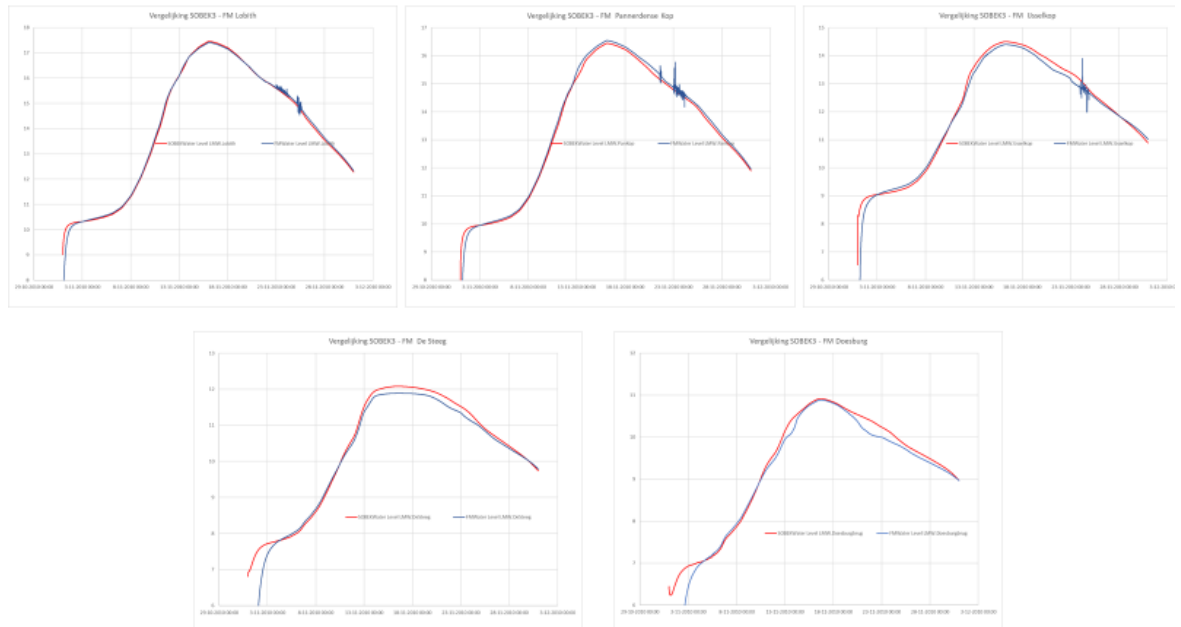
3.6.7 Validatie van 1D modellen

De nieuw ontwikkelde 1D functionaliteiten in de D-Flow FM rekenkern zijn gevalideerd aan de hand van diverse testen en acceptatiemodellen. Deze testen en modellen zijn gevalideerd en draaien dagelijks mee in de testbank om nieuwe ontwikkelingen in de software dagelijks te kunnen testen. De bijbehorende validatiedocumenten worden meegeleverd met de release van de D-HYDRO software.

Daarnaast zijn de resultaten voor het Rijntakken model uit SOBEK-3 en met D-HYDRO vergeleken. Dit is gedaan voor het SOBEK-3 Rijntakken model waarin de kunstwerken zijn opengezet (geen sturing) en de T=1000 jaar afvoergolf. In het D-HYDRO FM model is diezelfde afvoergolf doorerekend. Echter, het rekengrid in D-HYDRO is wel aangepast. Dit is gedaan om het model gereed te maken voor de koppeling met de watergangen van Rijn en IJssel.

Hiertoe zijn sommige takken gesplitst en is de afstand van rekenpunten aangepast aan de behoeften van het uiteindelijk gekoppelde 1D2D model. Dus er zijn zowel verschillen ontstaan door verschillen in het rekenhart (ander rekenschema), maar ook door verschillen in initiële conditie en rekenroosters. Naast verschillen in rekencode en schematisatie is nog belangrijk dat in het SOBEK3 model zogenaamde 'extra resistances' zijn opgenomen, terwijl FM deze typische RWS-rivierfunctionaliteit (nog) niet heeft. Deze extra weerstanden zijn in het SOBEK3 model opgenomen bij de Oosterbeekbrug (Nederrijn), Deventer, Doesburgbrug en hebben dus vooral een effect op de IJssel. Tenslotte is in D-HYDRO functionaliteit met betrekking tot rivierprofielen en weerstanden afhankelijk van debiet en locatie op de tak wel beschikbaar, maar als typische rivierfunctionaliteit minder getest en heeft formeel nog beta-status.

De verschillen in de maximale waterstand zijn beperkt, typisch 5 a 10 cm (zie Figuur 3.22) en zijn het grootst bij De Steeg op de IJssel, bijna 20 cm. De extra weerstanden die in het D-HYDRO model nog niet kunnen worden meegenomen hebben hier ongetwijfeld mee te maken. Hiervoor corrigeren zou een herkalibratie vereisen. In het kader van het D-HYDRO ontwikkeltraject worden de verschillen tussen SOBEK3 en D-HYDRO nog nader uitgezocht, door de sommen voor zo identiek mogelijke model-schematisaties te vergelijken. Uit de resultaten van het huidige D-HYDRO 1D model blijkt het maximum peil voor alle locaties behalve voor Pannerdense Kop iets lager dan in SOBEK-3 (Tabel 3.5). Verder blijkt er enkele dagen na de piekafvoer een instabiliteit op te treden. Dit wordt nader geanalyseerd; het is op zich op te lossen door een strenger Courant criterium te hanteren, maar dat gaat ten koste van de rekentijd. Daarom wordt ook versnelling van de rekencode geanalyseerd (zie ook paragraaf 4.5). De instabiliteit is zichtbaar op het traject Lobith – IJsselkop. Op de IJssel is die instabiliteit niet meer zichtbaar.



Figuur 3.22 Resultaten SOBEK-3 Rijntakken model (in rood) en 1D FM model (in blauw)

Tabel 3.5 Vergelijking maximale waterstanden SOBEK-3 en FM 1D Rijntakken

Locatie	Max. peil in SOBEK-3 [m NAP]	Max. peil in FM [m NAP]	Vershil [m NAP]
LMW Lobith	17.46	17.41	0.05
LMW Pannerdense Kop	16.44	16.54	-0.10
Looveer	14.77	14.67	0.10
LMW IJsselkop	14.50	14.40	0.10
LMW De Steeg	12.08	11.89	0.19
LMW Doesburgbrug	10.91	10.88	0.03

3.7 2D rekengrid

Voor het gebied van dijkkring 48 zijn tot op heden meerdere modellen met verschillende rekenroosters gemaakt. In het GRADE-project is een 2D-rooster met driehoekige cellen met zijden van 200 meter gebruikt (groeiend tot 500 m langs de bandijk in Nederland). Hiermee zijn overstromingen gemodelleerd vanuit de Bovenrijn, bovenstrooms van Lobith, via dijkkring 48 naar de IJssel. Het belangrijkste doel van het GRADE-project is om de afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith te bepalen (Hegnauer et.al, 2014 en Hegnauer, 2018), rekening houdend met overstromingen bovenstrooms van Lobith; daarom zijn de cellen in het 2D-rekenrooster relatief groot. In een verder verleden zijn overstromingssimulaties voor dijkkring 48 gemaakt met Delft-FLS. Deze zijn gemaakt met een rooster van 100 bij 100 meter (uitsluitend vierkante cellen). Met D-Flow FM is een ongestructureerd rekenrooster mogelijk. Hierdoor kan het rekenrooster ter plekke van inhomogene gebieden worden verfijnd, kan er in het modelgebied met diverse lokaal verschillende resoluties worden gerekend en kan gemakkelijk worden gecombineerd met een eventueel curvilineair rekenrooster. Een curvilineair rooster wordt typisch gebruikt voor 2D modellering van rivieren, zodat de langste kant van de cellen overeenkomt met de dominante stromingsrichting (zie bijvoorbeeld ook de pilot Bommelerwaard in het eerste TKI D-HYDRO project, waarbij een 2D curvilineair rooster van het 6^e generatie Maasmodel is gekoppeld aan een 2D model van de Bommelerwaard).

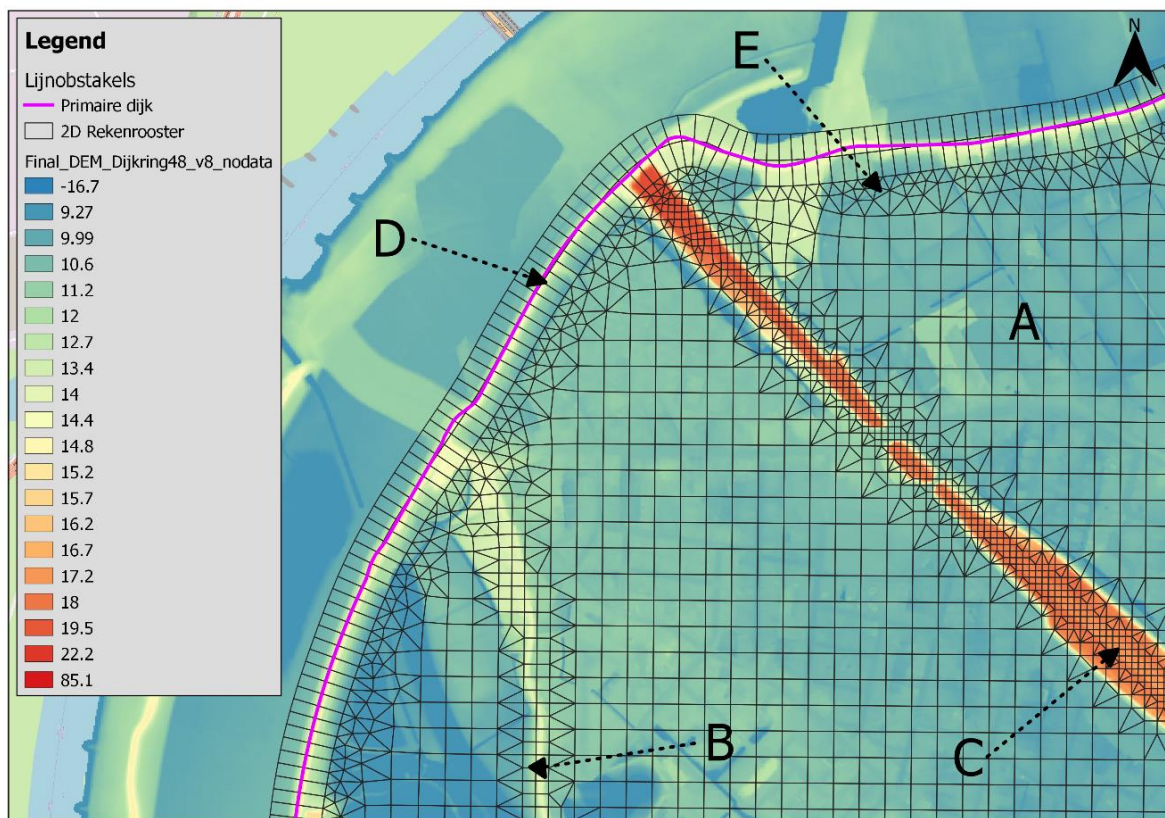
Het type rekenrooster en celgrootte hangen af van de eisen die gesteld worden aan het model en aan het gebruikte softwarepakket. Omdat de D-FlowFM software is toegepast in dit project, was het mogelijk om een flexibel rekenrooster te maken. Dit flexibele rekenrooster inclusief de 1D delen moet voldoen aan de volgende eisen gesteld voor de rekentijd van het model:

- De scenarioberekening van een overstromingskaart voor een scenario is binnen één nacht (ca. 8-10 uur) rekenen klaar; en
- Het model voor calamiteitentoeepassing heeft een rekentijd van orde één uur voor twee gesimuleerde dagen.

Wanneer te kleine cellen in het model worden gebruikt, neemt de rekentijd significant toe en worden de bovengenoemde eisen niet gehaald. Grote debieten en stroomsnelheden op korte links tussen kleine cellen zorgen ervoor dat de tijdstappen worden verkleind wanneer het Courant criterium wordt overschreden (zie paragraaf 3.9.4). In eerdere stadia van het project bleek dat celgrootte van 5 bij 5 meter bij de watergangen van WRIJ (toen nog in 2D gemodelleerd) een te lange rekentijd van orde 5 dagen opleverden voor een simulatieperiode van 10 dagen met een dijkdoorbraak in Duitsland. Hoewel in dat model nog belangrijke elementen ontbraken (zoals enkele hoogteobstakels, (laterale) instroom bij watergangen, 1D Rijntakken) en het uiteindelijke hoogtemodel nog is aangepast, heeft dit er toe geleid dat de geselecteerde watergangen binnen dijkkring 48 in 1D zijn gemodelleerd (zie paragraaf 3.6.2) en dat in het 2D model een minimum celgrootte van 10 bij 10 meter is toegepast.

Het uiteindelijke rekenrooster bestaat grotendeels uit een cartesisch rekenrooster met cellen van 40x40 meter, zie Figuur 3.23 (A). Dit rekenrooster is verfijnd bij kerende wegen tot 20x20 meter (B) en spoorwegen tot 10x10 meter (C) om ervoor te zorgen dat de hoogteverschillen ter plekke van deze infrastructuur goed in het model zitten. Verder is rondom de primaire dijk een curvilineair rekenrooster van 2 cellen gebouwd (D). Het dijkelement ligt te midden van deze cellen. De binnenste korte zijdes (circa 20 meter) van de twee cellen vallen samen met het verhoogde dijkelement waar de dijkdoorbraken op worden gemodelleerd. De lange zijdes (circa 40 meter) van het curvilineaire rooster staan loodrecht op de dijk. Er is gekozen voor een curvilineair rekenrooster bij de dijk om zo goed mogelijk de ligging van de dijk te kunnen volgen. De buitenste cel van het curvilineair grid ligt in het buitendijks gebied om zo de Verheij – van der Knaap bresgroeiformulering tussen 2D rekenpunten mogelijk te maken. Tussen het curvilineaire en cartesische rooster zijn driehoekige cellen voor de overgang toegepast.

In appendix A zijn de stappen beschreven voor het maken van eenzelfde soort rekenrooster. Het creëren van een goed 2D rooster is een iteratief proces waarin het doel en de eisen van het model moeten worden behaald. Aangezien er momenteel aan de GUI van D-HYDRO wordt gewerkt, zijn de exacte stappen van het genereren van zo'n 2D rooster in de GUI niet in detail uitgewerkt. Juist omdat vooraf voorzien werd dat enkele stappen in het proces van de modelbouw nog herhaald zouden moeten worden, is waar mogelijk met scripts (reproduceerbaar, herhaalbaar) gewerkt. De verwachting is dat de detail stappen in de GUI in de loop van 2020 beschikbaar komen. Het raadplegen van de gebruikshandleidingen meegeleverd met de software wordt daarom aanbevolen.



Figuur 3.23 Het 2D rekenrooster toegepast in het model voor dijkkring 48. Door A is het Cartesische rekenrooster van 40 bij 40 meter aangegeven. Punten B en C geven respectievelijk de verfijningen aan bij kerende wegen en spoorwegen. Punt D wijst naar het curvilinear grid loodrecht op de primaire dijk. E is de overgang tussen curvilineair en cartesisch grid met behulp van driehoeken.

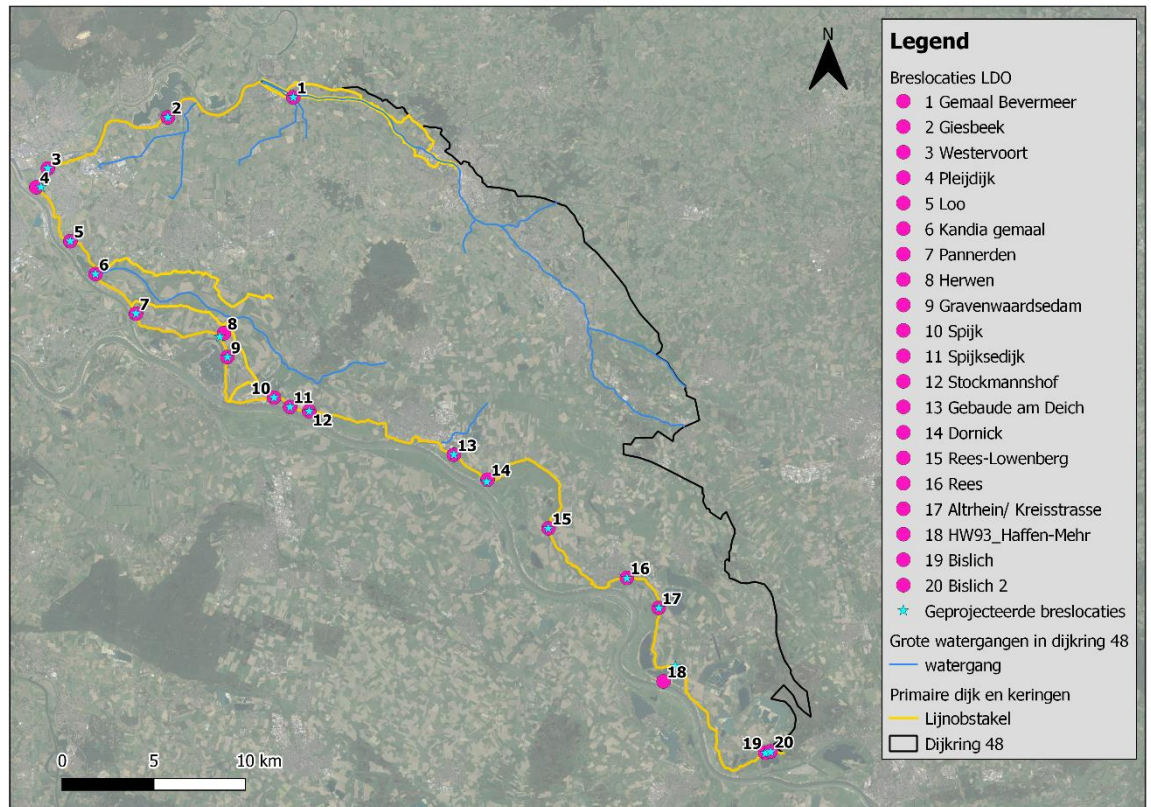
3.8 Bres

De breslocatie en manier van bresgroei, het moment van breken en de waterstand van het buitenwater zijn maatgevend voor de hoeveelheid water die een dijkkring binnen kan stromen bij een dijkdoorbraak. De locatie van de bres bepaalt waar de bres begint en deels ook welke delen van de dijkkring zullen overstromen. Uit eerdere simulaties en geografie van het gebied is duidelijk dat bij een bres bij Bislich zowel het Duitse en Nederlandse gebied van dijkkring 48 overstromen, terwijl een dijkdoorbraak bij Loo vooral overstromingen in het Nederlandse deel veroorzaakt. Kortom, de breslocatie is een belangrijk element voor het overstromingsverloop en bresgroei.

In dit pilotproject zijn sommen gemaakt voor de breslocaties Bislich (2D, met opgedrukt bresdebiet), en met de dijkdoorbraakformulering voor locaties Herwen en Loo. Herwen is speciaal geselecteerd, omdat deze breslocatie in eerdere simulaties voor LDO een overstromingsverloop rondom het Montferland gaf. De genoemde locaties zijn gekozen uit de breslocaties (zie Figuur 3.24) die in simulaties voor LDO zijn toegepast. Uiteindelijk zullen er simulaties voor al deze breslocaties worden uitgevoerd door het waterschap. Aangezien niet alle breslocaties binnen 40 meter van de dijk liggen (bijvoorbeeld breslocaties 4,8 en 18), zijn de breslocaties geprojecteerd op het lijnelement van de primaire dijk.

In het Leidraad overstromingssimulaties (de Bruijn et. al, 2018) wordt geadviseerd om het Verheij - van der Knaap algoritme toe te passen. Deze formule gebruikt een relatie tussen het waterstandsverschil tussen buitenwater en binnendijkse gebied en de bresgroei. Daarom is de Verheij - van der Knaap formulering in de toegepast.

Hiertoe is het 1D Rijntakken model eerst gekoppeld aan een curvilineair rooster van 2 cellen breed om de primaire dijk heen, zodat de doorbraak- en bresgroeiformulering op de als 'fixed weir' geschematiseerde primaire kering tussen twee 2D-cellen gebruikt kan worden.



Figuur 3.24 Breslocaties voor LDO modelberekeningen

Een bresgroeï met de Verheij – van der Knaap formulering bestaat uit 2 fases. In de eerste fase wordt de dijk verlaagd van de initiële dijkhoogte naar de minimale dijkhoogte (=bodemniveau achterland) over een opgegeven initiële bresbreedte. In de tweede fase groeit de bres in de breedte op basis van het verschil in waterstand tussen bovenstrooms en benedenstrooms van de bres en een kritische stroomsnelheid afhankelijk van het materiaal van de dijk. Wanneer de stroomsnelheid niet groter is dan de kritische stroomsnelheid, zal de bresbreedte niet meer toenemen en stagneert de bresgroeï.

Bij de toepassing van de Verheij – van der Knaap formulering worden aannames gemaakt. Een eerste aanname (door de gebruiker op te geven) is het moment van breken. Voor de simulaties is typisch verondersteld dat de dijkdoorbraak begint op het moment van de piekafvoer bij Lobith. Het optreden van een dijkdoorbraak nog voordat de afvoergolf zijn piek heeft bereikt, veroorzaakt mogelijk ernstiger overstromingen. Dit effect zal later door het waterschap moeten worden onderzocht.

Andere aannames voor de bresgroeï zijn:

- Het duurt 10 minuten voordat de bres met een constante breedte is gedaald naar de minimale dijkhoogte (fase 1 van de Verheij - van der Knaap formulering; bezwijken van de dijk met initiële bresbreedte).
- De kritische stroomsnelheid is 0.2 m/s en 0.5 m/s voor respectievelijk een zanddijk en kleidijk. De zogenaamde factor 1 in de Verheij – van der Knaap formulering is 1.2 en 1.3 voor zanddijk en kleidijk. De default waarden zijn aangehouden.

- Bij alle sommen met een $T=1000$ jaar afvoergolf is uitgegaan van een zanddijk behalve voor som 3. In deze som zijn de aannames voor een kleidijk toegepast.
- De maximale dijkhoogte is gelijk aan de hoogte gevonden voor de dijk (fixed weir element) in de cel waar de geprojecteerde breslocatie ligt.
- De minimale dijkhoogte is gelijk aan het maaiveld van het achterland (hoogte in de achterliggende cel bij breslocatie). Behalve voor som 4, daar wordt de minimale dijkhoogte 1 meter boven dat maaiveld genomen.
- De initiële bresbreedte toegepast in de eerste fase van de Verheij – van der Knaap formule is 20 meter.
- De bres kan groeien over een lijnelement (met extensie “.pli”) gecreëerd voor de breslocaties. De maximale breedte van de bres is dus de lengte van het lijnelement, dus deze is in de testen ruim gekozen om niet beperkend te zijn. De bres kan over meerdere gridcellen groeien.
- De gebruikte waterstandspunten zijn default het waterstandspunt in de cellen voor en na de bres. De Verheij - van der Knaap formulering is ruim 15 jaar geleden afgeleid en daarbij zijn de waterstanden op enige afstand van de bres gebruikt. Daarom is er de optie in D_HYDRO om de waterstand van rekenpunten op enige afstand van de breslocatie te gebruiken. Dit levert over het algemeen een groter verval, en dus een groter bresdebiet en grotere bresgroei op. Echter, in het huidige 1D2D model is aan de rivierkant geen keus, omdat daar slechts 1 2D cel beschikbaar is (want het 2D model van de rivier is nog niet beschikbaar). Voor de dijkkring kant zou een rekenpunt verder weg wel mogelijk zijn geweest, maar dat is nu niet gebruikt. Verder zal in de nabije toekomst ook de 1D2D levee breach worden geïmplementeerd (met bresgroei-formulering), maar dan dus tussen een 1D waterstandspunt en een 2D-gridcel. Dit geeft meer flexibiliteit bij de modellering.

Kortom, er zijn veel variabelen voor de bres. In deze pilotstudie wordt er gekeken naar de gevoeligheid van minimale dijkhoogte, breslocatie en type grondsoort van de dijk. Er wordt geadviseerd om later ook de gevoeligheid van de initiële bresbreedte, het moment van breken, de gebruikte referentie waterstandspunten, en de duur van de eerste fase in de Verheij – van der Knaap formulering nader te onderzoeken.

De stappen voor het vaststellen van de kenmerken van de bres zijn beschreven in Appendix A. In hoofdstuk 4.3 worden de gekozen parameters voor de gemaakte dijkdoorbraak scenario-sommen toegelicht.

3.9 Modelbouw

3.9.1 Inleiding

In deze en de volgende paragrafen wordt toegelicht hoe het model is opgebouwd, op basis van de hiervoor beschreven elementen. Achtereenvolgens wordt ingegaan op:

- Paragraaf 3.9.2 gaat in op het 1D gedeelte inclusief alle elementen (bestanden), inclusief randvoorwaarden en laterale debieten, kunstwerken en uitlaten.
- Paragraaf 3.9.3 gaat in op het 2D modelgedeelte met alle inputlagen, lijnobjekten en dijkdoorbraken.
- Paragraaf 3.9.3 geeft ook informatie over de koppeling van de 1D en 2D delen inclusief het genereren van 1D2D links.
- Paragraaf 3.9.4 behandelt de overige modelparameters die relevant zijn voor het overstromingsverloop .

In Appendix A zijn in detail en puntsgewijs de stappen beschreven om een werkend gekoppeld 1D2D overstromingsmodel te krijgen.

1D

Het gekoppelde 1D model van de binnendijkse waterlopen en de Rijntakken bevat de elementen zoals omschreven in Tabel 3.6. Al deze elementen zijn meegenomen in het uiteindelijke 1D2D model. Het 1D netwerk ontbreekt in de tabel, omdat deze gekoppeld is met het 2D rekengrid in één bestand dat het netwerk beschrijft.

Tabel 3.6 Verschillende 1D elementen die in het 1D2D model zijn verwerkt

Element	Bestand	Beschrijving	Aantal
Cross-Sectionies	CrossSectionLocations.ini	Locaties van de profielen in netwerk	1314 cross-sectie locaties
Cross-Sectionies	CrossSectionDefinitions.ini	Definities van de profielen	1202 cross-sectie definities
Ruwheden	Roughness-Section000.ini, Roughness-Main.ini, Roughness-FloodPlain1.ini, Roughness-FloodPlain2.ini	Ruwheidswaardes en -types toegepast voor specifieke locaties in netwerk	284 ruwheidsdefinities
Randvoorwaarden/ laterale debieten	ExternalForcing.ext	Locatie, type forcering en verwijzing naar het bestand met de waardes/tijdreeksen van de randvoorwaardes en laterale debieten	11 Randvoorwaardes en 34 laterale debieten
Randvoorwaardes/ laterale debieten	BoundaryConditions.bc	Conditie: constante waarde, tijdreeks of QH-relatie	45 relevante condities
Kunstwerken	Structure1D.ini	Locatie, type en specificaties kunstwerken	78 kunstwerken (exclusief dijkdoorbraak)
Reservoirs	StorageNodes.ini	Locatie, type en specificaties reservoirs	6 reservoirs
Observatiepunten (waterstanden)	ObservationPoints.ini	Locatie observatiepunt	478 observatiepunten
Observatie cross-secties (debieten)	ObservationPoints_crs.ini	Locatie observatie cross-secties	478 observatiecross-secties.

Kenmerken van het 1D gedeelte zijn:

- In totaal zijn 1314 cross-secties toegepast in het 1D model, waarvoor er 1202 verschillende profiel definities zijn gegeven (inclusief profielen toegepast in duikers). Deze definities bevatten de volgende profiel types: zw, zwrivier, yz, rectangle en circle.
- Voor de ruwheid van het 1D gedeelte is voornamelijk de Manning formulering toegepast. In het 1D Rijntakken model is voor de uiterwaarden meestal een Chézy formulering voor de ruwheid gebruikt. De waterlopen binnendijks hebben vooral Strickler als ruwheidstype.
- De 6 reservoirs (storage nodes of retentions) horen bij laterale instroompunten van de waterlopen binnen dijkkring 48.
- De 2D bresinformatie is toegevoegd bovenin het bestand met 1D kunstwerken. Omdat de bres een 2D functionaliteit is, hoort deze eigenlijk in een apart bestand te zitten. Dit is nu helaas nog niet het geval in de D-Flow FM rekenkern.
- Voor het maken van de definitieve sommen zijn de duikers (lozingspunten onder vrij verval bij Bevermeer, gemaal Liemers, Kandia) vervangen door general structures met vergelijkbare karakteristieken omdat de general structures – in de gebruikte FM modelversie – stabiel zijn op het moment dat slechts stroming in één richting mogelijk is. Het issue van stabiliteit bij één toegestane stromingsrichting voor duikers is gemeld en zal in toekomstige FM versies worden opgelost.

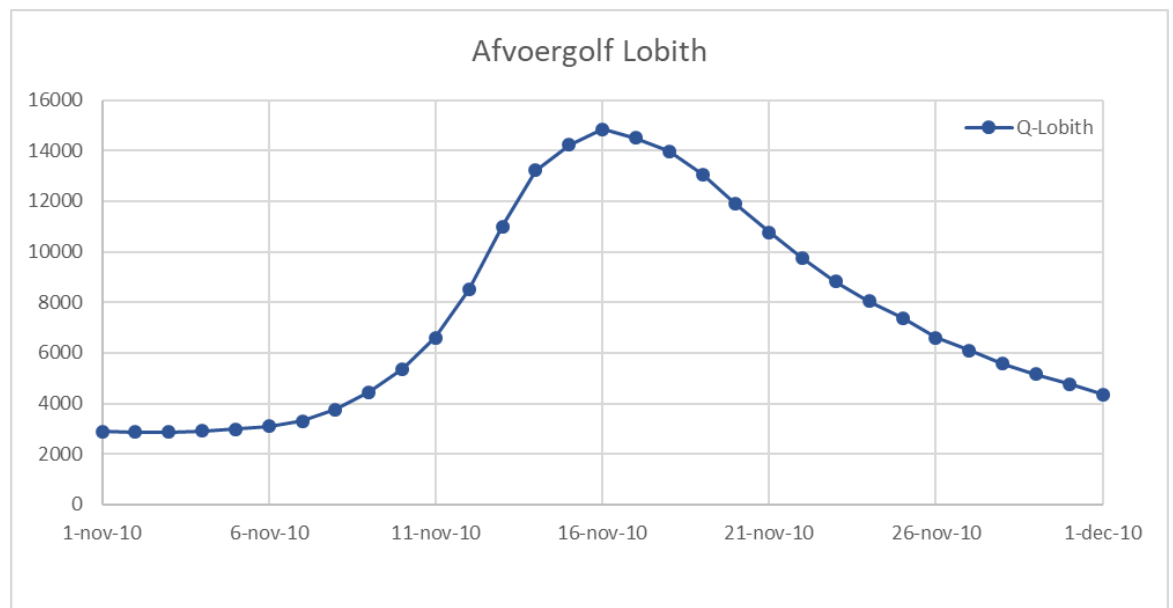
3.9.2.1 Randvoorwaarden en laterale debieten

Voor de waterlopen binnen dijkkring 48 zijn constante instroomdebieten opgelegd bij de randen van de IJssel, Aa-strang, Bielheimerbeek en Waalse water (zie Tabel 3.7). Alle andere waterlopen hebben geen (laterale) instroomdebieten, omdat de instroomdebieten bij deze waterlopen leiden tot een stijging in de waterstand bij de uitlaten naar de Rijntakken (want voor de gemalen bij deze punten wordt in de overstromingsberekeningen verondersteld dat ze uitvallen bij overstromingen). Om toch deze watergangen niet leeg te laten beginnen, is er een initiële waterlaag in de vorm van een restartfile gecreëerd door middel van een extra simulatie van het 1D2D model. In deze simulatie is het instroomdebiet bij Lobith op 3000 m³/s gezet en zijn alle (laterale) debieten uit het SOBEK 2.13 model overgenomen.

Tabel 3.7 Randvoorwaarden voor de 1D elementen in dijkkring 48

Randvoorwaarde bij instroom van	Randvoorwaarde id	Constant instroomdebiet [m ³ /s]
IJssel	Isstel_instroom	2
Aa-strang	boundary_BocholterAa	5
Bielheimerbeek	sto_AE54710009	2
Waalse water	752	0.25

Bij Lobith is een T=1000 jaar afvoergolf volgens WBI opgelegd. Dit is een afvoergolf van 30 dagen met een piekafvoer van 14840 m³/s na 15 dagen. Zie Figuur 3.25 en de literatuur (o.a. Chbab, 2017). De gehanteerde Q-h relaties voor de benedenstroomse randen van het 1D Rijntakken model zijn gegeven in Tabel 3.8. Niet alle lateralen van het originele Rijntakken model bevatten een tijdreeks in het 1D2D model. Alleen van lateralen van de Waal, Neder-Rijn, Linge, Lek, Schipbeek, IJssel, en Twentekanaal zijn de tijdreeksen in het model overgenomen uit het originele Rijntakken model. De locaties van de andere lateralen zijn wel opgenomen in het model, maar hebben debiet nul.



Figuur 3.25 Afvoergolf Lobith (T=1000 jaar)

Tabel 3.8 Qh relaties voor de benedenstroomse randen van het Rijntakken model

Hardinxveld-Boven		Krimpen		Keteldiep		Kattendiep	
Q [m ³ /s]	h[m]	Q [m ³ /s]	h[m]	Q [m ³ /s]	h [m]	Q [m ³ /s]	h [m]
550	- 1.03	25	- 1.227	25	- 0.02	25	- 0.02
1401	- 1.33	309	- 1.387	200	- 0.067	200	- 0.067
2697	- 1.768	753	- 1.556	400	- 0.171	400	- 0.171
3997	- 2.276	1163	- 1.75	700	- 0.328	700	- 0.328
5296	- 2.679	1579	- 1.932	1100	- 0.538	1100	- 0.538
6473	- 3.059	2086	- 2.108	2000	- 1.009	2000	- 1.009
8285	- 3.623	2758	- 2.319	2500	- 1.251	2500	- 1.251
10165	- 4.244	3388	- 2.527	3000	- 1.462	3000	- 1.462
11435	- 4.631	3812	- 2.688	5000	- 2.282	5000	- 2.282
15400	- 5.765	6600	- 3.748	6000	- 2.692	6000	- 2.692
17000	- 6.222	8000	- 4.28				

3.9.2.2 Kunstwerken en uitlaten

De 1D waterlopen bevatten in totaal 78 kunstwerken. Hiervan liggen er 56 binnen dijkkring 48, en 22 in de Rijntakken.

De verschillende kunstwerken (18) in de Rijntakken zijn stuwen, doorlaten, sluizen en een general structure. Het totaal van 22 komt door de samengestelde kunstwerken (compound structures) SC_Hagestein, SC_Amerongen, SC_Driel en StructureFeature5 (Veessen-Wapenveld). De instellingen van de kunstwerken in het Rijntakken model zijn gegeven in Tabel 3.3.

Binnen dijkkring 48 zijn de gebruikte kunstwerk typen in de modellering: stuwen, bruggen, duikers en vrij-verval uitlaten. De parameters van deze kunstwerken zijn overgenomen uit het aangeleverde SOBEK 2.13 model van het waterschap. Wel zijn enkele stuwen dichtbij de uitlaten verplaatst zoals is toegelicht in paragraaf 3.6.3. Ook is in overleg met het waterschap aangenomen dat de gemalen bij de uitlaten genoemd in Tabel 3.9 niet worden meegenomen in het model. De verwachting is namelijk dat de gemalen uitvallen bij een overstroming ten gevolge van dijkdoorbraak (desgewenst zijn deze gemalen later eenvoudig toe te voegen). De vrij-verval uitlaten bij de gemalen zijn daarentegen wel in het model meegenomen en als general structures geschematiseerd (zie Tabel 3.10). De vrij-verval uitlaten spelen een belangrijke rol voor het laten wegstromen van het water na een dijkdoorbraak. In het model zijn de vrij-verval uitlaten zo geschematiseerd dat ze alleen water naar de rivier kunnen lozen, en geen instroming van water vanuit de rivier naar het achterland van dijkkring 48 toestaan. Er wordt dus verondersteld dat ze gesloten zijn tijdens hoogwater, en dat ze zodra dat mogelijk is geopend zijn.

Tabel 3.9 Gegevens van gemalen (informatie van WRIJ)

Gemaal	Gemaal Capaciteit (m ³ /s)	Aanslagpeil (m NAP)	Afslagpeil (m NAP)
Emmerich	10 (geschat)	12.85	12.65
Kandia	11	10.4	10.2
De Liemers	11	7.6	7.4
Bevermeer	10	7.6	7.35

Tabel 3.10 Gegevens van vrij-verval uitlaten bij de gemalen

Gemaal	Breedte koker (m)	Hoogte koker (m)	Bodemniveau koker (m NAP)	Lengte koker (m)
Emmerich	4.5	2.5	11.5	50
Kandia	5.0	2.25	8.0	57
De Liemers	6.0	2.75	5.25	50
Bevermeer	6.0	2.5	6.0	40

3.9.3

2D

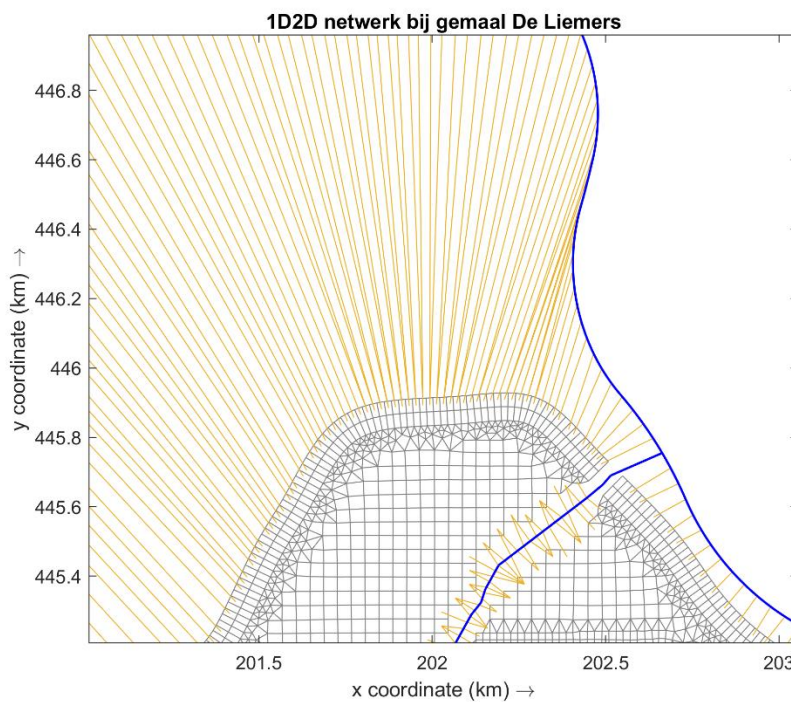
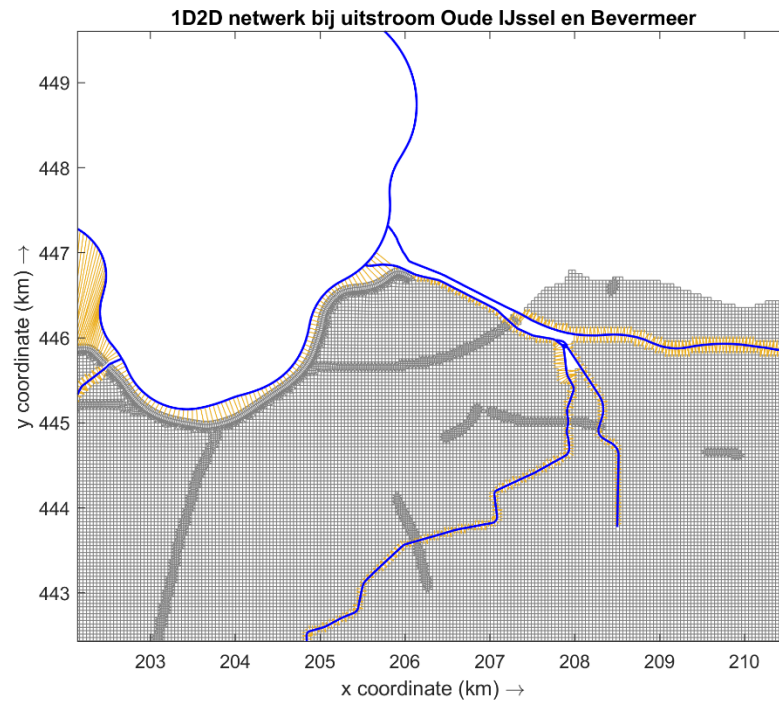
Belangrijke elementen van het 2D-model zijn het 2D rekenrooster, de hoogte-obstakels, het hoogtemodel, de ruwheidslaag en de initiële waterlaag voor de meren en plassen. Tabel 3.11 geeft alle 2D elementen (behalve het 2D rekenrooster) weer die in het 1D2D model zijn geïmplementeerd. De parameters van de bressen worden voor de desbetreffende som in het 1D kunstwerken bestand gekopieerd voordat de som wordt aangezet.

Tabel 3.11 Verschillende elementen uit het 2D model

Element	Bestand	Aantal
Primaire dijk inclusief hoogtes	Dijk_v3_fwx.pliz	1
Primaire dijk	Dijk_v3.pli	1
Hoogteobstakels	e1_fwx.pliz, e2_fwx.pliz, e3_fwx.pliz, e4_fwx.pliz, e5_fwx.pliz, e6_fwx.pliz, e7_fwx.pliz, e8_fwx.pliz, e9_fwx.pliz, spoor_fwx.pliz extra_wegen_fwx.pliz, geluidsscherm_sz_fwx.pliz, ka_NLv2_fwx.pliz, ke_Dv2_fwx.pliz, ke_NLv2_fwx.pliz, 1egen_fwx.pliz geluidsscherm_gsz_fwx.pliz	16 (17) Merk op dat er voor het geluidsscherm langs de Betuweroute 2 opties zijn, 1 zonder standzekerheid en 1 met standzekerheid 1.5m. We gebruiken nu de versie met standzekerheid (geluidsscherm_sz_fwx.pliz)
Hoogtemodel	DEM_Dijkkring48_total_v9.xyz	1
Ruwheidslaag	WinterRoughness.asc (winter) SummerRoughness.asc (zomer)	2
Initiële waterlaag voor meren en plassen	IWL_Lake_v2.xyz	1
Forcerings bestand voor 2D input & parameters	IntialFields.ini	1
Oneindig hoge dijk om terugstroming bij Lobith in curvilineaire cellen te voorkomen	ReturnFlow_thd.pli	1
Observatiepunten	Observation_points_obs.xyn, Obspoint_breslocaties_snap_obs.xyn, Overloop_naar_DR49_points_obs.xyn	3
Parameters 2D bressen voor verschillende sommen	Structures_Dijk_Herwen_Som1.ini, Structures_Dijk_Loo_Som2.ini, Structures_Dijk_Loo_Som3.ini, Structures_Dijk_Loo_Som4.ini, Structures_Dijk_Loo_Som5.ini,	5
Primaire dijk rondom Herwen en Loo waarover de bres kan groeien	Dijk_v3_Herwen_final.pli Dijk_v3_Loo_final.pli	2

Het 1D2D overstromingsmodel is gebouwd door alle 1D en 2D elementen, beschreven in paragrafen 3.9.2 en 3.9.3, samen te voegen in één folder en door een gecombineerd 1D2D netwerk te maken. Om het gecombineerde 1D2D netwerk te krijgen zijn het 1D netwerk en het 2D rekenrooster eerst samengevoegd tot één ongestructureerd rekenrooster. Hierna zijn de embedded of laterale 1D2D links gegenereerd.

Deze laterale 1D2D links zijn gegenereerd en toegevoegd aan het 1D2D netwerk met behulp van een command line optie van de D-Flow FM rekenkern. Figuur 3.26 toont het rekenrooster bij overgangen 1D-2D met 1D2D links.



Figuur 3.26 Rekeningrid (1D in blauw, 1D2D links in oranje, 2D in grijs) bij gemaal Liemers (onder), Doesburg (boven)

Nadat de 1D2D links zijn gegenereerd, is het noodzakelijk om deze verbindingen te controleren en eventueel handmatig aan te passen, of een extra verbinding toe te voegen. Op een aantal plekken is de afstand tussen het 1D netwerk en 2D rekenrooster te groot voor het automatisch genereren van de 1D2D links (bijvoorbeeld bij breslocatie Herwen is dit het geval). Daarom zijn hier handmatig 1D2D links getekend in het 1D2D netwerk van dijkkring 48. Ook zijn enkele foutieve 1D2D links verwijderd. Zo werden foutieve 1D2D links gevonden bij de uitlaat Bevermeer. Het 1D Rijntakken model stond hier via de 1D2D links in directe verbinding met het binnendijs gebied, en dat is niet de bedoeling. Dat zou namelijk leiden tot instroom van IJsselwater in dijkkring 48. Het uiteindelijke 1D2D netwerk inclusief de toegevoegde 1D2D links is toegevoegd aan de folder waarin het gecombineerde 1D2D model is gezet.

Als het 1D2D netwerk is gemaakt en alle elementen in één folder staan, moeten de elementen en invoerbestanden worden gekoppeld aan het model door in het MDU-bestand te verwijzen naar alle te gebruiken invoerbestanden.

3.9.4 Overige model parameters

In het MDU-bestand (het hoofd-invoerbestand van het overstromingsmodel, de afkorting staat voor Master Definition Unstructured, waarbij Unstructured dezelfde betekenis heeft als Flexible Mesh) zitten niet alleen verwijzingen naar alle model-elementen, maar zijn ook de model parameters gespecificeerd. Bijvoorbeeld:

- Tijd parameters: referentie datum, maximum tijdstap, tijdstap waarmee de data uit randvoorwaarden wordt opgevraagd, etc.;
- Default bodemniveau, alleen te gebruiken als bodemniveaus ontbreken;
- Type bodemhoogte;
- Maximum Courant getal;
- De frequentie waarmee uitvoer wordt weggeschreven; en
- Een uniforme ruwheidswaarde en type voor 1D, 2D en 1D2D links.

In Tabel 3.12 zijn belangrijke modelparameters gespecificeerd, die zijn toegepast in het overstromingsmodel van dijkkring 48. De uitvoerparameters zijn beschreven in paragraaf 4.1 en appendix C.

Tabel 3.12 Belangrijke modelparameters voor het model van dijkkring 48

Parameter	Waarde
<u>Tijdparameters</u>	
Referentiedatum	1-11-2010 00:00:00
Tijdsinterval voor update forcering	600 s
Maximum tijdstap	60 s
Starttijd van simulatie t.o.v. referentiedatum	0 s
Stoptijd van simulatie t.o.v. referentiedatum	2592000 s
<u>Geometrie parameters</u>	
Initiële waterstand indien ontbrekend	NA
Bodemhoogte indien ontbrekend	NA
Bodemhoogte type	1 (bodemhoogtes op middelpunten van cel gegeven)
<u>Numerieke parameters</u>	
Maximum Courant getal	0.7
<u>Fysische parameters</u>	
Uniforme ruwheidstype	White-Colebrook
Uniforme ruwheidswaarde 1D, 2D en 1D2D	0.25
<u>Restartbestand</u>	
Restart NetCDF	Model_base_20101109_000000_rst.nc

3.10 Beleidsmodel en calamiteitenmodel

Er wordt onderscheid gemaakt tussen de modeltoepassing voor scenario-analyses en de toepassing in een calamiteitsituatie. Het model voor scenario-analyses moet een scenario van een dijkdoorbraak binnen één nacht (zeg 10 uur) kunnen doorrekenen. Een typische afvoergolf van de Rijn duurt 30 dagen, inclusief opbouw naar de piek (na 16 dagen). Dus dat betekent dat uitgaande van een goede set initiële condities 15 dagen binnen 1 nacht wordt doorgerekend. Bij een calamiteit zou het model snel genoeg moeten rekenen, bij voorkeur kan het model dan binnen 1 uur 2 dagen doorrekenen. De rekentijd voor de 2D stroming (dus na het optreden van de dijkdoorbraak) is hierbij maatgevend.

Er wordt gestreefd naar één model geschikt voor zowel de scenario-analyses als een calamiteit. Na de bespreking van de gemaakte berekeningen in hoofdstuk 4, wordt hierop nader ingegaan.

4 Berekeningen

4.1 Modeluitvoer

De D-HYDRO suite geeft uitvoer in NetCdf bestanden. Dit is een standaard formaat dat wereldwijd gebruikt wordt, en toch de nodige flexibiliteit biedt. Het voordeel van het gebruik van een wereldwijde standaard is dat er standaard viewers beschikbaar zijn voor dit soort bestanden, en dat niet alle postprocessing per definitie binnen de D-HYDRO suite hoeft te gebeuren.

De NetCdf uitvoer bestanden die door de hydrodynamische rekenkern wordt gegenereerd zijn:

- HIS bestand;
- MAP bestand;
- Class bestand;
- Fourier bestand.

De uitvoer van D-HYDRO bevat gedetailleerde tijdreeksen van resultaten. Dit is zowel informatie over 1D elementen met waterstanden, debieten, kunstwerkresultaten en resultaten ter hoogte van de breslocatie (bresbreedte, diepte, debiet en stroomsnelheid) als ook uitvoer - eventueel met een extra postprocessingslag - voor de 2D kaartbeelden van:

- maximale waterdieptes;
- maximale stroomsnelheden;
- maximale stijgsnelheden;
- het tijdstip van overstroming (ten opzichte van tijdstip van de dijkdoorbraak).

In appendix C wordt een gedetailleerd overzicht gegeven van de verschillende uitvoerbestanden en de inhoud van de bestanden. Globaal gesproken bevat het HIS bestand informatie over de waterbalans van de hele schematisatie (1D2D), en uitvoer op 1D elementen zoals kunstwerken, cross-secties, en ook de uitvoer voor de dijkdoorbraaklocaties. Het MAP bestand bevat typisch de 2D uitvoer met waterstanden, waterdiepten en stroomsnelheden op de gewenste uitvoertijdstippen. In het Class Map bestand worden waterdiepten en snelheden niet als getallen gegeven, maar wordt aangegeven in welke klasse deze variabelen vallen (klasse-indeling is door de gebruiker op te geven). Dit bestand is daardoor compacter dan het MAP bestand. Het Fourier bestand bevat de maximale waterstanden en maximale stroomsnelheden.

De uitvoer kan flexibel aan- en uit worden gezet, en per uitvoerbestand kan een gewenst tijdsinterval worden opgegeven waarvoor uitvoer gegenereerd moet worden. Het MAP bestand met waterstanden per uitvoertijdstap kan groot worden bij lange simulaties, dus de uitvoertijdstappen en gewenste uitvoerparameters moeten met beleid worden gekozen.

In het pilotproject zal voor één scenario ook een berekening gedaan worden met de Schade- en Slachtoffermodule om de impact qua schade en slachtoffers inzichtelijk te maken. Hiervoor is Delft-FIAT gebruikt (Flood Impact Assessment Tool)

4.2 Resultaten van 2D testberekeningen voor Bislich en Spijksedijk

4.2.1 Bislich

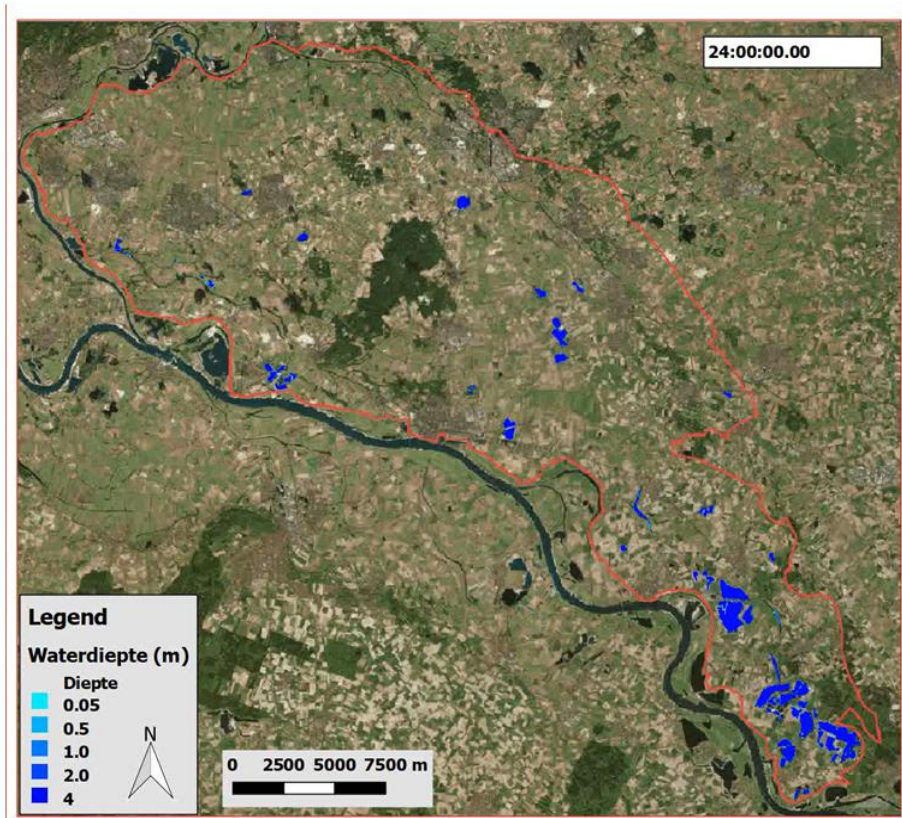
Eerste 2D testsom, mei 2019

Een eerste 2D testsom voor een dijkdoorbraak bij Bislich is gepresenteerd bij het voortgangsoverleg van 10 mei 2019. De dijkdoorbraak is hierbij opgelegd als een inkomend debiet (source-sink methode) op een aantal cellen bij Bislich (ten noordwesten van Wesel). Het hierbij opgelegde maximale instromende debiet is 1450 m³/s, dat is gebaseerd op vroeger gemaakte overstromingsberekeningen.

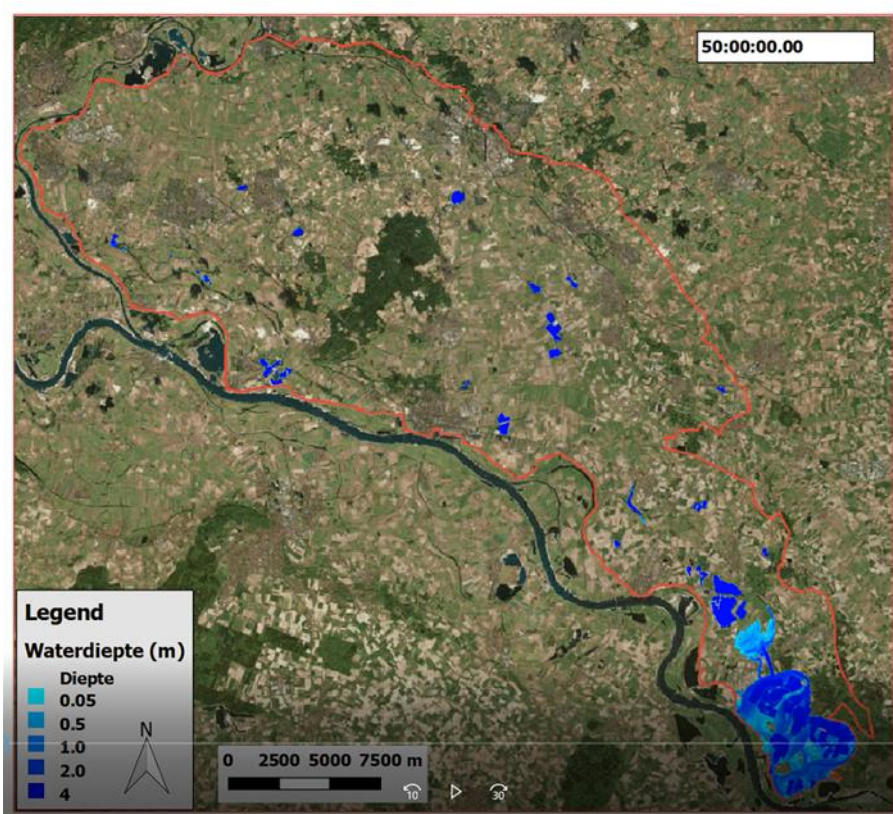
In deze berekening is een puur 2D rekenrooster gebruikt met resolutie 40x40 meter, met verfijningen bij wegen (20x20 meter) en spoorwegen (tot 10x10 meter). De watergangen binnen dijkkring 48 en het Rijntakken model waren op dat moment nog niet apart opgenomen in het model. In het 2D model zijn de watergangen in het DEM nog weergegeven met een typische waterstand als maaiveldhoogte (want alleen de meren en plassen waren op dat moment initieel verlaagd). Een gevolg van het ontbreken van het Rijntakken model en de 1D watergangen is dat uitlaten zoals de sluis in de Oude IJssel bij Doesburg, en spuimiddelen en gemalen bij Bevermeer, Liemers, Kandia en Emmerich ook nog niet in het model waren opgenomen. Hierdoor zijn de uiteindelijke inundatiedieptes na 10 dagen (met start van de inundatie na 1 dag en 9 uur) te hoog, maar de simulatie is vooral gebruikt om het inundatieverloop qua timing en gebied te testen.

De volgende figuren geven een indruk van de resultaten, weergegeven met QGIS. Hierbij worden de volgende beelden gegeven:

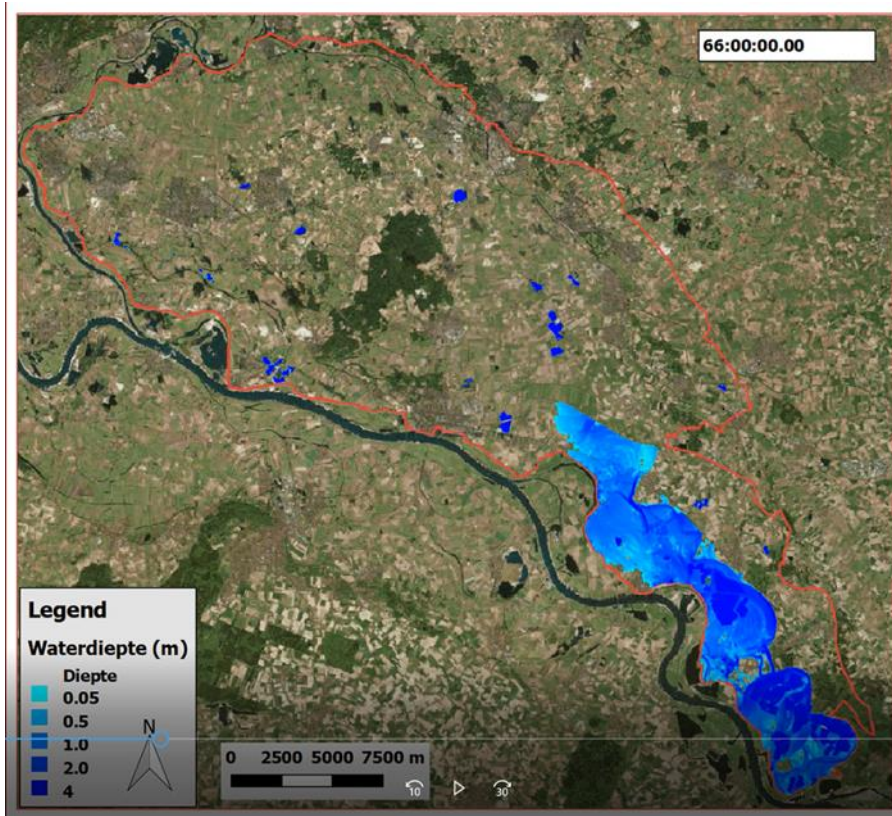
- T=24 uur, dat is nog voor het moment van de dijkdoorbraak; op dat moment zijn alleen de initieel gevulde meren en plassen blauw gekleurd (Figuur 4.1).
- T=50 uur, 17 uur na de doorbraak. De overstroming is alleen nog in het Duitse deel van dijkkring 48 (Figuur 4.2).
- T=66 uur, 33 uur na de doorbraak; de overstroming wordt langs de A3 in Duitsland tijdelijk tegengehouden (Figuur 4.3)
- T=87 uur, 54 uur na de doorbraak; de overstroming bereikt Doetinchem (Figuur 4.4).
- T=105 uur, 72 uur na de doorbraak; de overstroming bereikt Doesburg (Figuur 4.5).



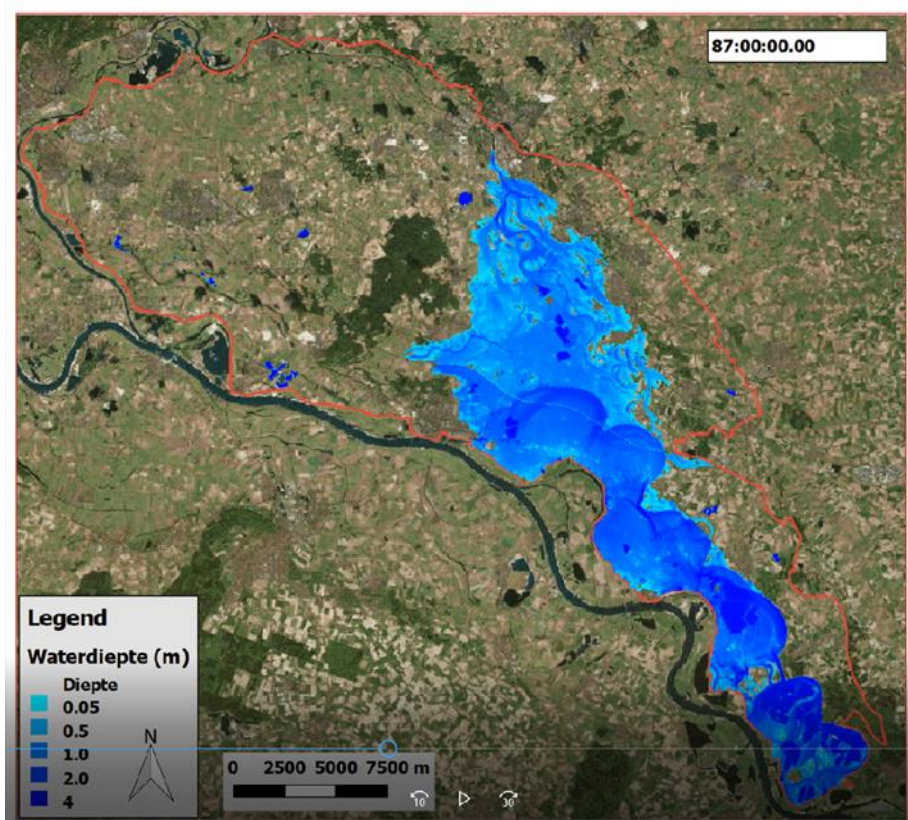
Figuur 4.1 Simulatie doorbraak Bislich, situatie na 24 uur (nog voor het moment van de doorbraak)



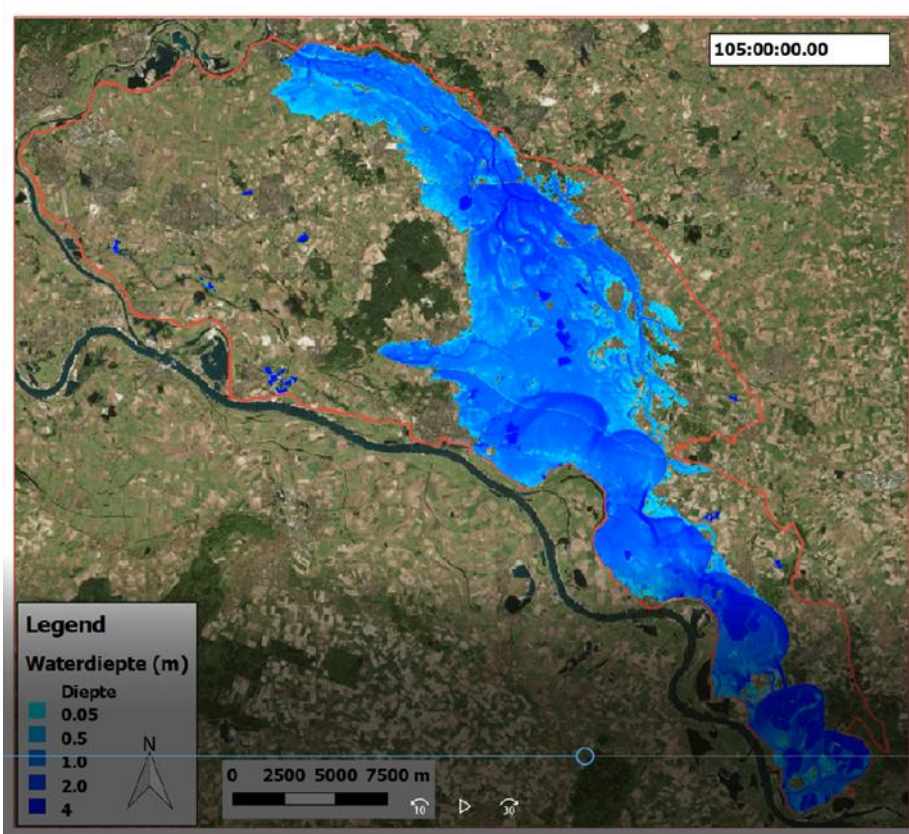
Figuur 4.2 Simulatie doorbraak Bislich, situatie na 50 uur (17 uur na het moment van de doorbraak)



Figuur 4.3 Simulatie doorbraak Bislich, situatie na 66 uur (33 uur na het moment van de doorbraak); de overstroming heeft de A3 Emmerich – Oberhausen bereikt



Figuur 4.4 Doorbraak Bislich, situatie na 87 uur (54 uur na doorbraak); de overstroming bereikt Doetinchem



Figuur 4.5 Simulatie doorbraak Bislich, situatie na 105 uur (overstroming bereikt Doesburg)

Na $T=105$ uur gaat de overstroming verder richting het noordwesten van de dijkkring, maar omdat er in dit puur 2D model nog geen uitlaten naar de IJssel actief zijn wordt het gebied dat onderloopt en de bijbehorende diepte overschat.

Deze 2D simulatie van 10 dagen met een eerste versie van het model kostte met orde 430000 rekencellen ongeveer 9 uur en 30 minuten simulatietijd. Die rekentijd is acceptabel, maar zal bij meenemen van meer detail en uitbreiden van het model met de Rijntakken en waterlopen binnen de dijkkring nog wel oplopen. Verder blijkt uit de simulatie dat ruimtelijk detail zoals de verhoogde snelwegen duidelijk zichtbaar zijn in en effect hebben op de resultaten. Qua verloop van de overstroming in deze berekening bereikt het front van de overstromingsgolf na ruim 2 dagen Doetinchem, en na 3 dagen Doesburg. Het waterschap heeft aangegeven dat het globale beeld van de resultaten redelijk herkenbaar is en consistent met verwachtingen op basis van oude overstromingsberekeningen (met bv. Delft-FLS).

Tweede 2D testsom, juli 2019

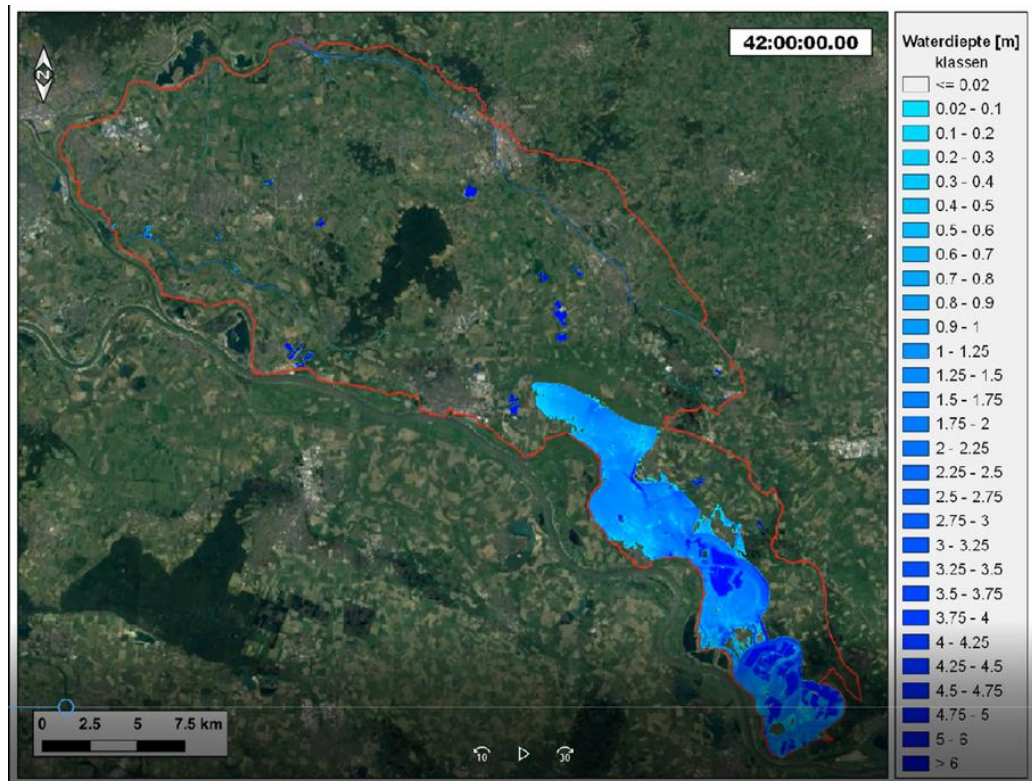
Voor het voortgangsoverleg van 12 juli is een vergelijkbare som voor een doorbraak bij Bislich gepresenteerd met de op dat moment beschikbare modelversie. Dit was ook een puur 2D model, maar met de watergangen met hoge resolutie (5x5 meter) ingebrand in het hoogtemodel. Ook de keringen binnen dijkkring 48 waren op dat moment al als 'fixed weir' in het model opgenomen. De stuwen op de Oude IJssel en de uitstroming bij Doesburg zijn in dit model van begin juli ook opgenomen (in 2D).

Voor een som van 10 dagen met de doorbraak na 8 uur blijkt de rekentijd dan echter fors: 4 dagen en 9 uur. Dat komt doordat de waterlopen in het 2D grid met kleine cellen (5x5meter) zijn gedaan, en er door de Oude IJssel bij deze dijkdoorbraak een fors debiet gaat.

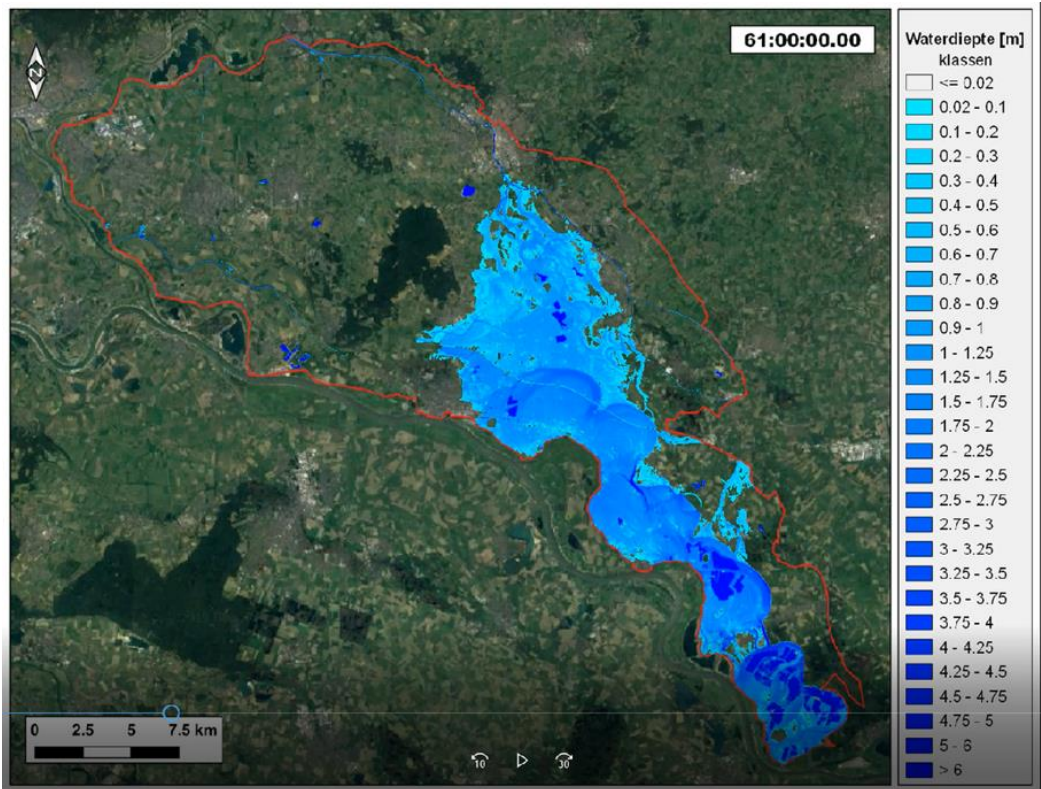
Hierdoor worden deze kleine cellen beperkend voor het Courant criterium, dat globaal zegt dat er binnen een rekentijdstep niet meer water door een cel mag stromen dan het volume water in die cel, en daardoor wordt de rekentijdstep in de berekening flink geknepen en loopt de rekentijd op. Daarom is besloten de lokale waterlopen in 1D te modelleren.

De volgende figuren (Figuur 4.6 tot en met Figuur 4.10) geven een indruk van de resultaten. In vergelijking met de som van mei wordt het volgende opgemerkt:

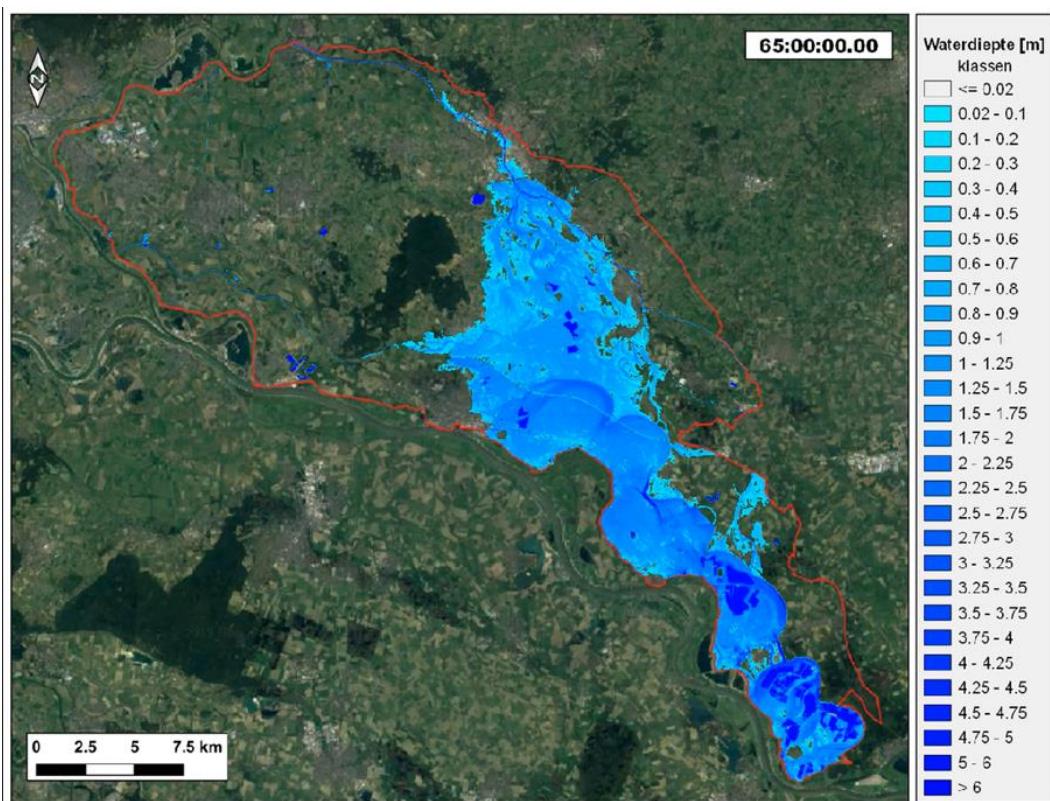
- In Figuur 4.7, na T=61 uur (53 uur na de doorbraak) blijkt dat het water in Duitsland nog tegen de oostgrenzen van het 2D grid aanloopt. Dat is niet wenselijk, en daarom is in het definitieve model nog een extra strook aan het hoogtemodel toegevoegd om dit soort randeffecten te vermijden.
- Uit Figuur 4.7 blijkt dat de looptijd van het front van de overstroming tot Doetinchem vergelijkbaar is (ruim 2 dagen) met de som van mei (Figuur 4.4).
- Het inbranden van de 1D waterlopen in het grid heeft het effect dat de afvoergolf sneller door de Oude IJssel loopt en dat er eerder inundaties optreden verder benedenstrooms langs de Oude IJssel (zie Figuur 4.8, na T=65 uur), wat niet het geval was bij de modelversie van mei.
- Toevoegen van de uitlaat van de Oude IJssel bij Doesburg zorgt ervoor dat water de dijkkring ook kan verlaten en dat na verloop van tijd gebieden weer droogvallen (vergelijk Figuur 4.9 en Figuur 4.10), dit in tegenstelling tot de berekening van mei. Omdat de andere uitlaten naar de Rijn, Pannerdens kanaal en IJssel nog niet zijn toegevoegd blijft er nog wel water staan in het Duitse gebied van dijkkring 48 en in het Rijnstrangen gebied (Figuur 4.10).



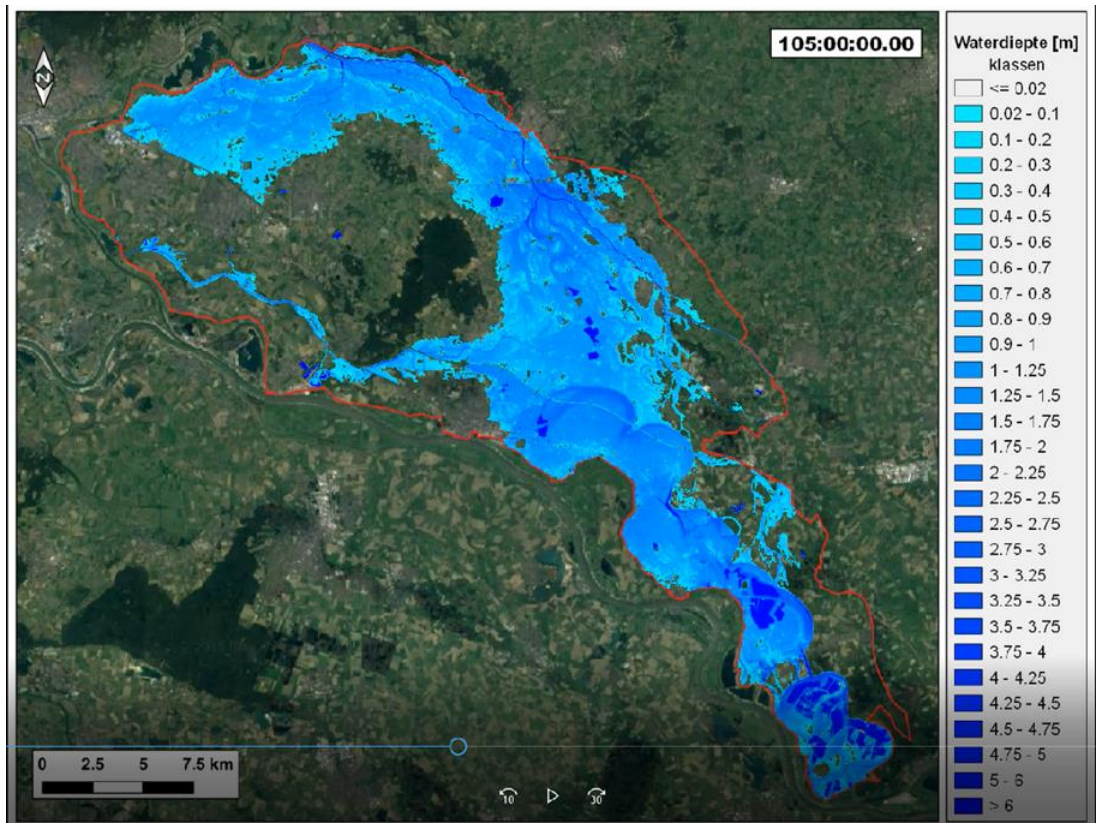
Figuur 4.6 Doorbraak Bislich, versie 12 juli met 2D waterlopen en keringen, T=42 uur (34 uur na doorbraak)



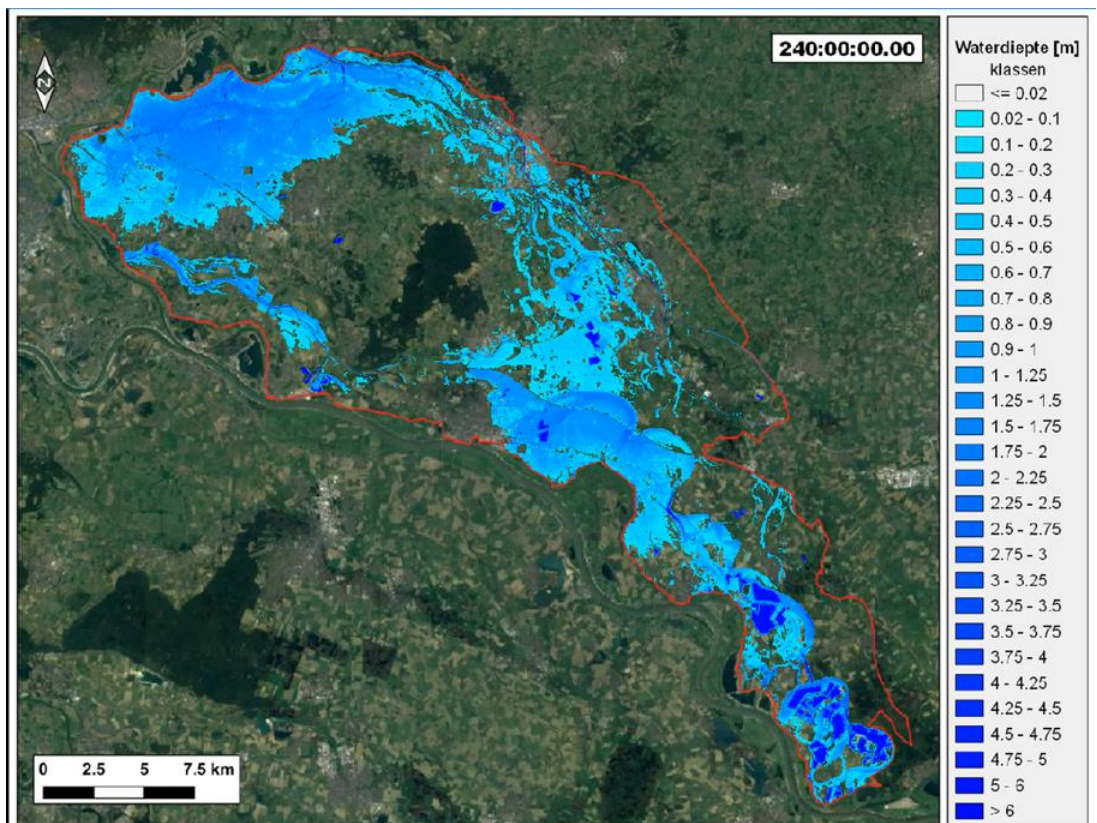
Figuur 4.7 Doorbraak Bislich, versie 12 juli met 2D waterlopen en keringen, T=61 uur (53 uur na doorbraak)



Figuur 4.8 Doorbraak Bislich, versie 12 juli met 2D waterlopen en keringen, T=65 uur (57 uur na doorbraak)



Figuur 4.9 Doorbraak Bislich, versie 12 juli met 2D waterlopen en keringen, T=105 uur (97 uur na doorbraak)

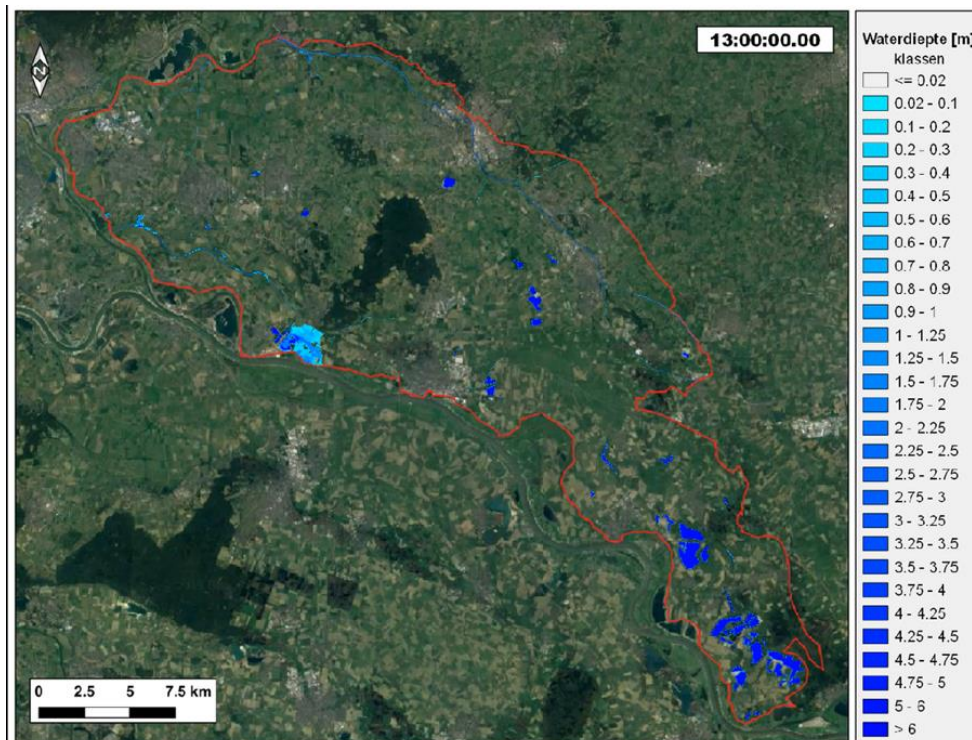


Figuur 4.10 Doorbraak Bislich, versie 12 juli met 2D waterlopen en keringen, T=240 uur

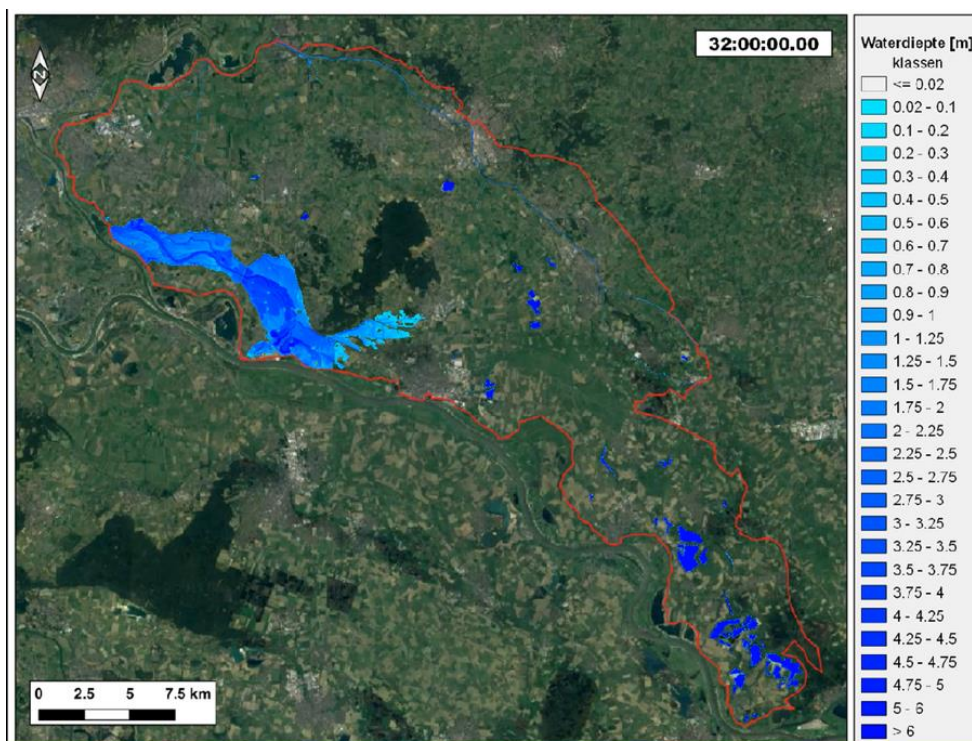
4.2.2

Spijksedijk

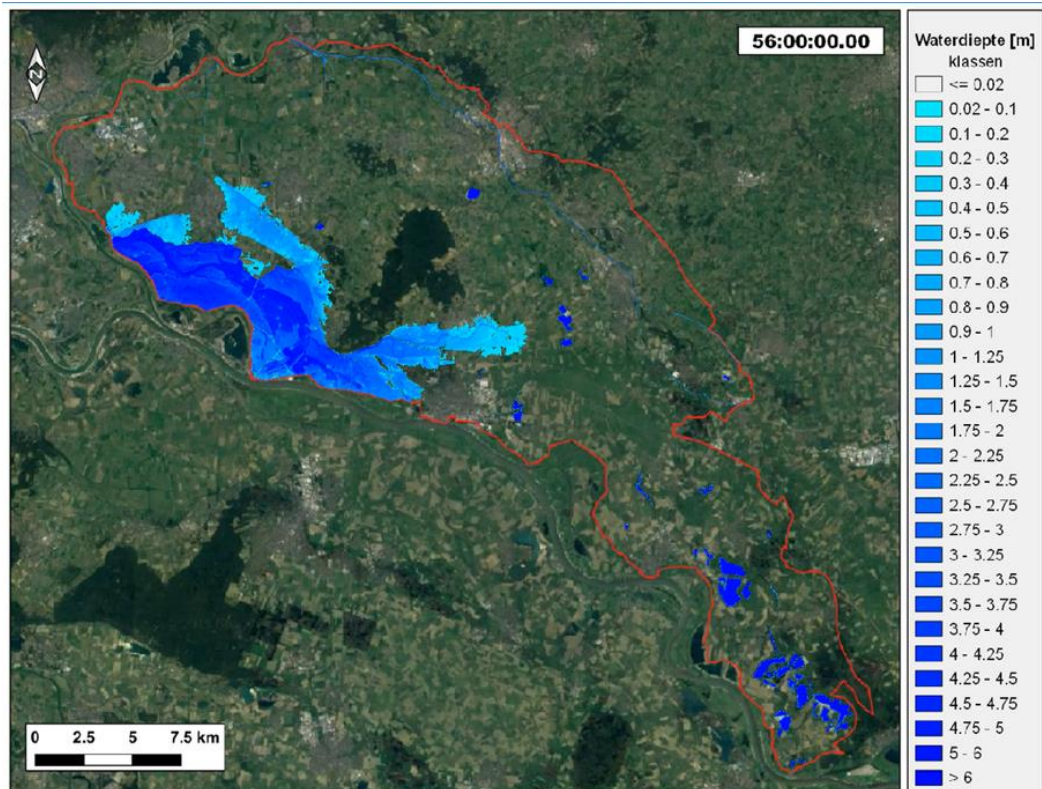
Voor een tweede test is een doorbraak bij Spijksedijk puur 2D gesimuleerd. De dijkdoorbraak is in de 2D berekening als source-sink met een debiet opgedrukt, met als maximum debiet bijna 1450 m³/s. De resultaten op verschillende tijdstippen worden getoond in Figuur 4.11 tot en met Figuur 4.14.



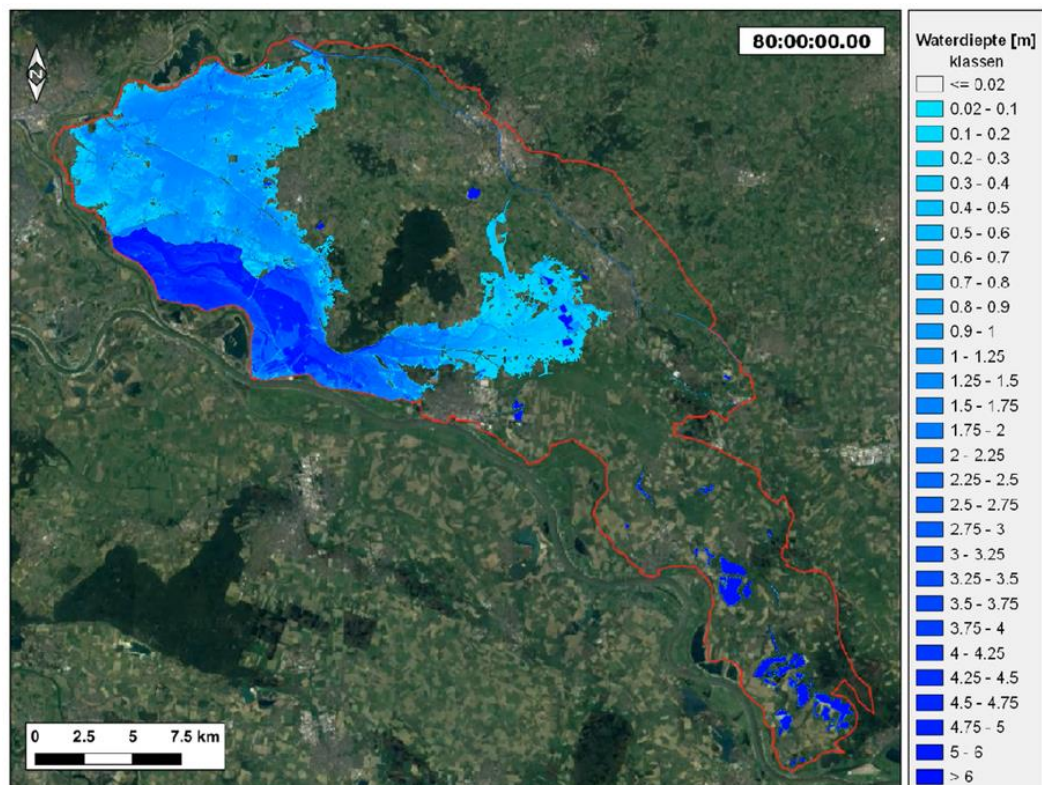
Figuur 4.11 Dijkdoorbraak bij Spijksedijk, T=13 uur (5 uur na heb begin van de doorbraak)



Figuur 4.12 Dijkdoorbraak bij Spijksedijk, T=32 uur (1 dag na heb begin van de doorbraak)



Figuur 4.13 Dijkdoorbraak bij Spijksedijk, T=56 uur (2 dagen na heb begin van de doorbraak)



Figuur 4.14 Dijkdoorbraak bij Spijksedijk, T=80 uur (3 dagen na heb begin van de doorbraak)

De opgelegde doorbraak bij Spijk leidt tot flinke inundatiediepten in het Rijnstrangen gebied. Het water verspreid zich zowel naar het noorden (Zevenaar, Duiven en over de A12 heen richting Giesbeek) als naar het oosten (onderlangs het Montferland richting dal van de Oude IJssel)

Dit beeld is herkenbaar uit oude Delft-FLS simulaties, net als de grote lijnen van de Bislich 2D simulaties. In vergelijking met de oude simulaties is meer ruimtelijk detail meegenomen en zichtbaar in de resultaten doordat op een hogere resolutie is gerekend.

4.3 Definitie van de berekeningen en gevoeligheidsanalyses met het beleidsmodel

Naast diverse testberekeningen tijdens de modelbouwfase om de verschillende stappen in de modelbouw te controleren en te testen, zijn uiteindelijk een paar berekeningen gemaakt met prototypen van het beleidsmodel waarin het hele 2D gebied van de dijkkring was opgenomen, maar nog geen koppeling met 1D modellen (voor de Rijntakken en de waterlopen binnen het waterschap) was gemaakt. Het betreft dus 2D berekeningen waarbij de dijkdoorbraak met een opgelegd source-sink debiet op een aantal cellen in het 2D grid is opgelegd. Deze 2D berekeningen zijn beschreven in de vorige paragraaf.

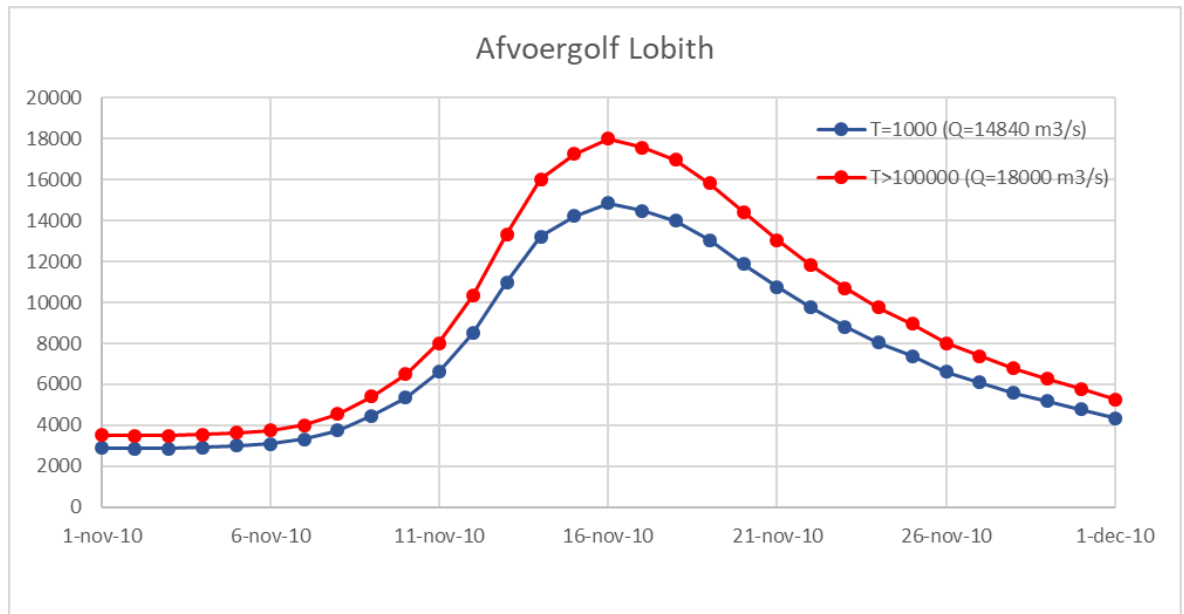
Voor het definitieve gekoppelde 1D-2D model zijn een zestal simulaties van dijkdoorbraken gedefinieerd. Deze zijn bedoeld als testen voor de volledige functionaliteit en als gevoeligheidsanalyse. Tabel 4.1 geeft een korte samenvatting van de gekozen breslocaties, bresgroeiparameters, herhalingstijd van de afvoergolf bij Lobith, en de toegepaste ruwheid voor de zes scenario sommen. Som 5 is qua kenmerken van de bres hetzelfde als som 1, maar in som 5 is de winter-ruwheidslaag vervangen door de zomer-ruwheidslaag. In som 6 wordt geen dijkdoorbraak toegepast. In deze som is er onderzocht of overloop bij de primaire dijk optreedt en goed gesimuleerd wordt voor een piekafvoer van 18000 m³/s bij Lobith; de corresponderende herhalingstijd is ruim 100000 jaar. Het beleidsmodel met de dijkdoorbraaklocaties heeft meer dan 430000 rekenpunten en meer dan 870000 verbindingen tussen rekenpunten.

Tabel 4.1 Beschrijving van de 6 scenario sommen (breslocaties en bresparameters, afvoergolf, ruwheidslaag)

	Som 1 Herwen	Som 2 Loo referentie	Som 3 Loo kleidijk	Som 4 Loo minder diepe bres	Som 5 Loo zomerruwheid	Som 6 overloop
Type	dijkdoorbraak	dijkdoorbraak	dijkdoorbraak	dijkdoorbraak	dijkdoorbraak	overloop
Herhalingstijd afvoer bij Lobith	T>100000 jaar Q=18000 m ³ /s	T=1000 jaar	T=1000 jaar	T=1000 jaar	T=1000 jaar	T>100000 jaar Q=18000 m ³ /s
Breslocatie	Herwen	Loo	Loo	Loo	Loo	n.v.t.
x-coördinaat start bres [m]	203773.11	195612.50	203773.11	203773.11	203773.11	n.v.t.
y-coördinaat start bres [m]	432890.07	438107.55	432890.07	432890.07	432890.07	n.v.t.
Initiële dijkhoogte [m NAP]	18.96	16.17	16.17	16.17	16.17	n.v.t.
Minimale dijkhoogte [m NAP]	13.39	10.83	10.83	11.83	10.83	n.v.t.
Initiële bresbreedte [m]	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	n.v.t.
Tijd tot start bres vanaf start simulatie [s]	1209600	1296000	1296000	1296000	1296000	n.v.t.
Tijd benodigd voor het verlagen van dijk tijdens fase 1 [s]	600	600	600	600	600	n.v.t.
Debiet coëfficiënt [-]	1	1	1	1	1	n.v.t.
Grondsoort dijk	zand	zand	Klei	zand	zand	n.v.t.
Factor 1 [-]	1.2	1.2	1.3	1.2	1.2	n.v.t.
Factor 2 [-]	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	n.v.t.
Kritische stroomsnelheid voor het eroderen van gronddeeltjes dijk [m/s]	0.2	0.2	0.5	0.2	0.2	n.v.t.
Ruwheidslaag	winter	winter	winter	winter	zomer	winter

De eerdere sommen voor Bislich en Spijksedijk zoals beschreven in de vorige paragraaf zijn niet in deze tabel opgenomen, omdat bij die sommen de afvoer is opgedrukt en niet met de dijkdoorbraakformulering in D-HYDRO is berekend.

Voor de afvoergolf is de standaard WBI-2017 afvoergolf van de Rijn bij Lobith gebruikt (Chbab et.al, 2017, Prinsen et.al, 2015). Figuur 4.15 geeft de standaard afvoergolf weer voor $T=1000$ jaar en de $Q=18000 \text{ m}^3/\text{s}$ piekafvoer. De golfvorm betreft een periode van 30 dagen, met de piekafvoer halverwege de periode (begin van dag 16). Deze $T=1000$ jaar afvoergolf heeft een piekafvoer van $14840 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith. Voor andere herhalingsstijden is de golfvorm hetzelfde, alleen is de piekafvoer hoger. Voor $T=100000$ jaar is de piekafvoer bij Lobith $17710 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figuur 4.15 Afvoergolf Lobith met pieken $Q=14840 \text{ m}^3/\text{s}$ ($T=1000$ jaar) en $Q=18000 \text{ m}^3/\text{s}$ ($T>100000$ jaar)

Volgens de Leidraad overstromingssimulaties moeten de scenario's zoveel mogelijk consistent zijn met de modellering en uitgangspunten van het WBI (Wettelijk Beoordelings Instrumentarium) en OI (Ontwerp Instrumentarium). Standaard wordt door de leidraad aanbevolen om de overstromingssimulaties te maken voor dijkdoorbraken bij waterstanden met herhalingsstijden $T=100$, 1000 en 10000 jaar. Wanneer er grote verschillen zitten in de resultaten van deze sommen dan bijvoorbeeld ook voor $T=3000$ jaar. Bij de simulaties is het tijdstip van de bres gezet op het tijdstip van de maximale afvoer bij Lobith. De eerste som voor de dijkdoorbraak bij Herwen was voorzien voor een piekafvoer horend bij herhalingsstijd $T=1000$ jaar. Omdat de bresbreedte en overstroemd gebied dan echter beperkt bleef (te beperkt voor het doel van de test), is die dijkdoorbraak doorgerekend met een piekafvoer van $Q=18000 \text{ m}^3/\text{s}$. Die afvoergolf is ook in som 6 gebruikt voor een som met alleen overloop (zonder dijkdoorbraak).

Som 1 en som 2 zijn de referentiesommen. Som 3 tot en met som 6 zijn gevoeligheidsanalyses op som 2, voor respectievelijk:

- bresgroeiparameter klei/zand (som 3);
- bresparameter minimum dijkhoogte (som 4);
- ruwheid zomersituatie i.p.v. wintersituatie (som 5);
- geen dijkdoorbraak, maar overloop ('overtopping') (som 6).

4.4 Resultaten van de zes scenario-berekeningen met het beleidsmodel

4.4.1 Som 1: Dijkdoorbraak Herwen

De som met dijkdoorbraak bij Herwen is bedoeld om het model te testen voor een redelijk groot overstroomd gebied waarbij ook de route ten zuiden van het Montferland gebruikt wordt. Op basis van de oude overstroomingssimulaties met FLS waarbij voor de grootte van de bres 200m was verondersteld, is hiervoor Herwen geselecteerd. Alternatieve locaties zoals Spijksedijk of een locatie in Duitsland zouden in principe ook gekund hebben. Maar omdat nu alleen het 1D Rijntakken model vanaf Lobith beschikbaar was, is ervoor gekozen om de eerste geschikte locatie ten noorden van Lobith te gebruiken.

De eerste som met een T=1000 afvoergolf op de Rijn en dijkdoorbraak bij Herwen leverde echter een relatief kleine bres op, zoals bij het voortgangsoverleg van 6 december 2019 uitgelegd. Het bleek dat de bresbreedte beperkt bleef tot zo'n 60 meter. Dat is een stuk smaller dan bij oude (FLS) berekeningen waarbij van een 200m brede bres is uitgegaan, en dat scheelt een flink volume. Verder, door het in detail meenemen van de dijken in het Rijnstrangengebied, blijkt in de som dat eerst het Rijnstrangengebied volloopt en pas daarna de oostelijke dijk langs de Oude Rijn overstroomt. In de oude sommen was die dijk waarschijnlijk of niet meegenomen in het DEM, of niet geheel sluitend, waardoor de overstroming zich sneller naar het oosten kon verspreiden. Een ander verschil is de mogelijke uitlaat bij Kandia, die is bij de oude som niet meegenomen en in de nieuwe sommen wel (maar met de beperking dat er alleen water geloosd kan worden als de waterstand aan de binnenzijde hoger is dan aan de rivierzijde).

Daarom is de definitieve som voor Herwen gemaakt met een hogere afvoergolf ($Q=18000 \text{ m}^3/\text{s}$, herhalingstijd $T>100000$ jaar). Verder is alleen voor deze som het moment van doorbreken van de dijk een dag voor de piekafvoer gezet, zodat het volume dat door de bres kan gaan groter is.

Tabel 4.2 geeft een beknopt overzicht van de belangrijkste resultaten van de dijkdoorbraakberekening voor Herwen. De tijdverloop van de bresbreedte en het bij de bres binnengekomen volume wordt gegeven in Figuur 4.17. Figuur 4.16 laat de maximum inundatiedieptes zien, en Figuur 4.18 tot en met Figuur 4.22 tonen de inundatiepatronen na respectievelijk 1,2,4,7 en 15 dagen na het ontstaan van de bres.

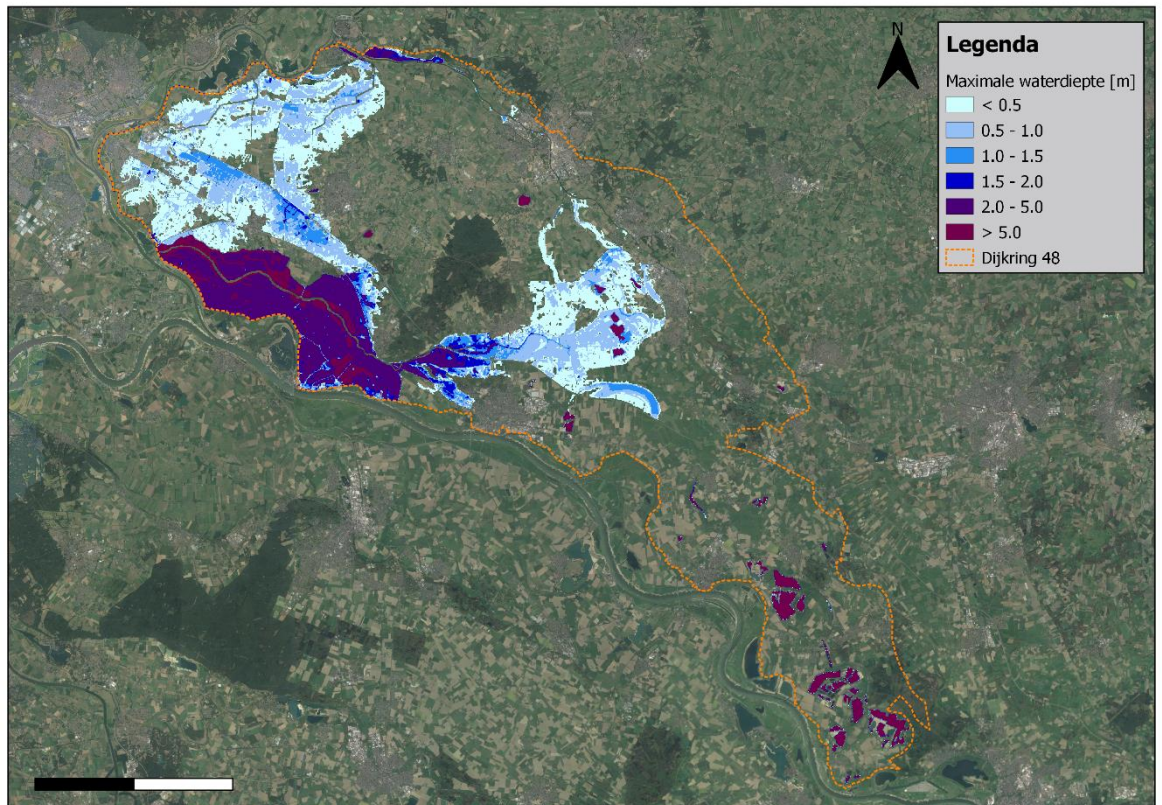
Tabel 4.2 Resultaten van de berekening som1 – dijkdoorbraak Herwen, Lobith $Q_{\text{piek}}=18000 \text{ m}^3/\text{s}$

Som 1	
Type	Dijkdoorbraak Herwen, zanddijk
Herhalingstijd afvoer bij Lobith	$T>100000$ jaar, $Q=18000 \text{ m}^3/\text{s}$
Breslocatie	Herwen
Maximale bresbreedte [m]	59.78
Tijd tot 99% van de maximale bresbreedte	1 dag en 7 uur
Maximum bresdebiet [m^3/s , gem. over 10 minuten]	919 m^3/s
Totaal instroomvolume door bres (exclusief retourstroom)	272 Mm^3
Maximum geïnundeerd oppervlak	151 km^2
Maximum diepte in 2D grid (ROR klasse)	>5 m (Rijnstrangengebied)
Rekentijd totaal	25 uur 27minuten
Rekentijd 1 dag na begin bres	2 uur 40 minuten
Rekentijd 2 dagen na begin bres	6 uur 10 minuten

De bresbreedte blijft nog steeds beperkt tot maximaal 60 meter. Het volume dat door de bres stroomt is, omdat de bres ontstaat voor de piekafvoer, nu wel een stuk hoger. Tegen het eind van de berekening stroomt er al water bij de dijkdoorbraaklocatie terug naar de Rijn, omdat de afvoergolf voorbij is en de waterstand in de rivier weer gezakt is.

Bij de inundatiedieptes valt op dat die in het gebied van de Oude Rijn – Rijnstrangen veruit het hoogst zijn. Hier treden dieptes van boven de 5 meter op. Verder stroomt er inderdaad water ten zuiden van het Montferland langs richting het Oude IJsseldal. Bij Doetinchem is er echter nauwelijks meer overstroomd gebied. Bij Doesburg is er wel een gebied dat overstroomt. Dat is benedenstreams van gemaal Bevermeer een laaggelegen buitendijks gebied langs het Broekhuizerwater. Verder stijgt de waterstand op de IJssel tot boven de 10 meter (piekwaterstand bij Doesburg op de IJssel is ongeveer 11.6 m).

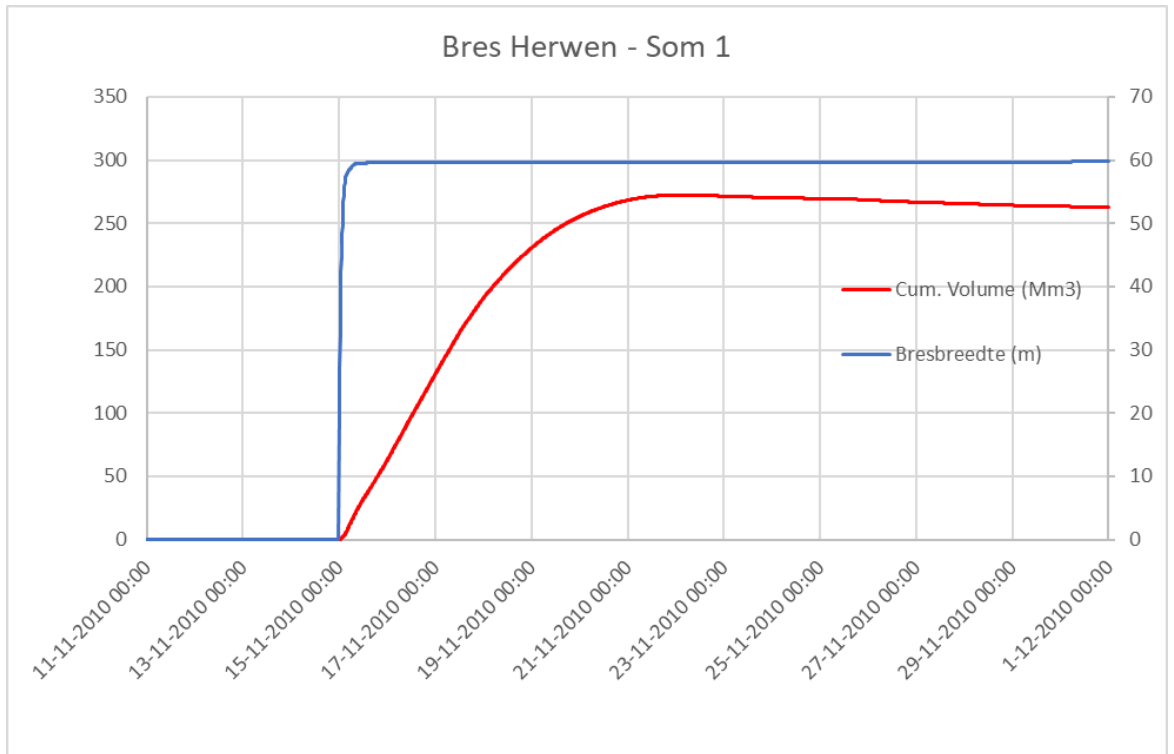
De stuw bij Doesburg heeft in het SOBEK-2 model van het waterschap een maximum kruinhoogte van +10 meter en dit is overgenomen in het D-HYDRO model, dus stroomt het water van de IJssel bij een waterstand van 11.6m op de IJssel naar binnen, de Oude IJssel op. Dit leidt tot een klein overstroomd gebied aan de noordzijde van de Oude IJssel bij Doesburg en Drempt. Mocht dit niet de bedoeling zijn en is de stuw ook kerend bij hogere waterstanden, dan kan dit eenvoudig worden aangepast door de stuwformulering om te zetten naar een general structure formulering waarbij de stroming in slechts één richting toegestaan wordt.



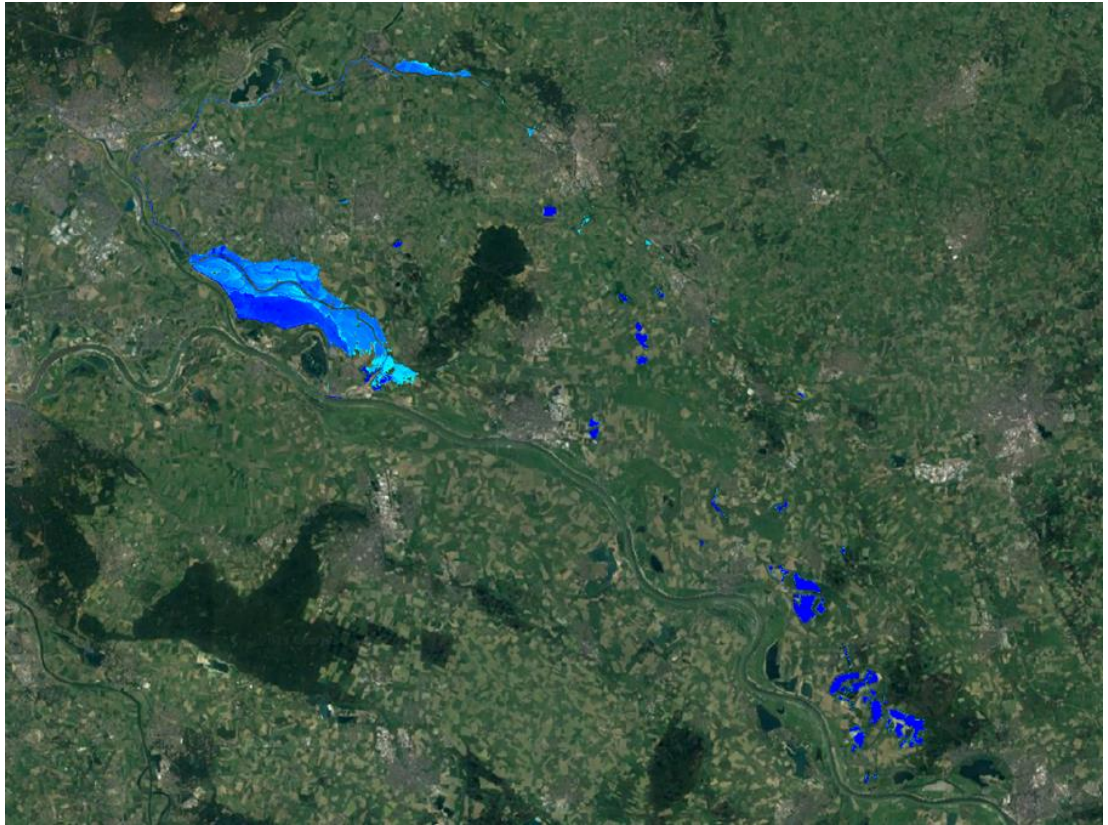
Figuur 4.16 Maximum inundatie dieptes dijkdoorbraak Herwen, Lobith $Q_{\text{piek}}=18000 \text{ m}^3/\text{s}$

Figuur 4.23 toont de afvoeren bij de uitstroompunten van het beheersgebied van het waterschap in dijkkring 48. Alleen voor de Oude IJssel is in de simulatie een debiet op de bovenranden opgelegd (totaal $9.2 \text{ m}^3/\text{s}$). Voor de overige kleine watergangen in dijkkring 48 is door middel van een restart file gezorgd voor een initiële conditie rond streefpeil, maar verder is geen extra lateraal debiet opgedrukt. De afvoeren op deze overige locaties in de overstromingssimulatie zijn dus afkomstig van de dijkdoorbraak. Het blijkt dat de afvoer vanaf 3 dagen na de dijkdoorbraak vooral bij Kandia onder vrij verval plaatsvindt (met een maximum van iets boven de $70 \text{ m}^3/\text{s}$).

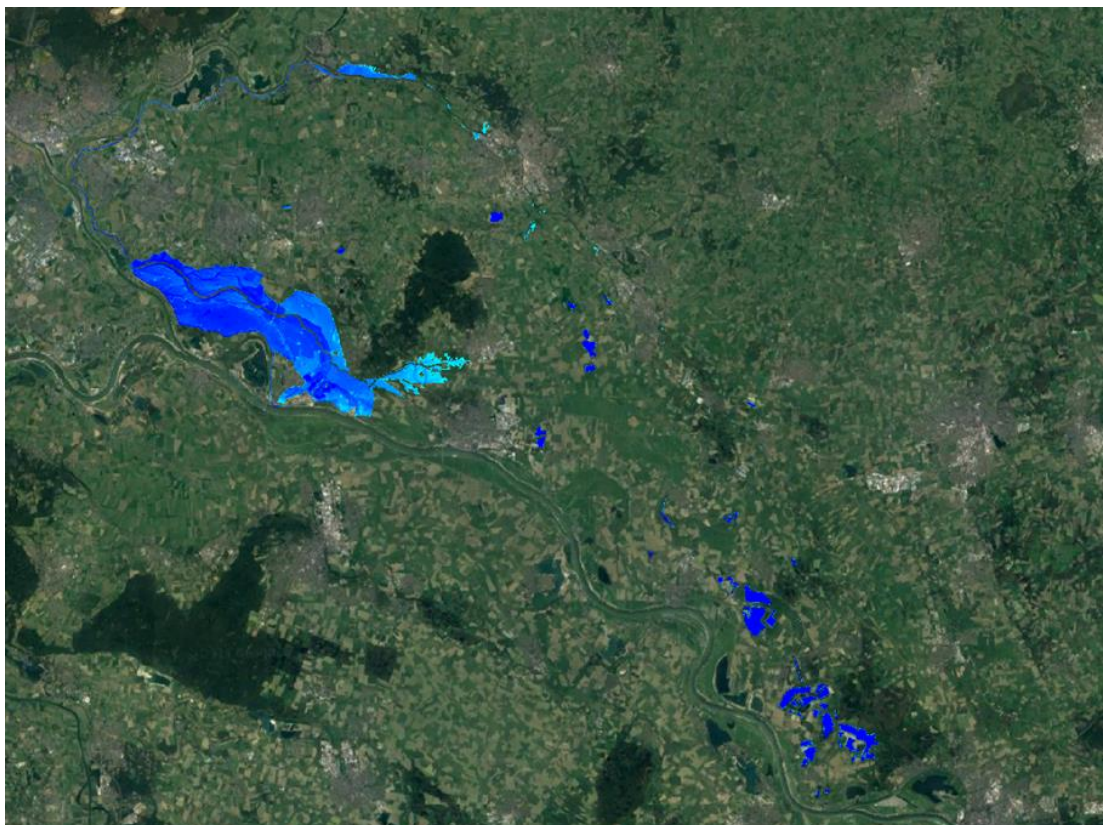
Bij de stuw bij Doesburg komt door de afvoerpiek op de IJssel water naar binnen (tot max. 40 m³/s) en stroomt er zodra de waterstand op de IJssel gaat zakken weer water van de Oude IJssel naar de IJssel, met een maximum debiet van ongeveer 20 m³/s. Vanaf 26 november (11 dagen na de piekafvoer bij Lobith) is het Oude IJsseldebiet vrijwel terug op het opgedrukte debiet op de bovenranden van de Oude IJssel.



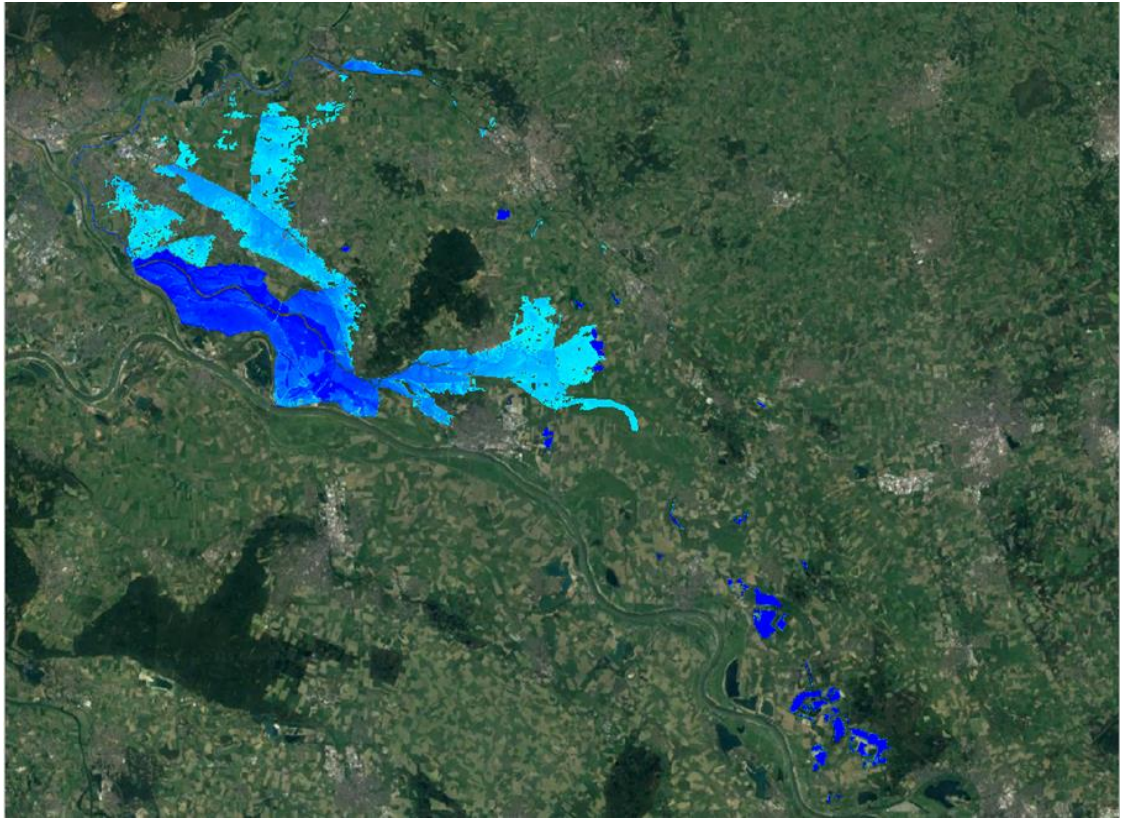
Figuur 4.17 Bresbreedte (rechteras) en cumulatief volume (linkeras) door de bres, Herwen som 1



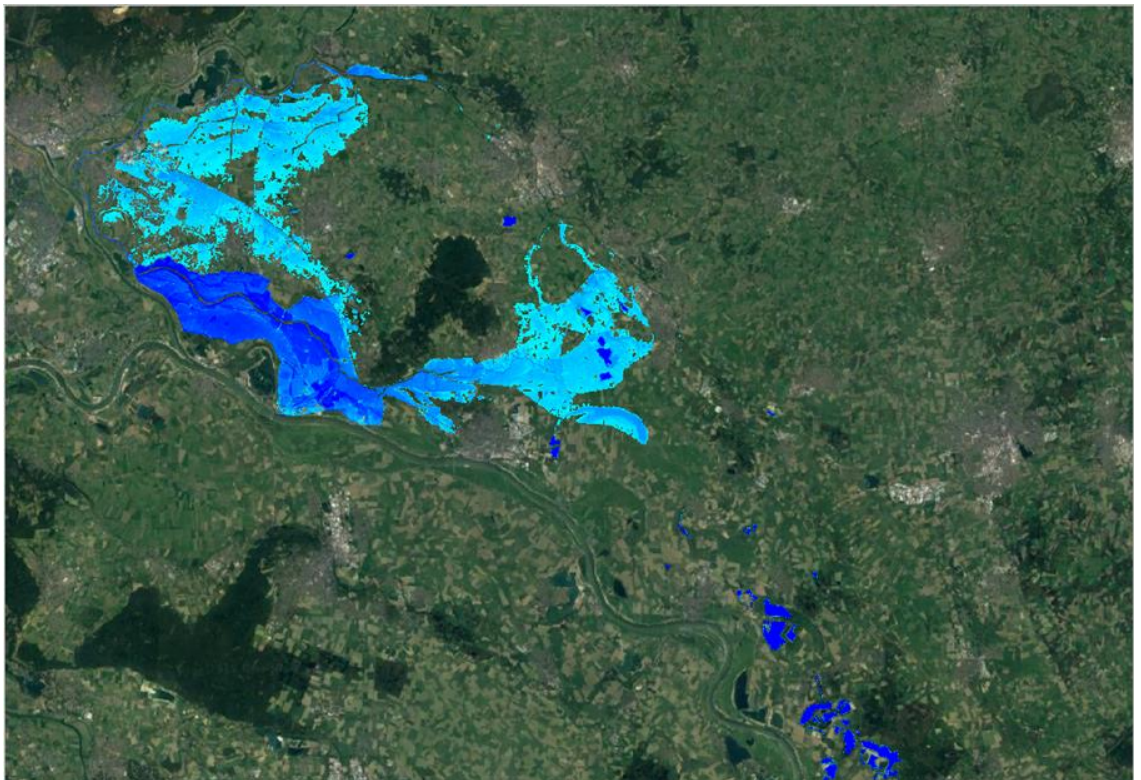
Figuur 4.18 Inundatiepatroon na 1 dag, doorbraak bij Herwen



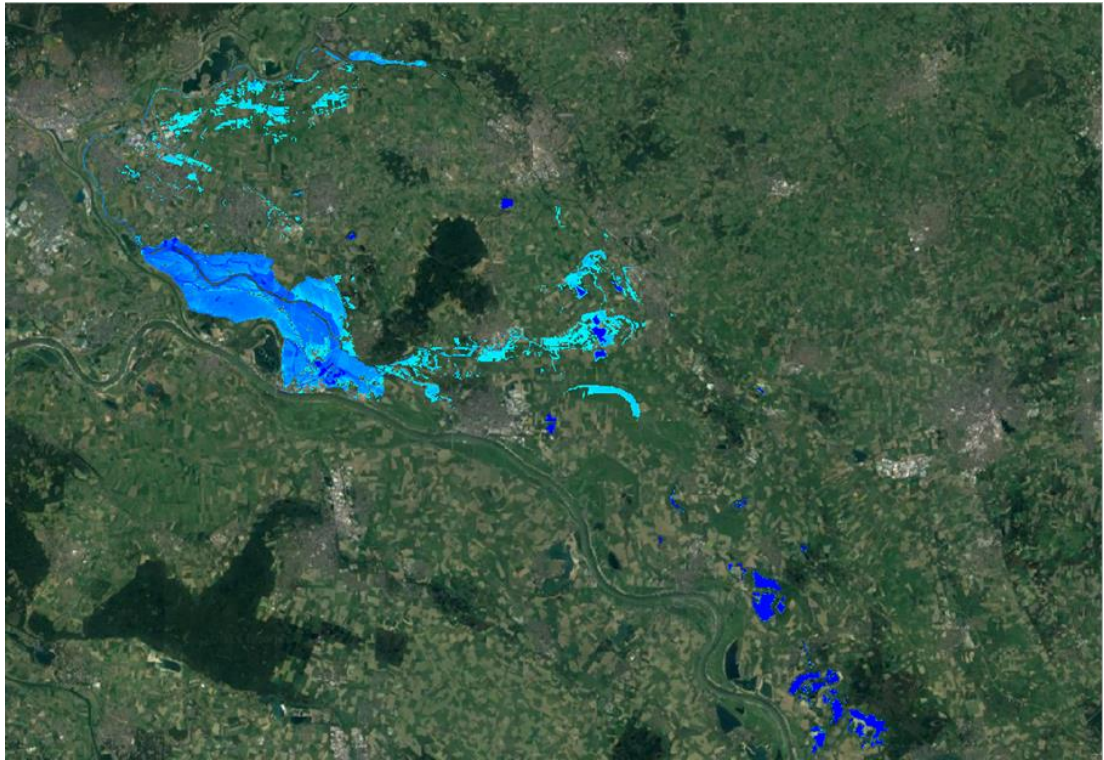
Figuur 4.19 Inundatiepatroon na 2 dagen, doorbraak bij Herwen



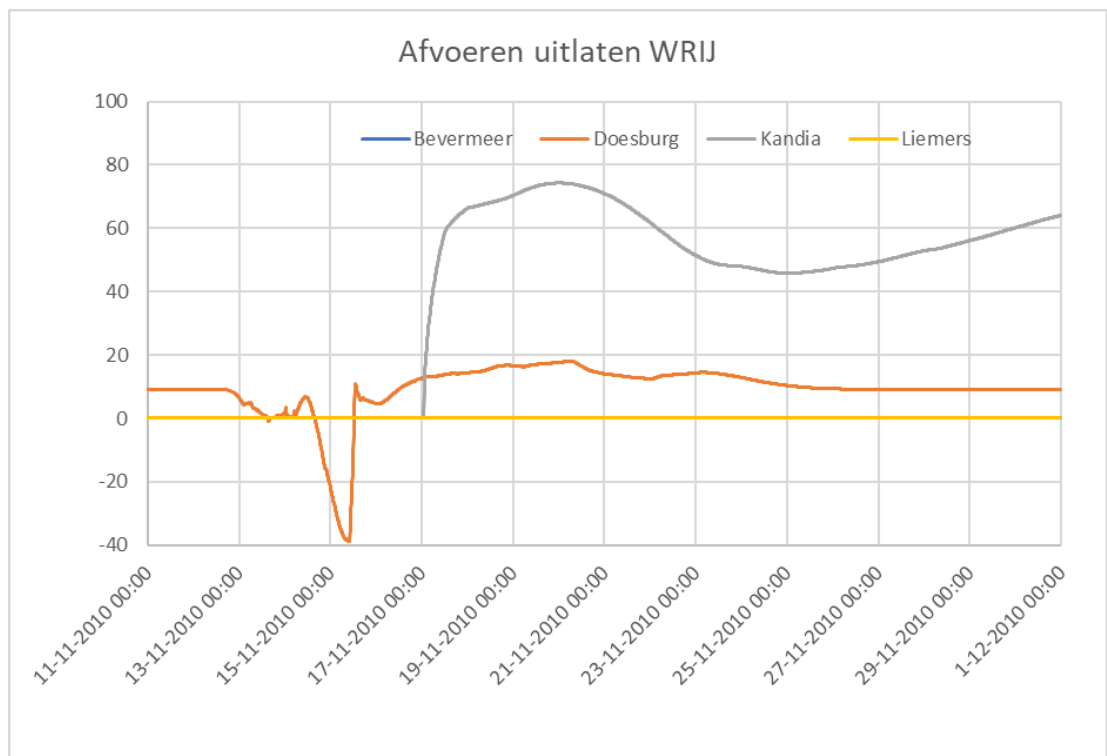
Figuur 4.20 Inundatiepatroon na 4 dagen, doorbraak bij Herwen



Figuur 4.21 Inundatiepatroon na 7 dagen, doorbraak bij Herwen



Figuur 4.22 Inundatiepatroon na 15 dagen, doorbraak bij Herwen



Figuur 4.23 Afvoeren Bevermeer, Doesburg, Kandia en Liemers voor doorbraak Herwen

4.4.2

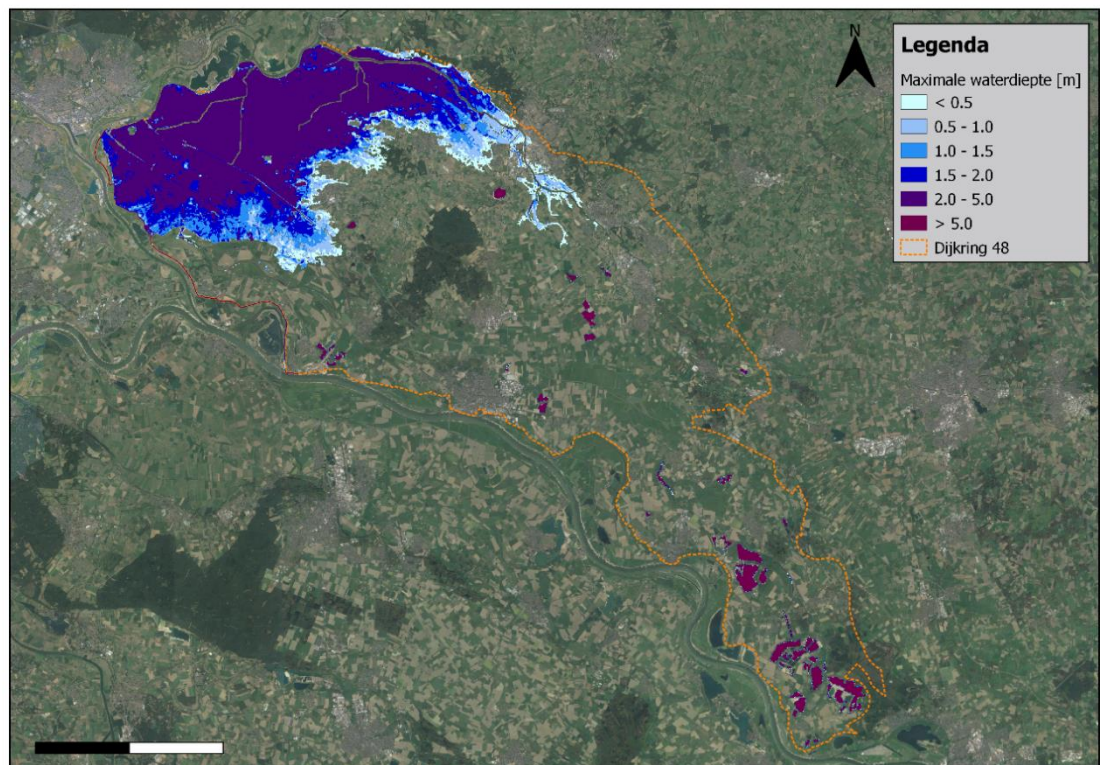
Som 2: Dijkdoorbraak Loo

Tabel 4.3 geeft een beknopt overzicht van de belangrijkste resultaten van de dijkdoorbraakberekening voor Loo. De tijdverloop van de bresbreedte en het bij de bres binnengekomen volume wordt gegeven in Figuur 4.25.

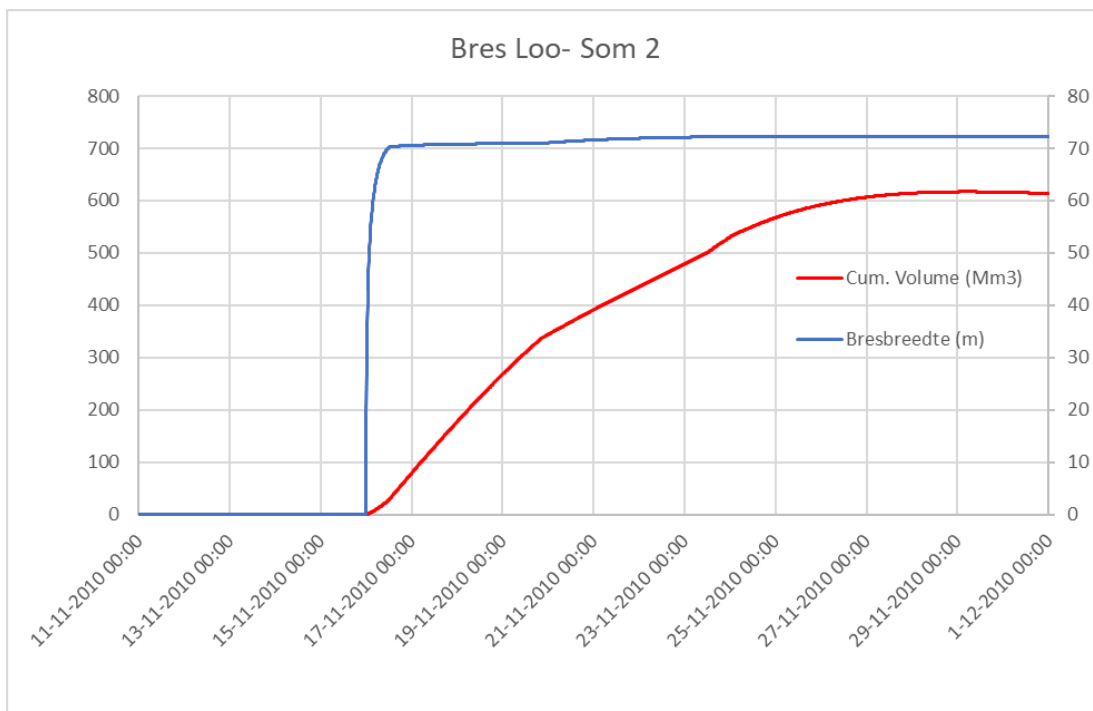
Figuur 4.24 laat de maximum inundatiedieptes zien, en Figuur 4.26 tot en met Figuur 4.30 tonen de inundatiepatronen na respectievelijk 1,2,4,7 en 15 dagen na het ontstaan van de bres. Figuur 4.31 bevat de afvoeren bij de uitstroompunten van WRIJ.

Tabel 4.3 Resultaten van de berekening som2 – dijkdoorbraak Loo, Lobith $Q_{\text{piek}}=14840 \text{ m}^3/\text{s}$ ($T=1000 \text{ jaar}$)

Som 2	
Type	Dijkdoorbraak Loo, referentie zanddijk
Herhalingsstijd afvoer bij Lobith	$T=1000 \text{ jaar}$, $Q=14840 \text{ m}^3/\text{s}$
Breslocatie	Loo
Maximale bresbreedte [m]	72.25m
Tijd tot 99% van de maximale bresbreedte	4 dagen en 20 uur
Maximum bresdebiet [m^3/s , gem. over 10 minuten]	1342 m^3/s
Totaal instroomvolume door bres (exclusief retourstroom)	617 Mm^3
Maximum geïnundeerd oppervlak	137 km^2
Maximum diepte in 2D grid (ROR klasse)	Tussen 2 en 5 m
Rekentijd totaal	54 uur 45 minuten
Rekentijd 1 dag na begin bres	4 uur 2 minuten
Rekentijd 2 dagen na begin bres	10 uur 59 minuten



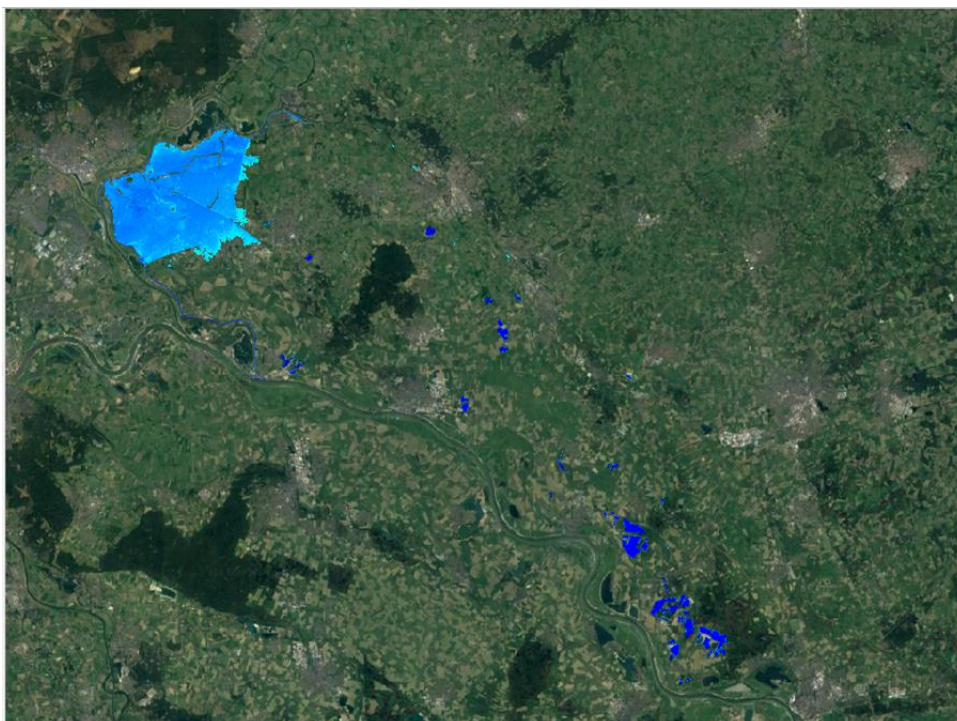
Figuur 4.24 Maximum inundatie dieptes Dijkdoorbraak Loo, $T=1000 \text{ jaar}$



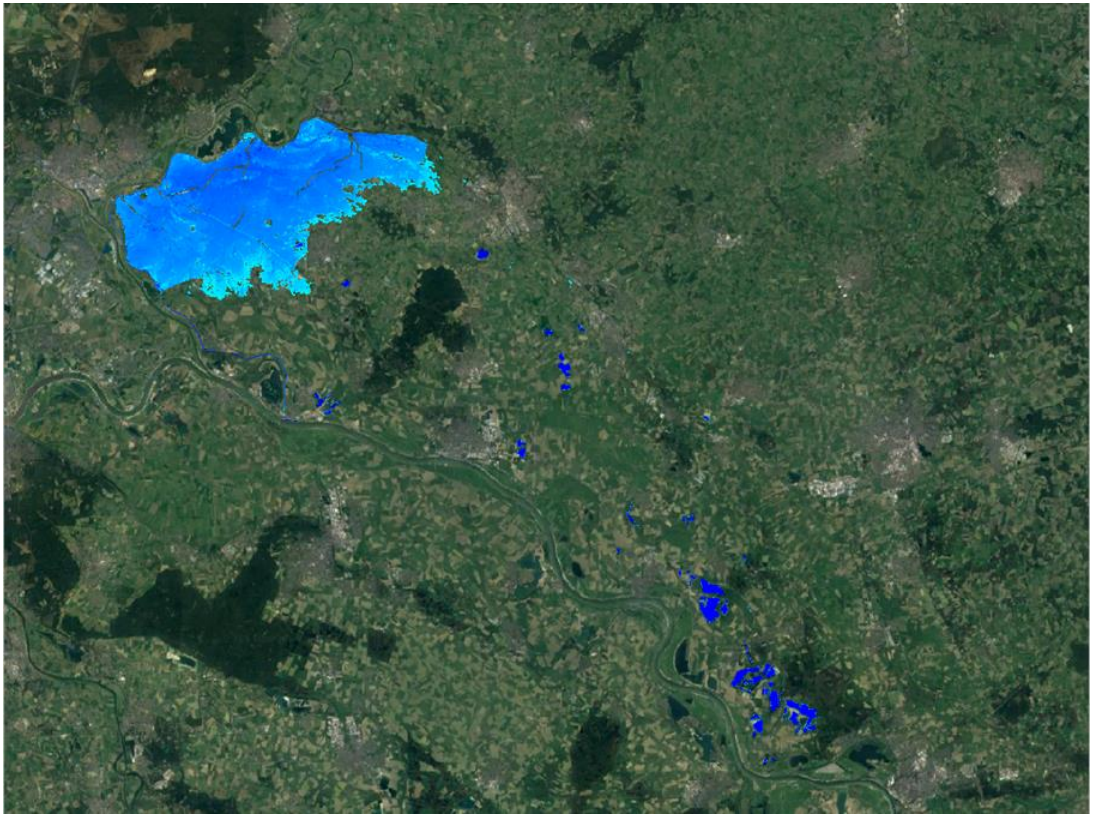
Figuur 4.25 Bresbreedte (rechteras) en cumulatief volume (linkeras) door de bres, Loo som 2

De bresbreedte groeit tot ruim 72 meter. In deze som breekt de dijk door op het moment dat de afvoer bij Lobith maximaal is (14840 m³/s).

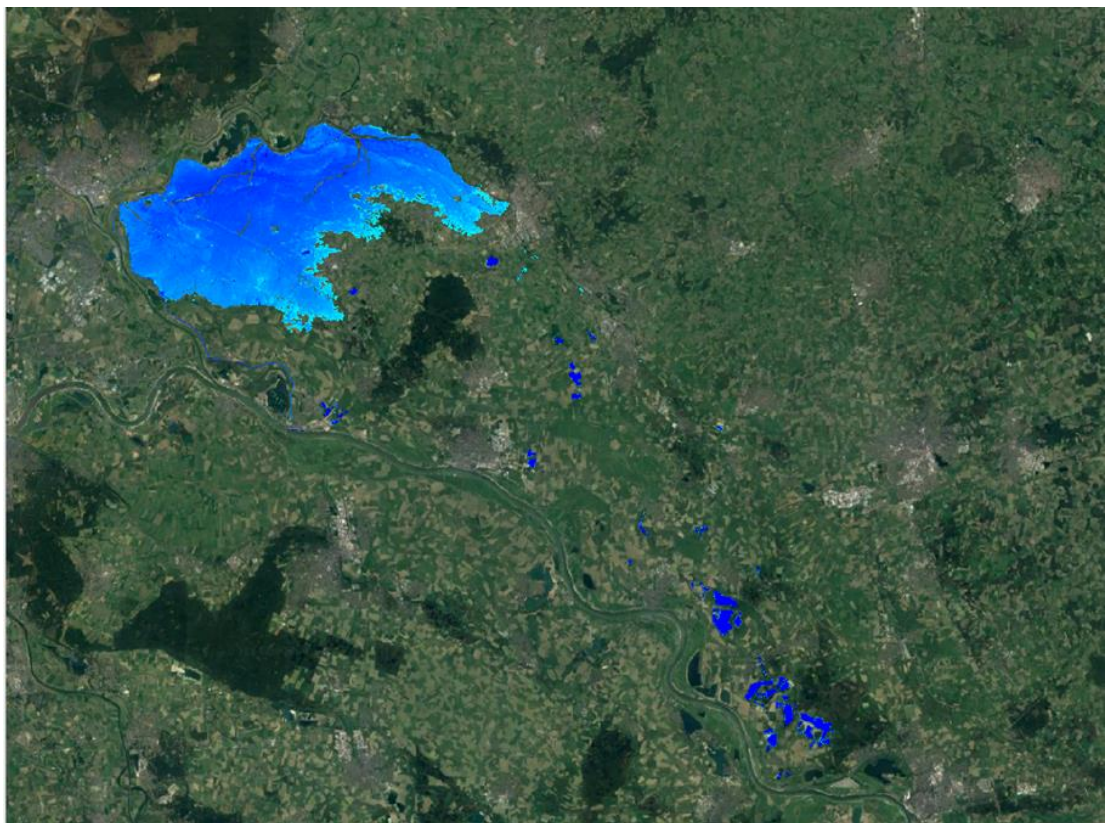
Door de bredere en diepere bres in som 2 (Loo) komt in vergelijking met som 1 (Herwen), ondanks de lagere Rijnaflow en het latere moment van doorbreken, een groter piekdebiet en een groter volume door de bres.



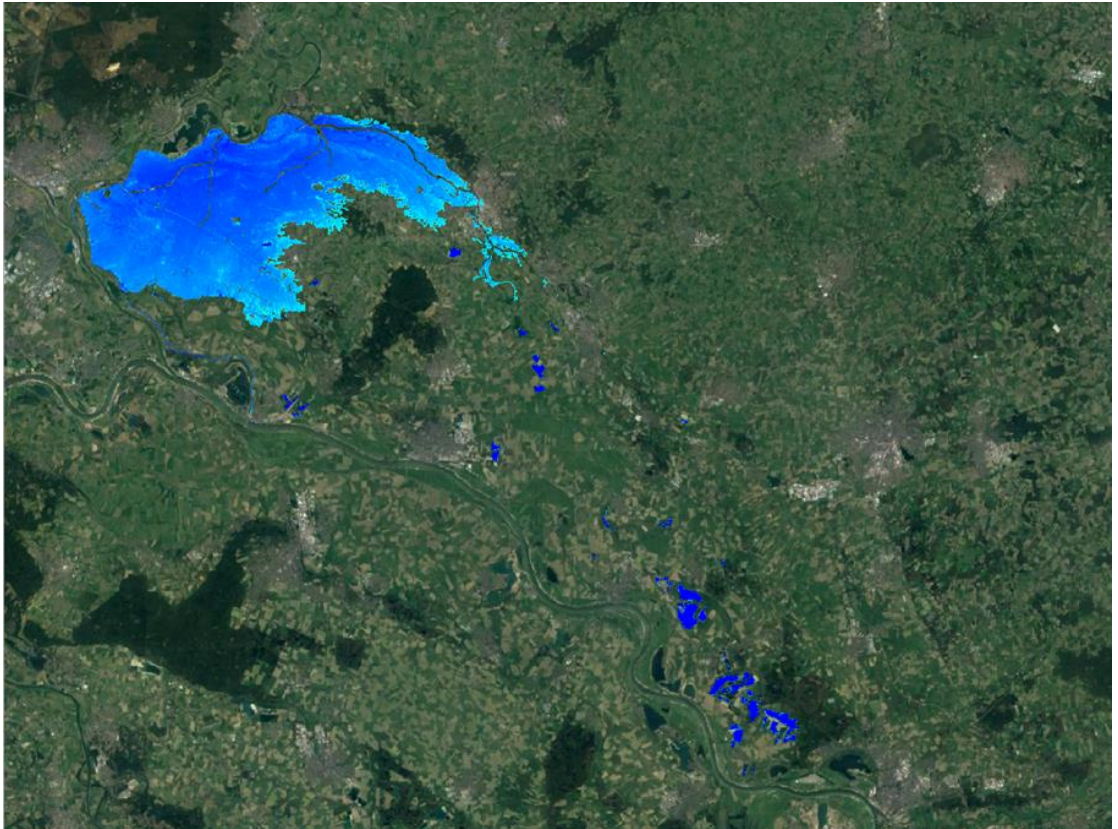
Figuur 4.26 Inundatiepatroon na 1 dag, dijkdoorbraak Loo som2



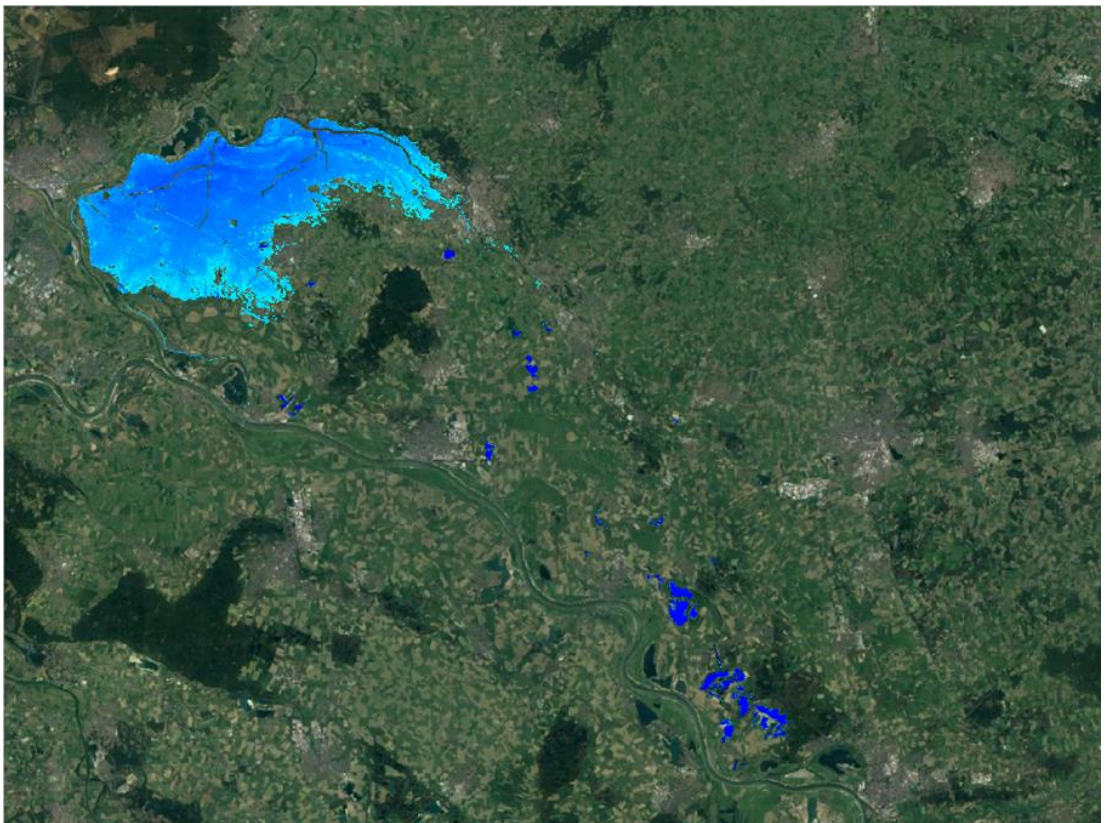
Figuur 4.27 Inundatiepatroon na 2 dagen, dijkdoorbraak Loo som2



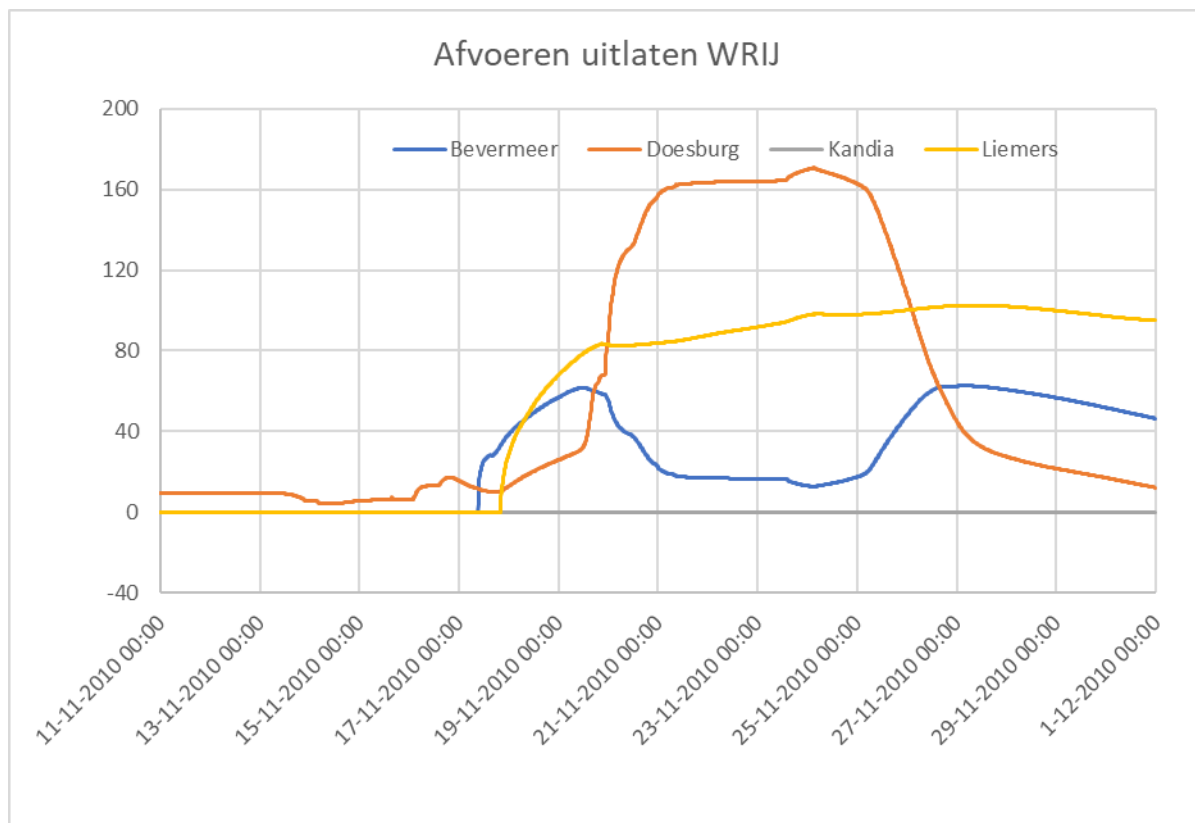
Figuur 4.28 Inundatiepatroon na 4 dagen, dijkdoorbraak Loo som2



Figuur 4.29 Inundatiepatroon na 7 dagen, dijkdoorbraak Loo som2



Figuur 4.30 Inundatiepatroon na 15 dagen, dijkdoorbraak Loo som2

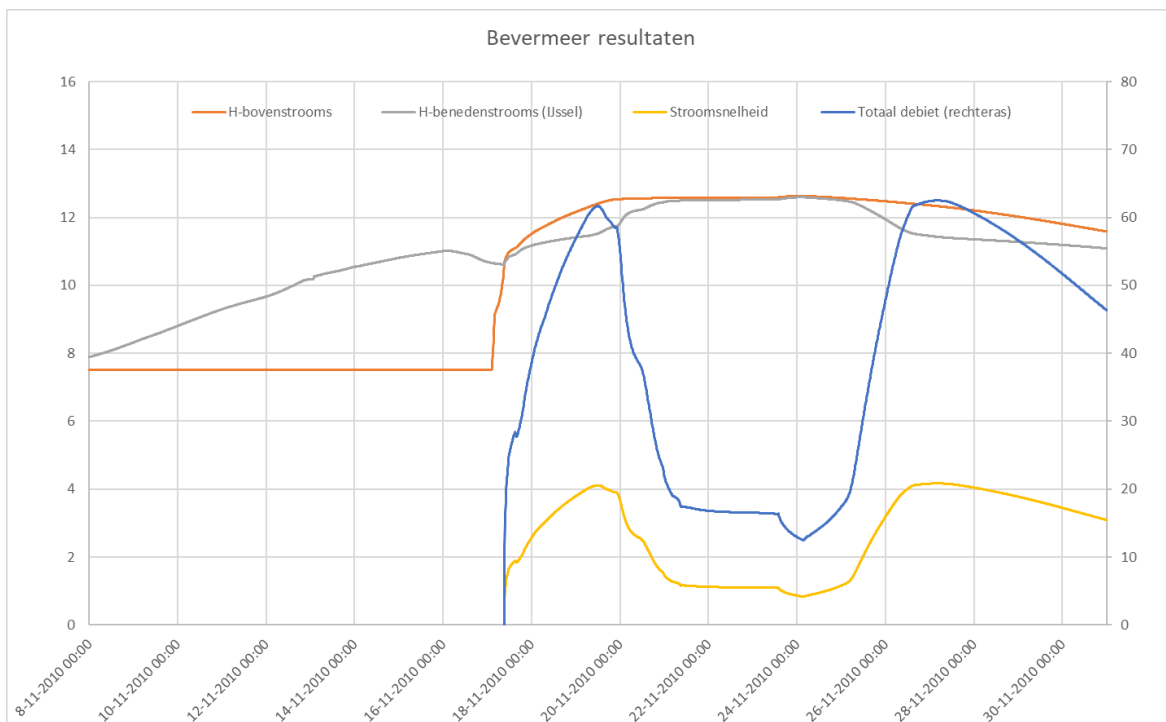


Figuur 4.31 Afvoeren Bevermeer, Doesburg, Kandia en Liemers voor doorbraak Loo, som 2

Het noordelijk gebied van dijkkring 48 overstroomt langdurig en is aan het eind van de simulatieperiode nog lang niet drooggevalen. De uitlaat vindt plaats via de uitstroompunten Liemers (Giesbeek), Bevermeer (bij Doesburg) en Oude IJssel bij Doesburg.

In deze som met $T=1000$ afvoergolf stroomt, in tegenstelling tot som 1 met een extremere afvoergolf, geen water over de stuw bij Doesburg van de IJssel naar de Oude IJssel. Er wordt dus alleen water geloosd van de Oude IJssel naar de IJssel. De piekafvoer op de Oude IJssel naar de IJssel is ruim $160 \text{ m}^3/\text{s}$ bij een kruinhoogte van de stuw van $+10.0 \text{ m NAP}$. Het meenemen van sturing bij de stuw Doesburg zal de resultaten nog beïnvloeden en de overstromingsduur reduceren. De stuw blijft nu immers met een kruinhoogte van $+10.00 \text{ m NAP}$ opereren, terwijl het peil op de IJssel na de afvoergolf op 1 december al gezakt is naar $+9.42 \text{ m NAP}$ (bij een bovenstrooms peil op de Oude IJssel van $+10.44 \text{ m NAP}$). De stuw kan dus al verder geopend worden, waardoor meer water kan worden afgevoerd naar de IJssel, en het peil op de Oude IJssel en in de overstroomde gebieden sneller daalt. Voor verdere analyse van overstromingsscenario's is dit een aandachtspunt.

Verder geldt voor Bevermeer dat de uitstroom een dip vertoont (zie Figuur 4.32). Deze dip wordt verklaard door het verschil in bovenstroomse en benedenstroomse waterstand. De afvoer via Bevermeer begint voordat de piekwaterstand op het Broekhuizerwater is bereikt en neemt eerst toe. Daarna neemt het verschil in waterstand echter af, en dus neemt de afvoer af. Als de afvoer over de stuw Doesburg naar de IJssel afneemt, zijn de peilen op Oude IJssel en Broekhuizerwater wat gezakt en kan de afvoer Bevermeer weer toenemen. De maximale stroomsnelheden die worden berekend bij Bevermeer zijn 4 m/s (bij default afvoercoëfficiënten van de general structure van 1.0). Als de afvoer of de snelheid te hoog wordt geacht, kan deze door bijstelling van de afvoercoëfficiënten verlaagd worden.



Figuur 4.32 Resultaten Bevermeer voor doorbraak Loo, som 2

4.4.3 Som 3: Dijkdoorbraak Loo: gevoeligheid zand/kleidijk bresgroei

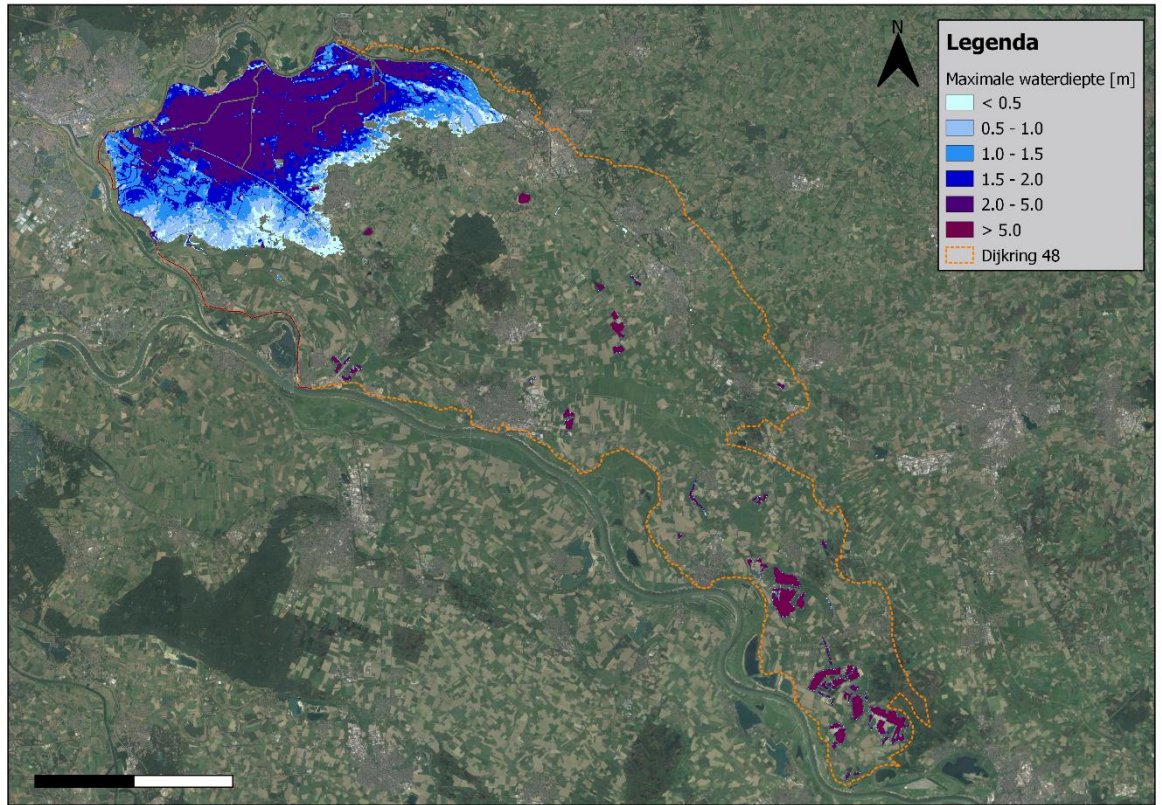
Tabel 4.4 geeft een overzicht van de belangrijkste resultaten van de dijkdoorbraakberekening voor Loo met bresgroei-formulering met kleidijkparameters.

Figuur 4.33 laat de maximum inundatiedieptes zien. Het tijdsverloop van de bresbreedte en het bij de bres binnengekomen volume wordt gegeven in Figuur 4.34. Figuur 4.35 tot en met Figuur 4.39 tonen de inundatiepatronen na respectievelijk 1,2,4,7 en 15 dagen na het ontstaan van de bres. Figuur 4.40 bevat de afvoeren bij de uitstroompunten van WRIJ.

Tabel 4.4 Resultaten van de berekening som3 – gevoeligheid dijkdoorbraak Loo, kleidijk

Som 3	
Type	Dijkdoorbraak Loo, kleidijk
Herhalingstijd afvoer bij Lobith	T=1000 jaar, Q=14840 m ³ /s
Breslocatie	Loo
Maximale bresbreedte [m]	58.67 m
Tijd tot 99% van de maximale bresbreedte	8 dagen 3 uur
Maximum bresdebiet [m ³ /s, gem. over 10 minuten]	482 m ³ /s
Totaal instroomvolume door bres (exclusief retourstroom)	361 Mm ³
Maximum geïnundeerd oppervlak	111 km ²
Maximum diepte in 2D grid (ROR klasse)	Tussen 2 en 5 m
Rekentijd totaal	41 uur 57 minuten
Rekentijd 1 dag na begin bres	2 uur 22 minuten
Rekentijd 2 dagen na begin bres	5 uur 10 minuten

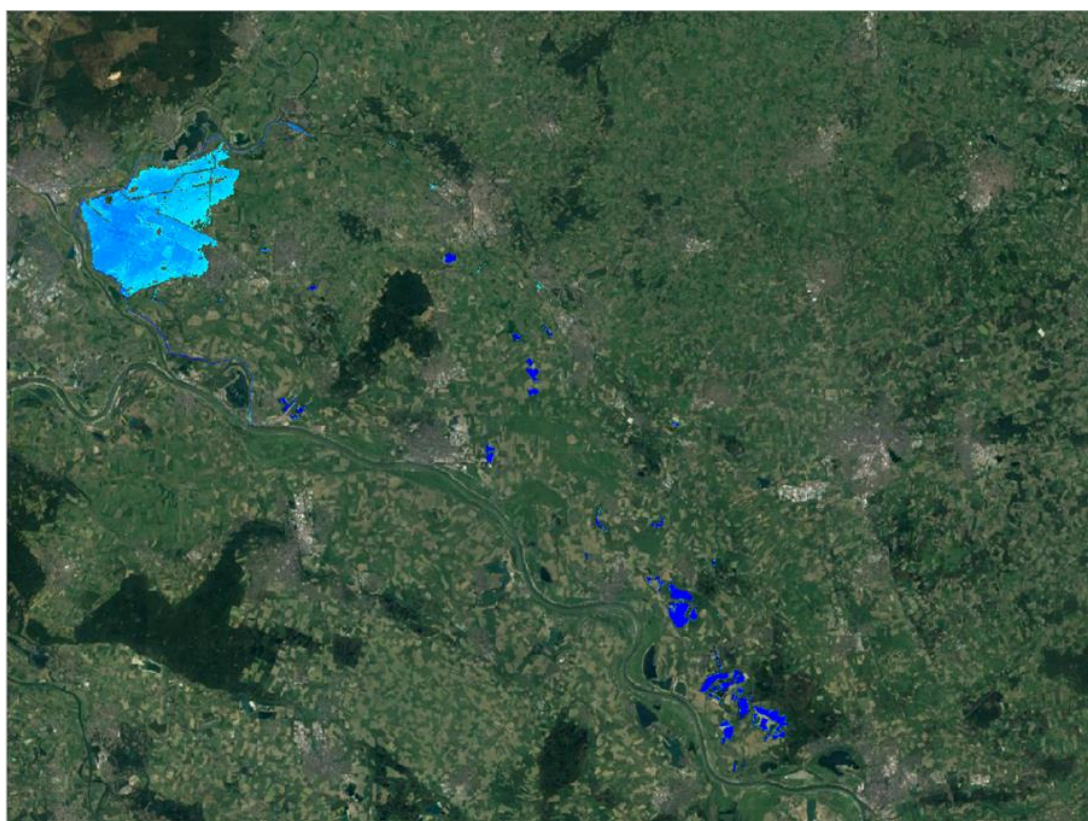
Uit de resultaten blijkt dat de bres minder snel groeit in de breedte met de typische kleidijk parameterwaarden dan bij gebruik van de zanddijk parameterwaarden. Het maximum debiet door de bres en het totaal volume door de bres is in som 3 (kleidijk) veel kleiner dan in som 2 (zanddijk), de bres blijft 13.6 m smaller (19% minder breed dan som 2) en het totaal volume dat door de bres stroomt is 256 Mm³ (42% lager dan som 2). Dit is ook terug te zien in de resultaten voor de maximale diepte, waar een kleiner gebied dieptes tussen 2 en 5 meter bereikt. De afvoer uit het gebied komt trager op gang en gebeurt vooral via de uitlaten Liemers en Bevermeer. De Oude IJssel (stuw bij Doesburg) voert nauwelijks extra water af in som 3 (dit in tegenstelling tot som 2 waarbij de Oude IJssel de grootste afvoer te verwerken krijgt).



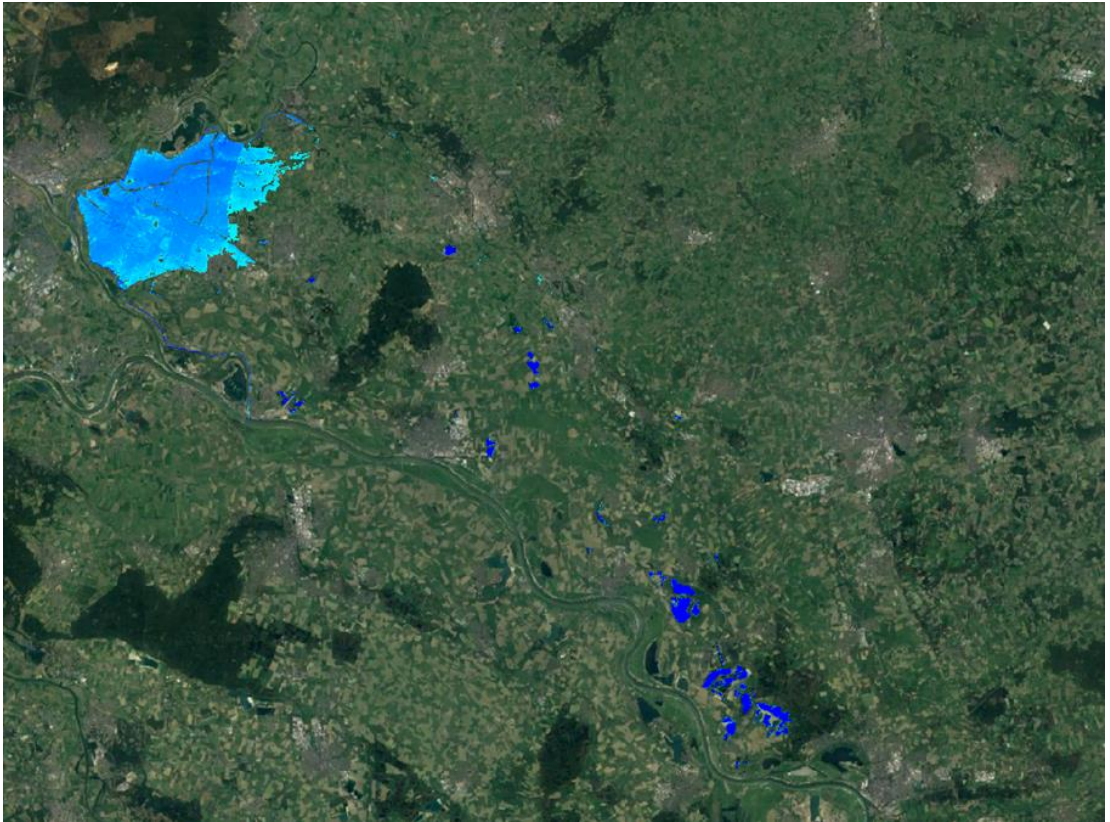
Figuur 4.33 Maximum inundatie dieptes Dijkdoorbraak Loo, Som3 kleidijk parameters, T=1000 jaar



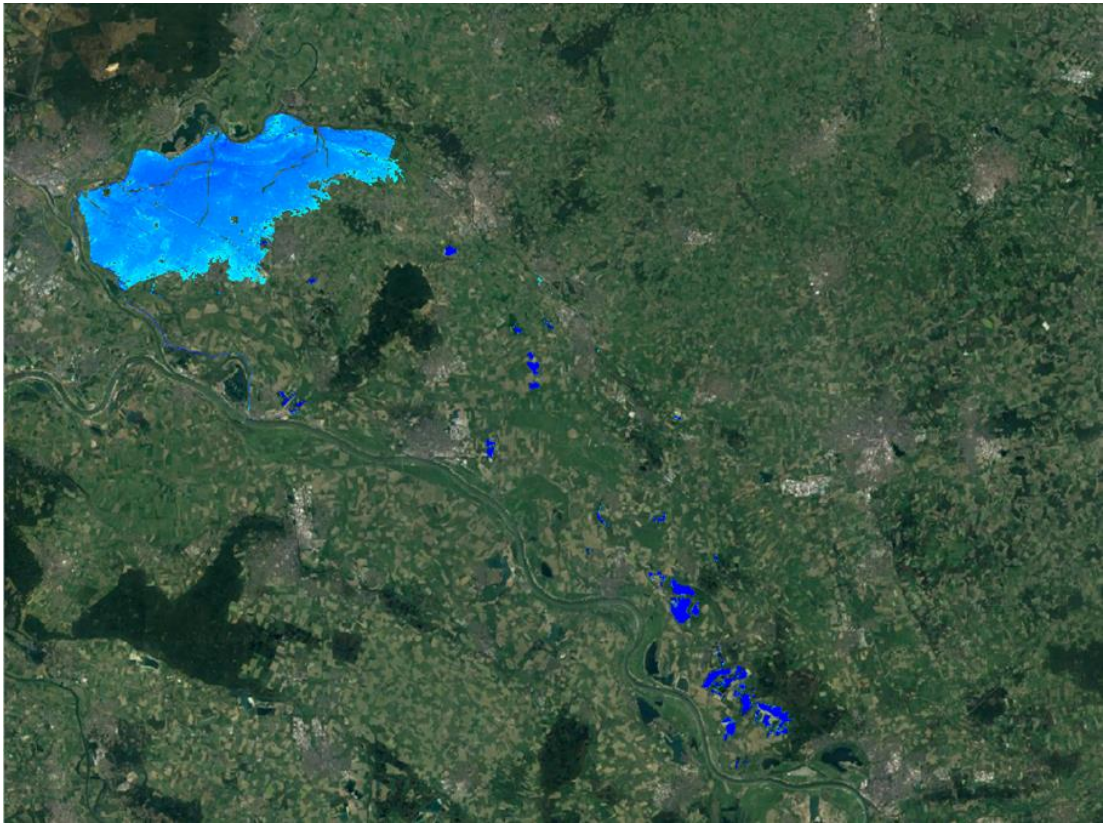
Figuur 4.34 Bresbreedte (rechteras) en cumulatief volume (linkeras) door de bres, Loo som3 kleidijk



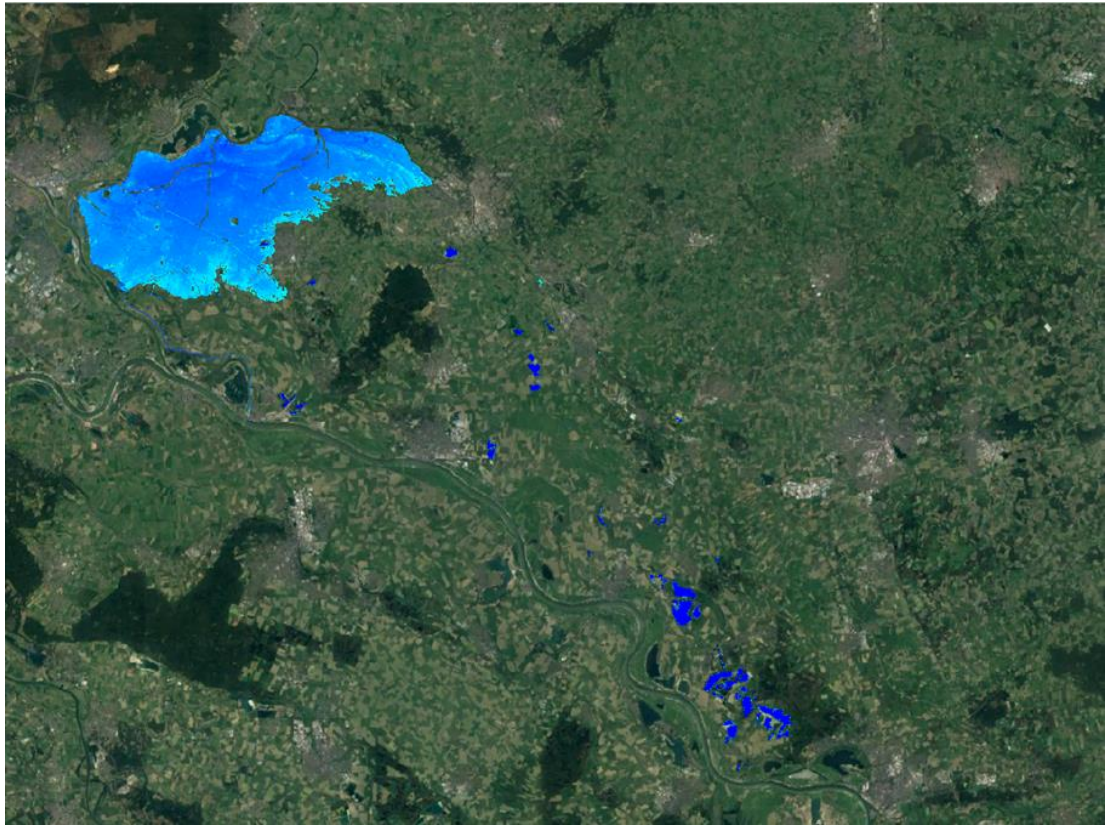
Figuur 4.35 Inundatiepatroon 1 dag na de dijkdoorbraak Loo, som3 kleidijk



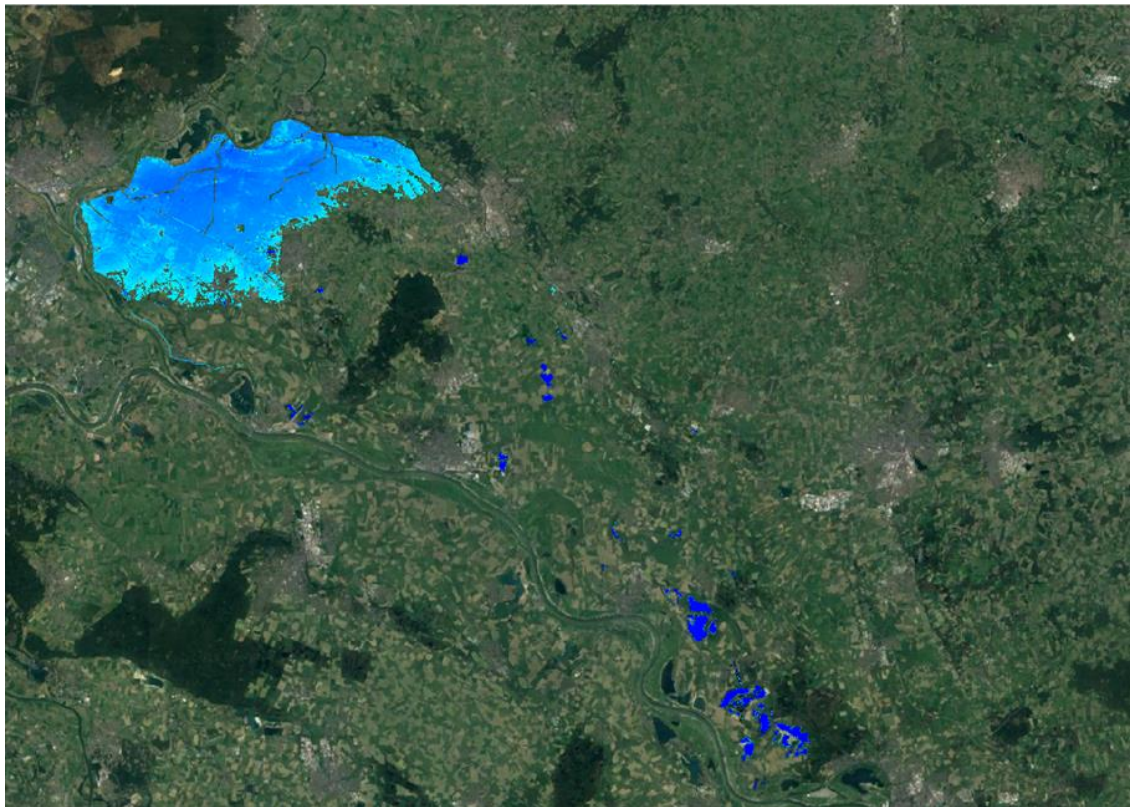
Figuur 4.36 Inundatiepatroon 2 dagen na de dijkdoorbraak Loo, som3 kleidijk



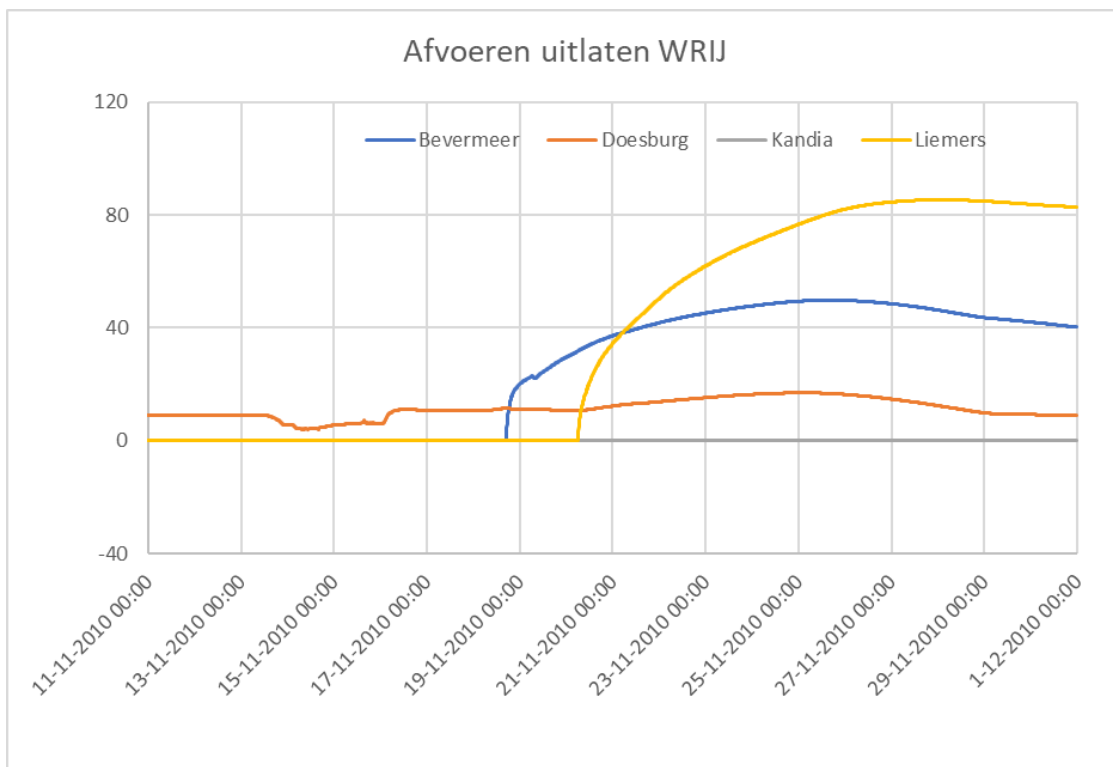
Figuur 4.37 Inundatiepatroon 4 dagen na de dijkdoorbraak Loo, som3 kleidijk



Figuur 4.38 Inundatiepatroon 7 dagen na de dijkdoorbraak Loo, som3 kleidijk



Figuur 4.39 Inundatiepatroon 15 dagen na de dijkdoorbraak Loo, som3 kleidijk



Figuur 4.40 Afvoeren Bevermeer, Doesburg, Kandia en Liemers voor doorbraak Loo, som3 kleidijk

In vergelijking met som2 blijkt dat de afvoer bij Bevermeer en Doesburg veel lager blijft. Door het veel lagere instroomvolume bij de bres blijven de waterstanden op het Broekhuizerwater en de Oude IJssel voor de stuw Doesburg lager, en is de afvoer bij die locaties ook lager (en voor Bevermeer zonder de 'dip' die in som 2 wel zichtbaar is).

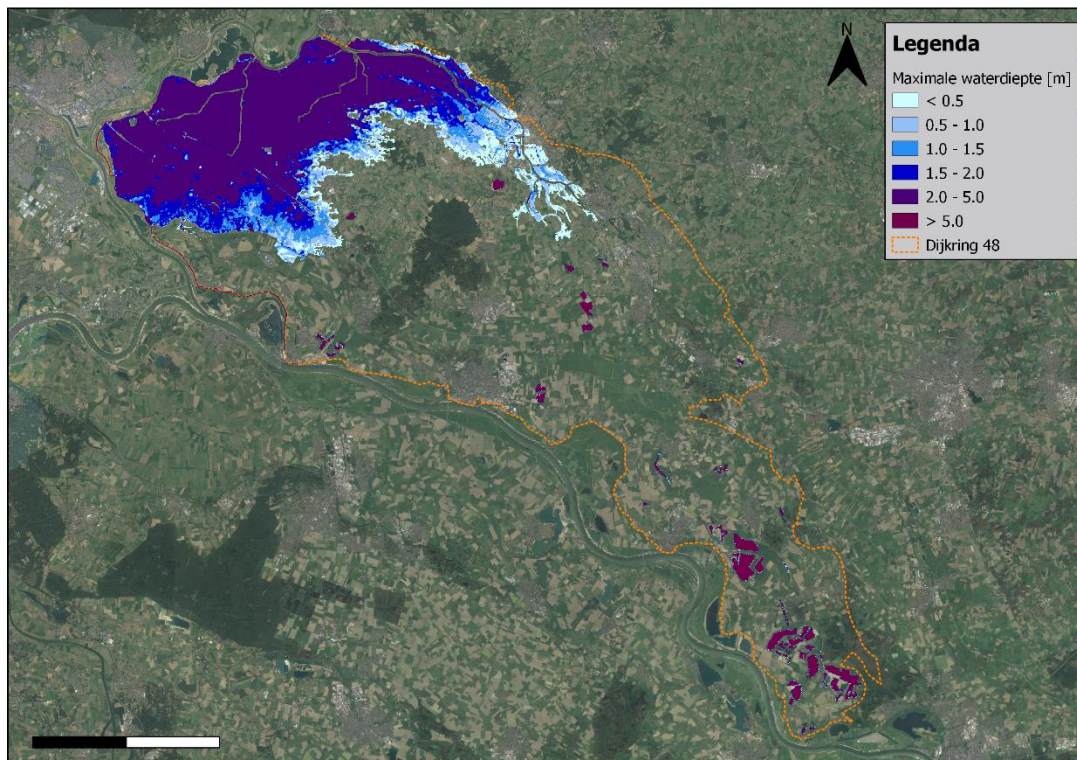
4.4.4 Som 4: Dijkdoorbraak Loo: gevoeligheid diepte bres

Tabel 4.5 geeft een overzicht van de belangrijkste resultaten van de dijkdoorbraakberekening voor Loo met bresgroeiformulering met een minder diepe bres. Figuur 4.41 laat de maximum inundatiedieptes zien. Het tijdsverloop van de bresbreedte en het bij de bres binnengekomen volume wordt gegeven in Figuur 4.42. Figuur 4.43 tot en met Figuur 4.47 tonen de inundatiepatronen na respectievelijk 1,2,4,7 en 15 dagen na het ontstaan van de bres. Figuur 4.48 bevat de afvoeren bij de uitstroompunten van WRIJ.

Tabel 4.5 Resultaten van de berekening som4 – gevoeligheid dijkdoorbraak Loo, diepte bres

Som 4	
Type	Dijkdoorbraak Loo, zanddijk
Herhalingstijd afvoer bij Lobith	T=1000 jaar, Q=14840 m ³ /s
Breslocatie	Loo
Maximale bresbreedte [m]	83.38 m
Tijd tot 99% van de maximale bresbreedte	2 dagen
Maximum bresdebiet [m ³ /s, gem. over 10 minuten]	1449 m ³ /s
Totaal instroomvolume door bres (exclusief retourstroom)	691 Mm ³
Maximum geïnundeerd oppervlak	144 km ²

Som 4	
Maximum diepte in 2D grid (ROR klasse)	Tussen 2 en 5 meter
Rekentijd totaal	69 uur 33 minuten
Rekentijd 1 dag na begin bres	5 uur 28 minuten
Rekentijd 2 dagen na begin bres	13 uur 7 minuten

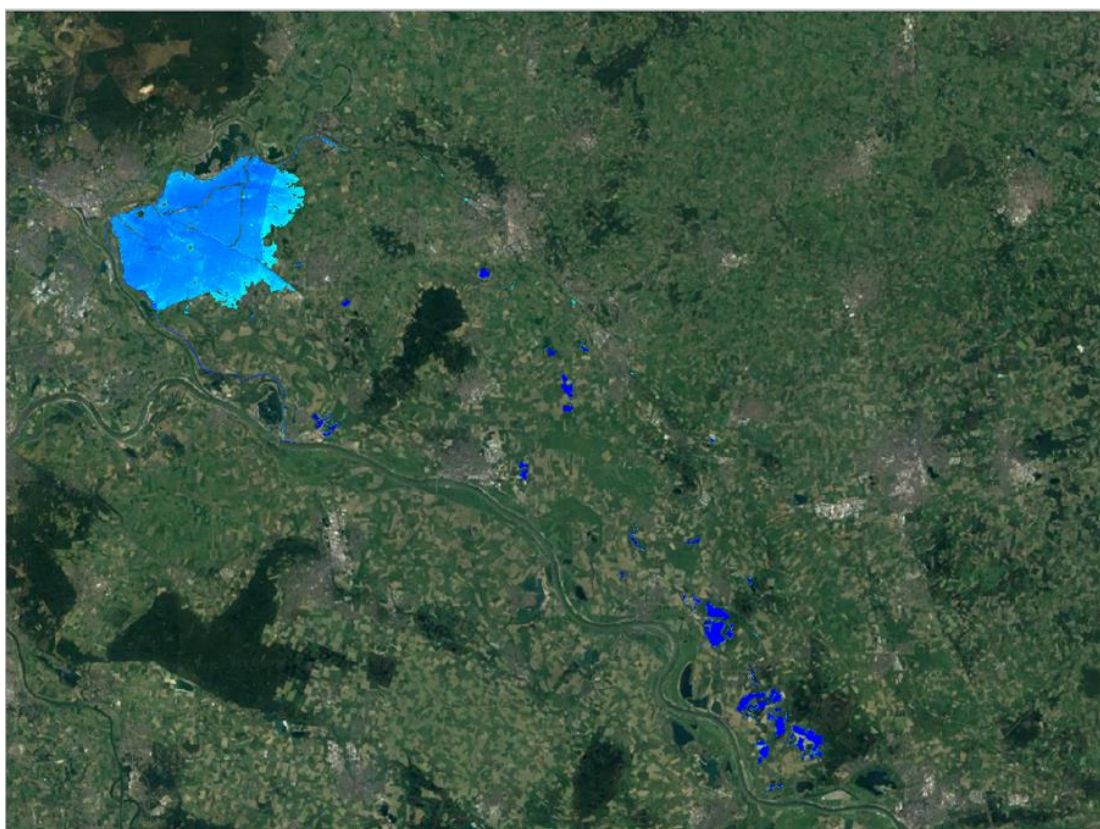


Figuur 4.41 Maximum inundatie dieptes Dijkdoorbraak Loo, gevoeligheid diepte bres

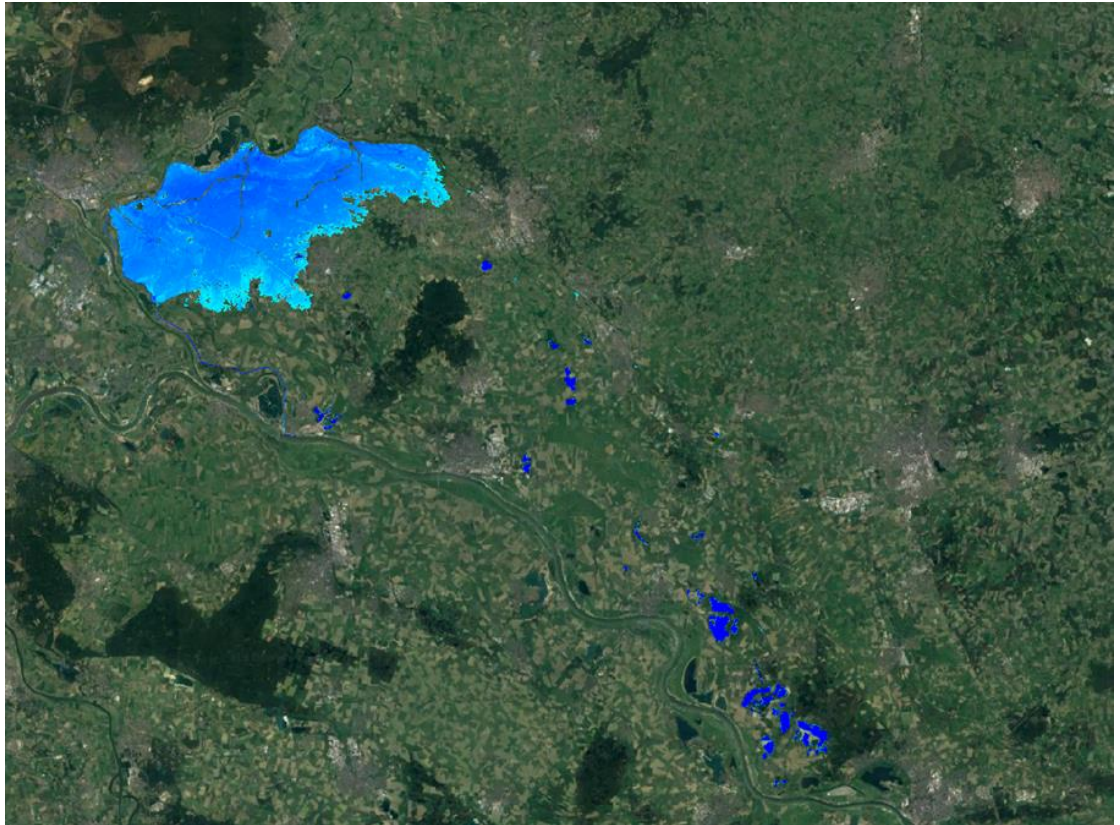
De minder diepe bres in deze som leidt tot een extra bresgroei in vergelijking met de referentiesom (som 2). Uiteindelijk blijkt een groter volume door de bres te stromen dan in de referentiesom. De één meter minder diepe bres wordt door extra bresgroei van meer dan 10 meter ruimschoots gecompenseerd. De bres groeit ook sneller naar de maximale bresbreedte (de 99% bresbreedte wordt na 2 dagen bereikt, terwijl dit in som 2 bijna 5 dagen duurt). Uiteindelijk leidt dit tot hogere afvoeren via de uitlaten Liemers, Bevermeer en Oude IJssel. Via de stuw bij Doesburg voert de Oude IJssel maximaal 185 m³/s af. Het verloop van de afvoeren lijkt veel op het verloop bij som 2, dat wil zeggen met een dip in de afvoeren van Bevermeer zoals reeds bij som 2 is uitgelegd. De optredende stroomsnelheden en afvoeren bij Bevermeer en Doesburg zijn nog iets hoger dan in som 2.



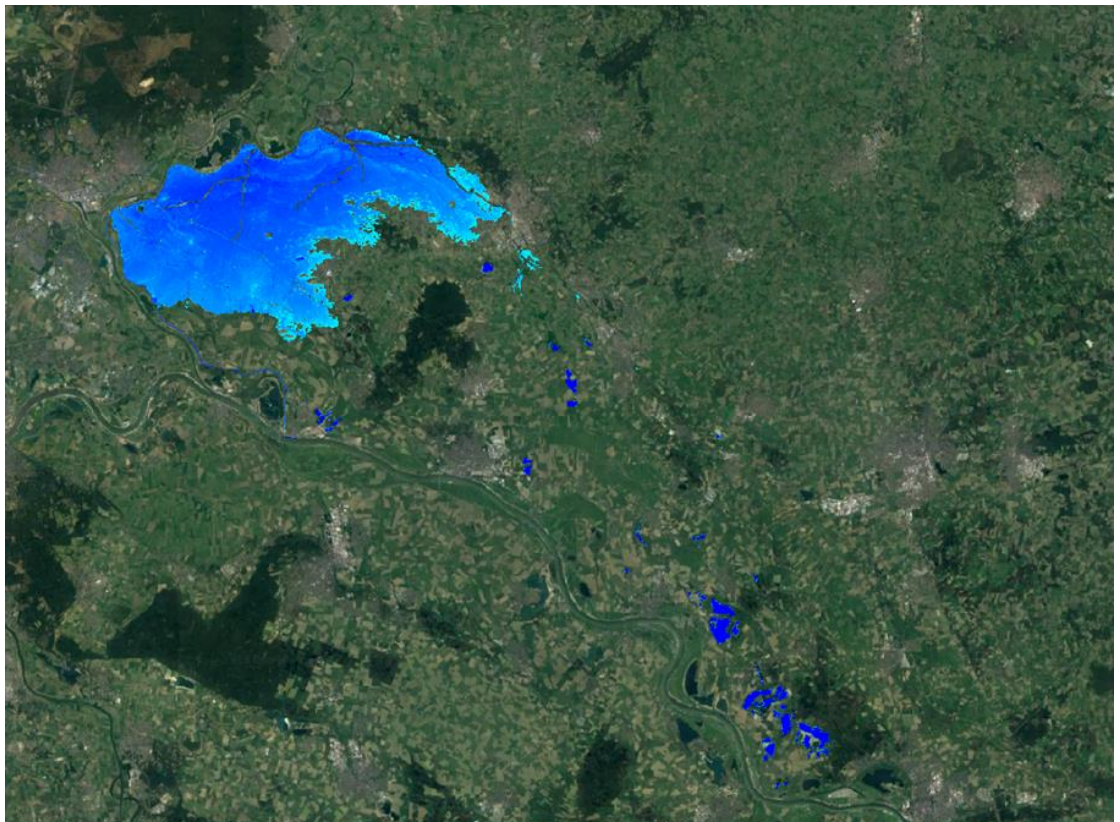
Figuur 4.42 Bresbreedte (rechteras) en cumulatief volume (linkeras) door de bres, Loo som4 minder diepe bres



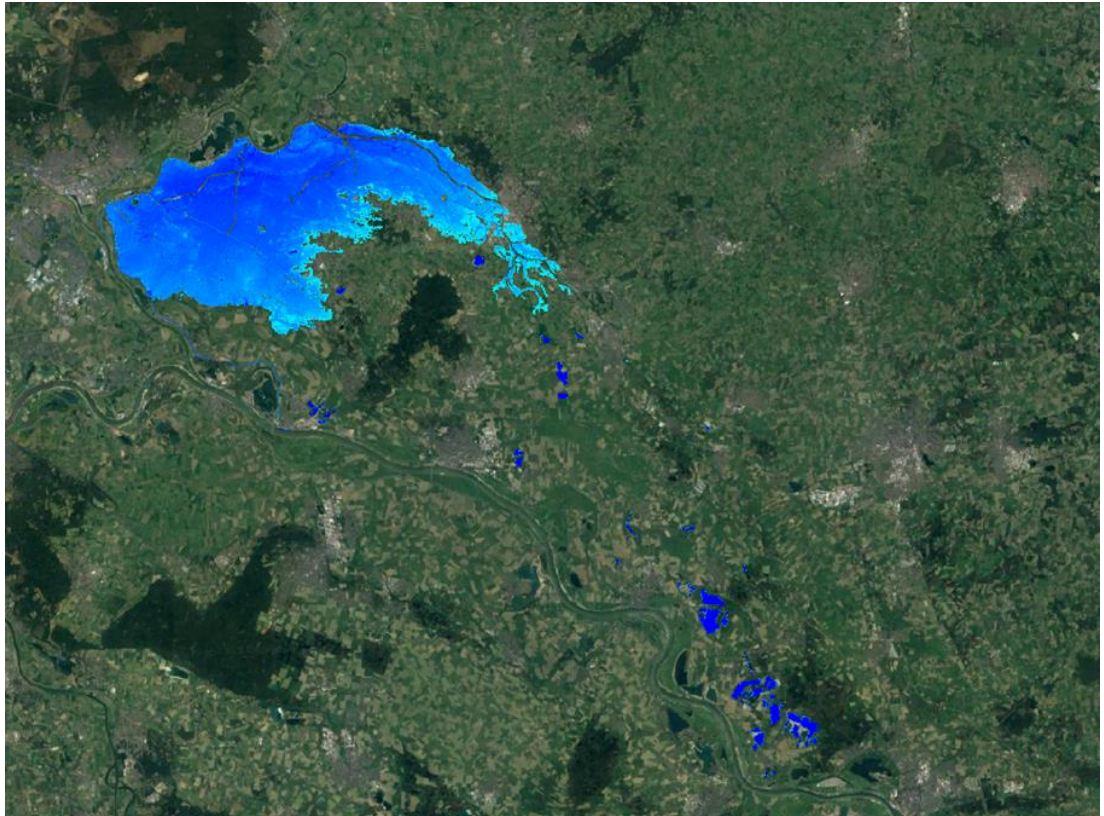
Figuur 4.43 Inundatiepatroon 1 dag na de dijkdoorbraak Loo, som4 minder diepe bres



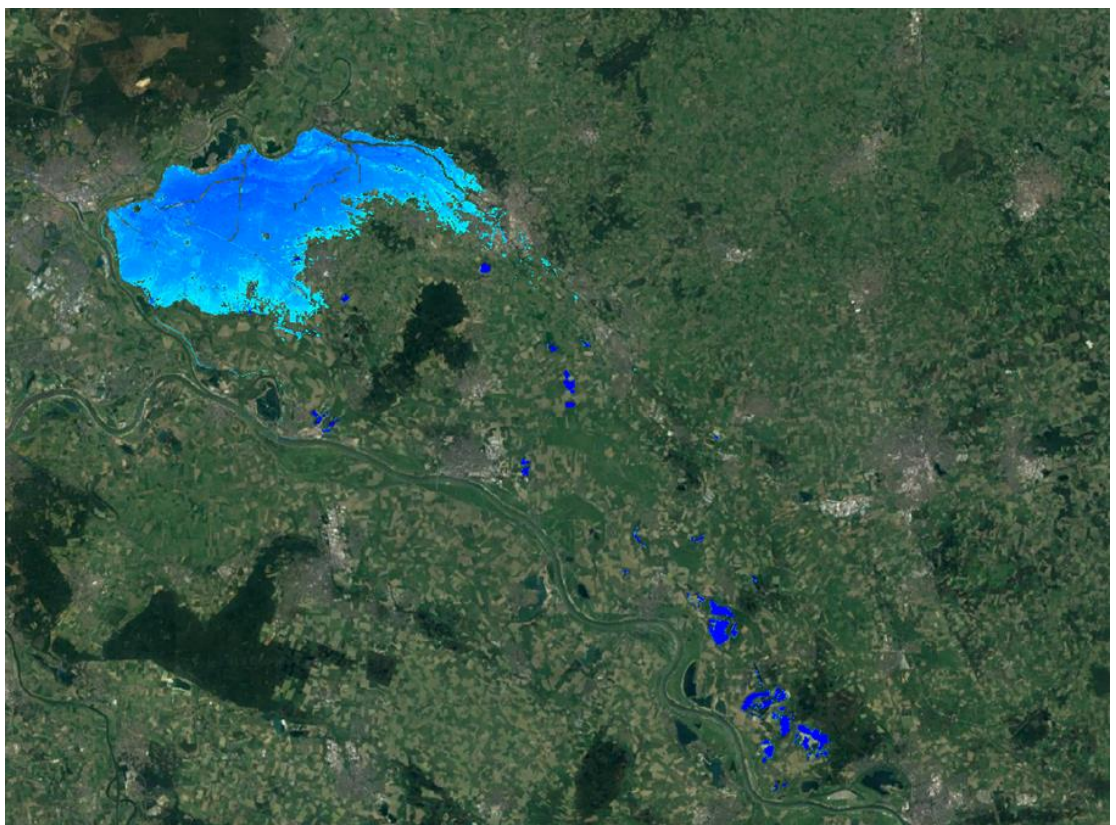
Figuur 4.44 Inundatiepatroon 2 dagen na de dijkdoorbraak Loo, som4 minder diepe bres



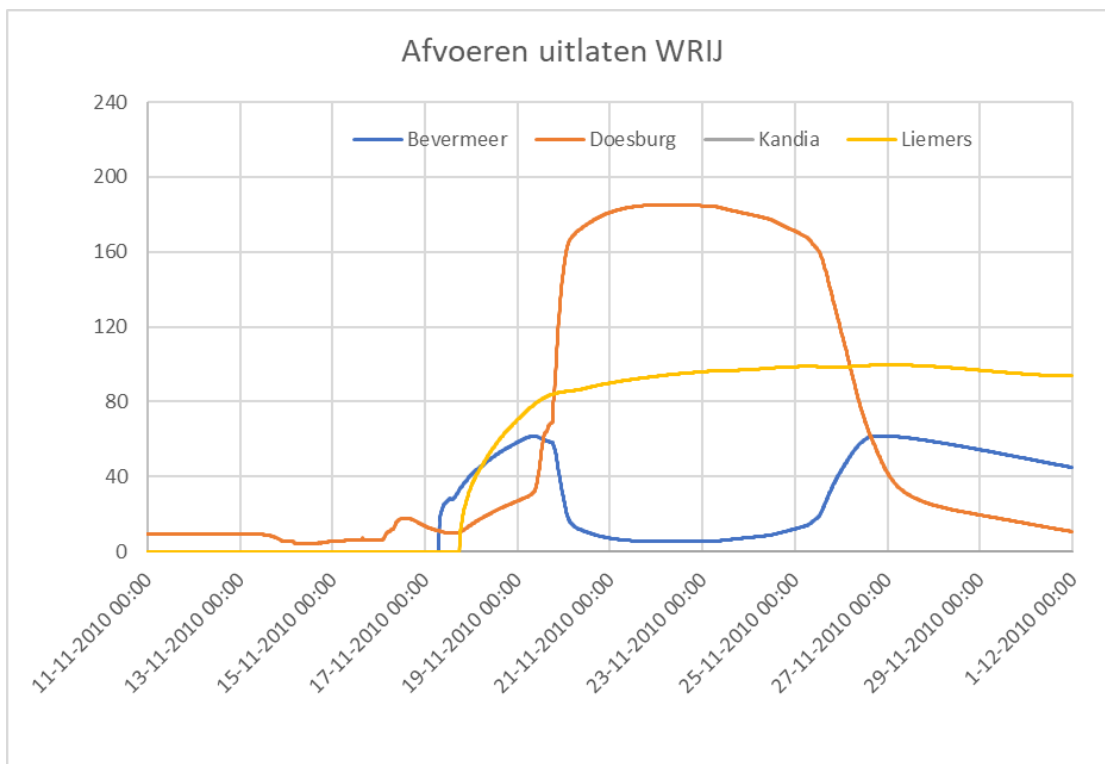
Figuur 4.45 Inundatiepatroon 4 dagen na de dijkdoorbraak Loo, som4 minder diepe bres



Figuur 4.46 Inundatiepatroon 7 dagen na de dijkdoorbraak Loo, som4 minder diepe bres



Figuur 4.47 Inundatiepatroon 15dagen na de dijkdoorbraak Loo, som4 minder diepe bres



Figuur 4.48 Afvoeren Bevermeer, Doesburg, Kandia en Liemers voor doorbraak Loo, som4 minder diepe bres

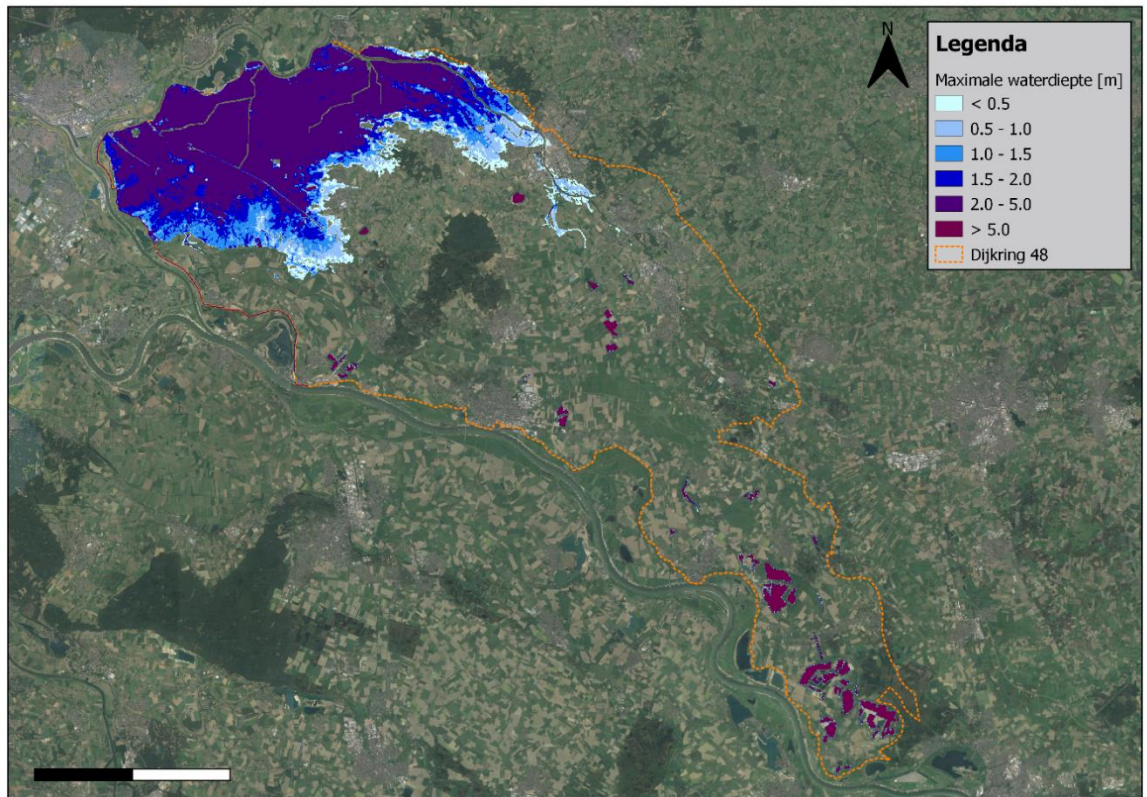
4.4.5 Som 5: Dijkdoorbraak Loo: gevoeligheid winter-zomer ruwheidslaag

Tabel 4.6 geeft een beknopt overzicht van de belangrijkste resultaten van de dijkdoorbraakberekening voor Loo met een ruwheid in het 2D-grid voor een zomersituatie. Figuur 4.49 toont de maximum inundatiedieptes. Het tijdsverloop van de bresbreedte en het bij de bres binnengekomen volume wordt gegeven in Figuur 4.50. Figuur 4.51 tot en met Figuur 4.55 tonen de inundatiepatronen na respectievelijk 1,2,4,7 en 15 dagen na het ontstaan van de bres. Figuur 4.56 bevat de afvoeren bij de uitstroompunten van WRIJ.

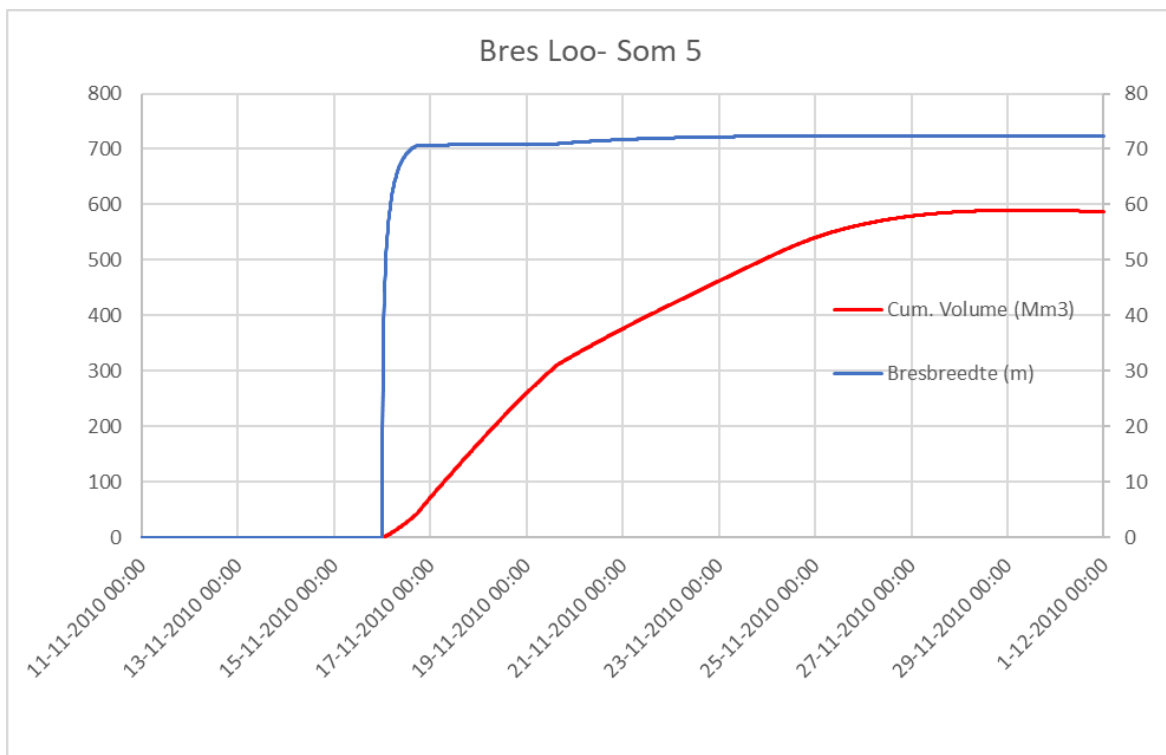
Tabel 4.6 Resultaten van de berekening som5 – gevoeligheid 2D ruwheden (zomer)

Som 5	
Type	Dijkdoorbraak Loo, zanddijk
Herhalingsperiode afvoer bij Lobith	T=1000 jaar, Q=14840 m ³ /s
Breslocatie	Loo
Maximale bresbreedte [m]	72.37 m
Tijd tot 99% van de maximale bresbreedte	4 dagen 21 uur
Maximum bresdebiet [m ³ /s, gem. over 10 minuten]	1323 m ³ /s
Totaal instroomvolume door bres (exclusief retourstroom)	589 Mm ³
Maximum geïnundeerd oppervlak	135 km ²
Maximum diepte in 2D grid (ROR klasse)	Tussen 2 en 5 m
Rekentijd totaal	58 uur en 33 min
Rekentijd 1 dag na begin bres	2 uur en 37 minuten
Rekentijd 2 dagen na begin bres	7 uur en 38 minuten

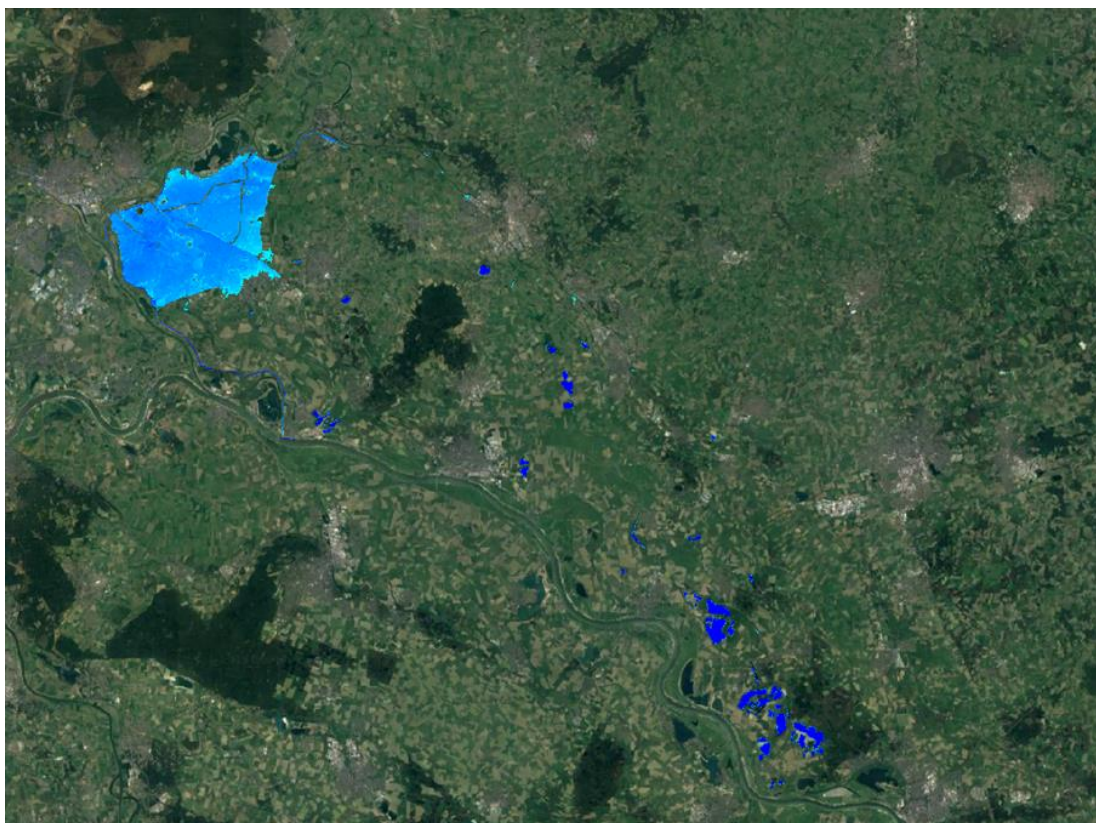
In de som met zomerruwheid valt op dat de bres marginaal breder wordt dan in de referentie som 2, maar dat het maximum debiet door de bres en het totaal ingestroomde volume door de bres lager is dan in de referentiesom. Dat is te verklaren doordat de vegetatieruwheid in de zomer iets hoger is dan in de winter. Er is dus meer weerstand, waardoor er minder water naar binnen stroomt. De totale uitstroom bij Liemers (Giesbeek) Bevermeer en Oude IJssel (Doesburg) is daardoor ook iets lager dan in som 2 (referentiesom).



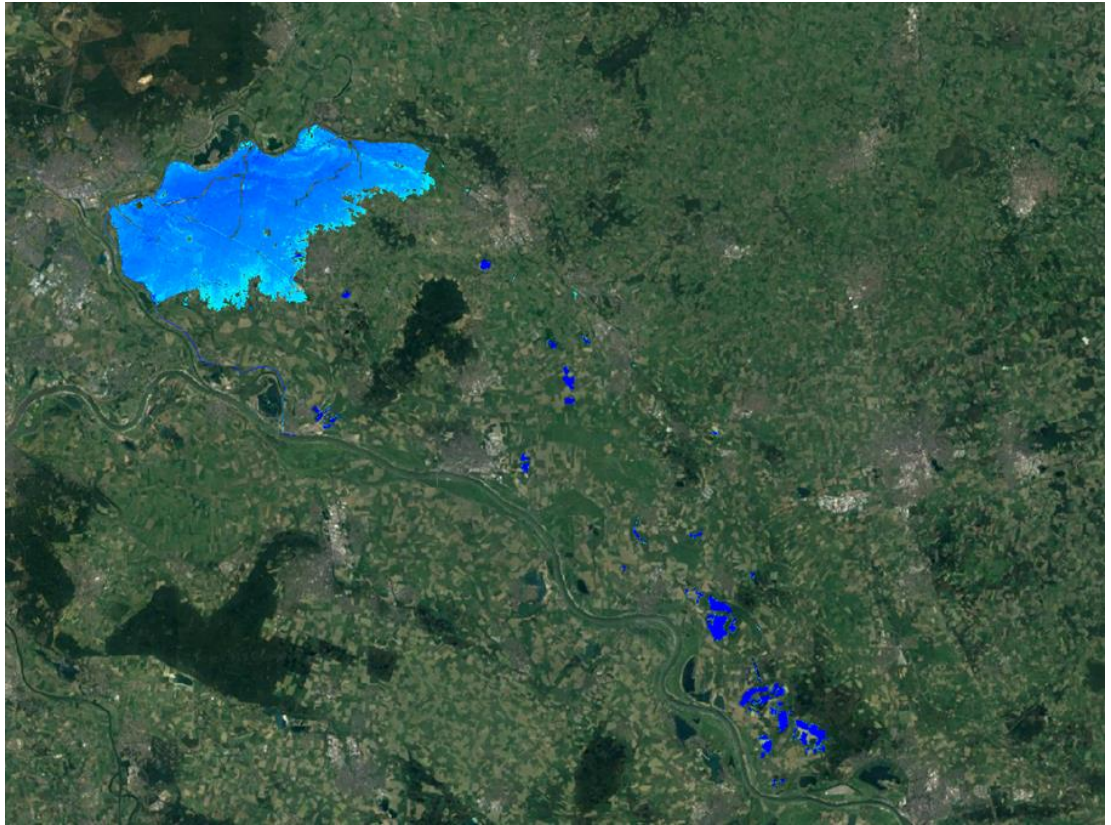
Figuur 4.49 Maximum inundatie dieptes Dijkdoorbraak Loo, som5 zomerruwheid



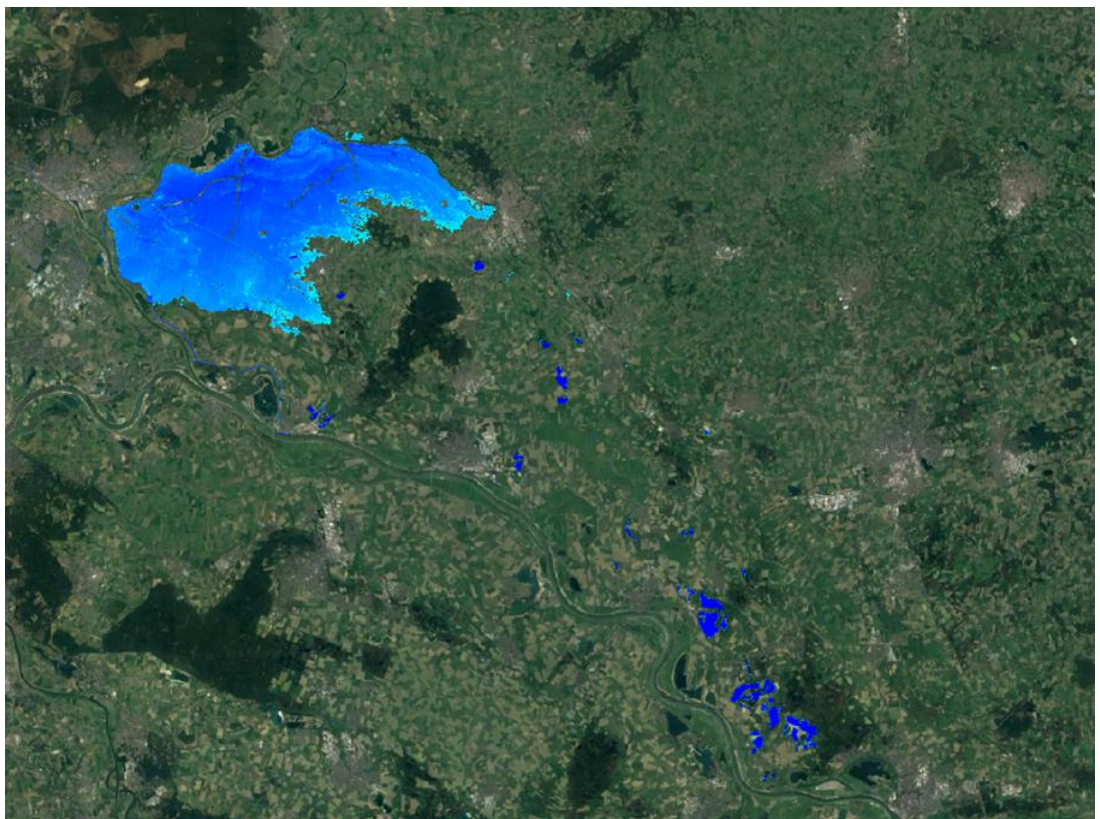
Figuur 4.50 Bresbreedte (rechteras) en cumulatief volume (linkeras) door de bres, Loo som5 zomerruwheid



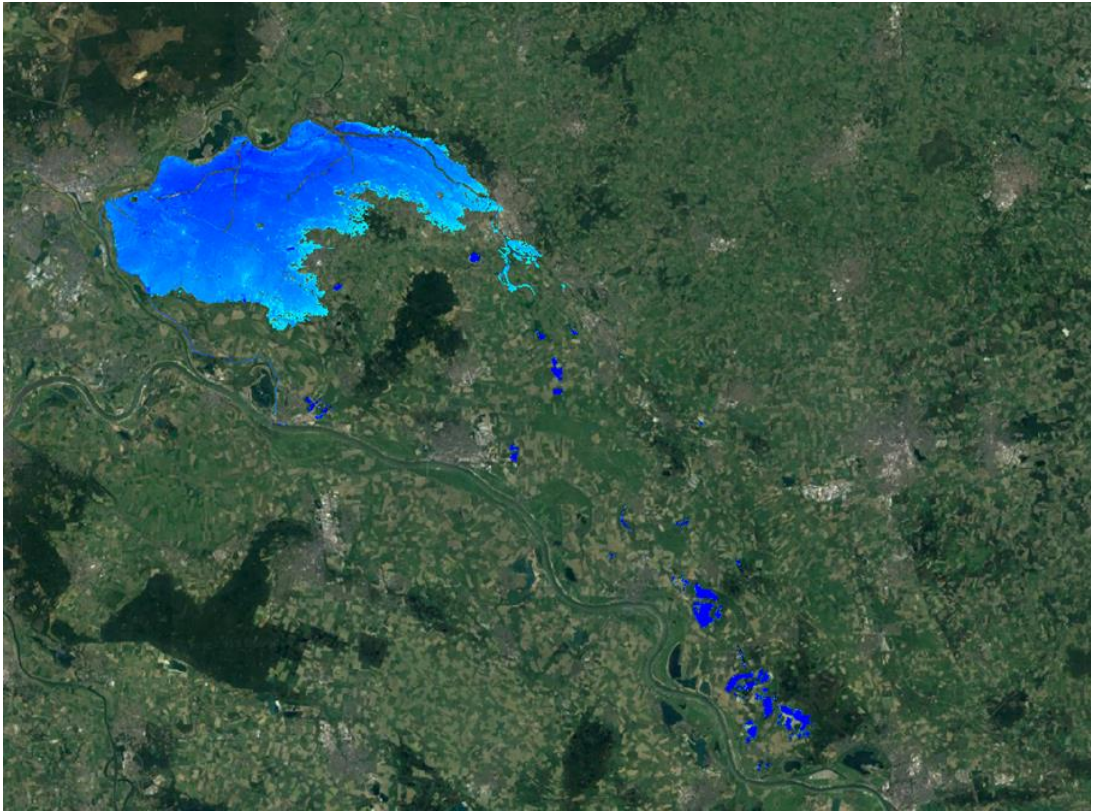
Figuur 4.51 Inundatiepatroon 1 dag na de dijkdoorbraak Loo, som5 zomerruwheid



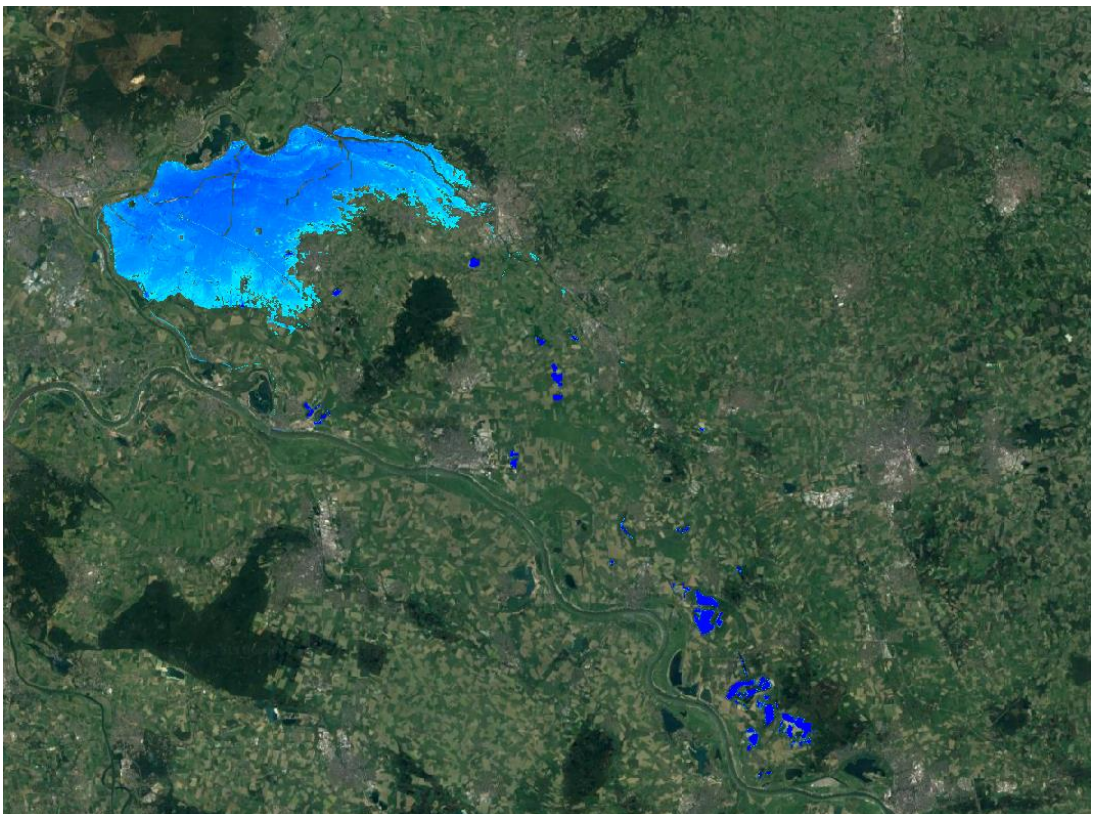
Figuur 4.52 Inundatiepatroon 2 dagen na de dijkdoorbraak Loo, som5 zomerruwheid



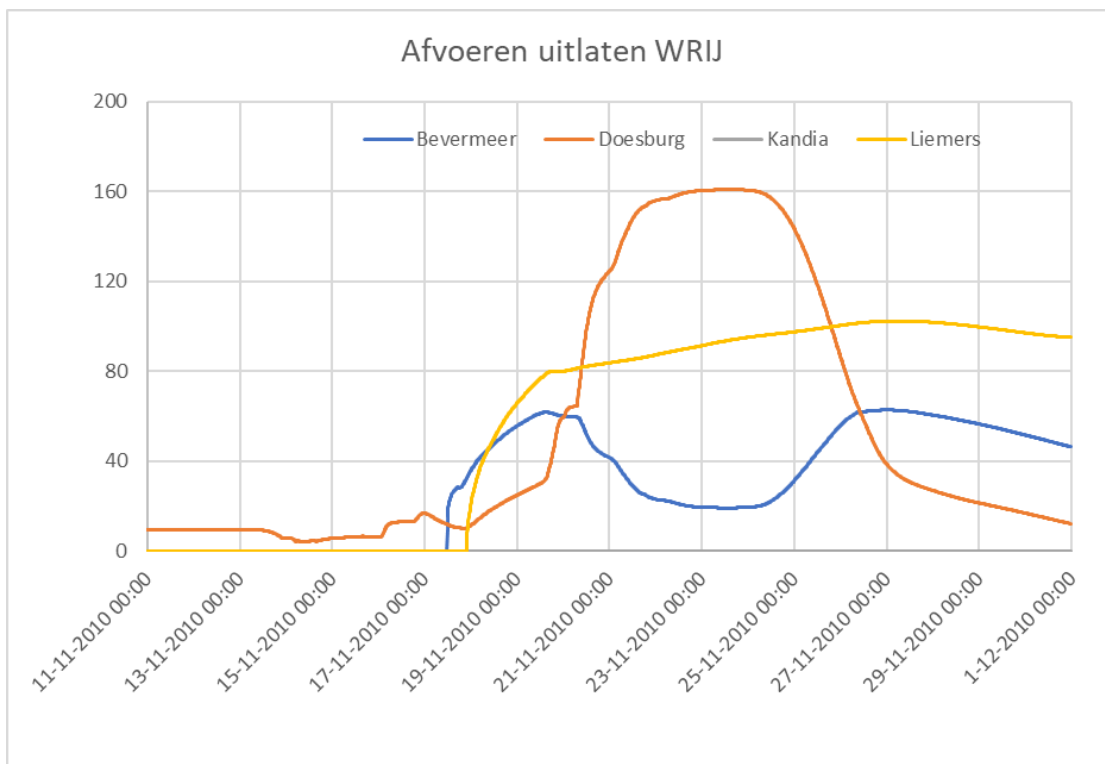
Figuur 4.53 Inundatiepatroon 4 dagen na de dijkdoorbraak Loo, som5 zomerruwheid



Figuur 4.54 Inundatiepatroon 7 dagen na de dijkdoorbraak Loo, som5 zomerruwheid



Figuur 4.55 Inundatiepatroon 15dagen na de dijkdoorbraak Loo, som5 zomerruwheid



Figuur 4.56 Afvoeren Bevermeer, Doesburg, Kandia en Liemers voor doorbraak Loo, som 5 zomerrutheid

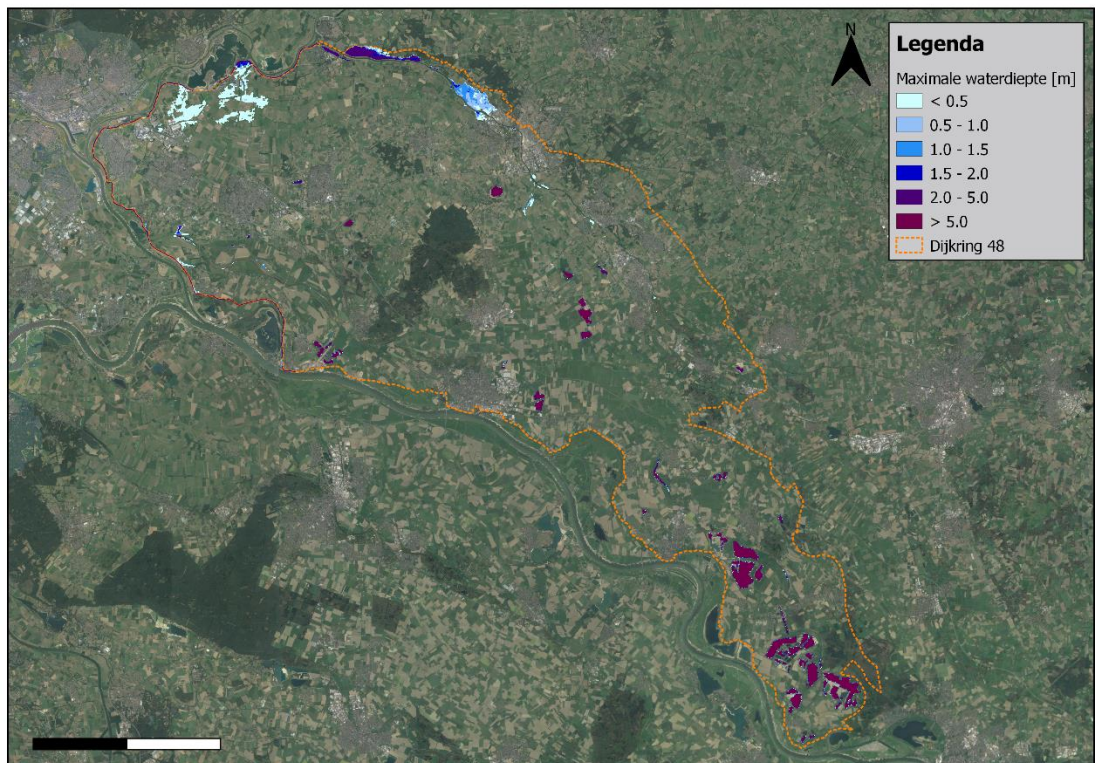
4.4.6

Som 6: $Q=18000 \text{ m}^3/\text{s}$ piekafvoer, alleen overloop (geen dijkdoorbraak)

Tabel 4.7 geeft een beknopt overzicht van de belangrijkste resultaten van de 1D-2D berekening voor een situatie met piekafvoer bij Lobith van $18000 \text{ m}^3/\text{s}$ zonder dijkdoorbraak, maar met alleen overloop over de laagste delen van de dijken. Uit de berekeningsresultaten blijkt dat overloop inderdaad optreedt en de resultaten van de simulatie lijken logisch en verklaarbaar.

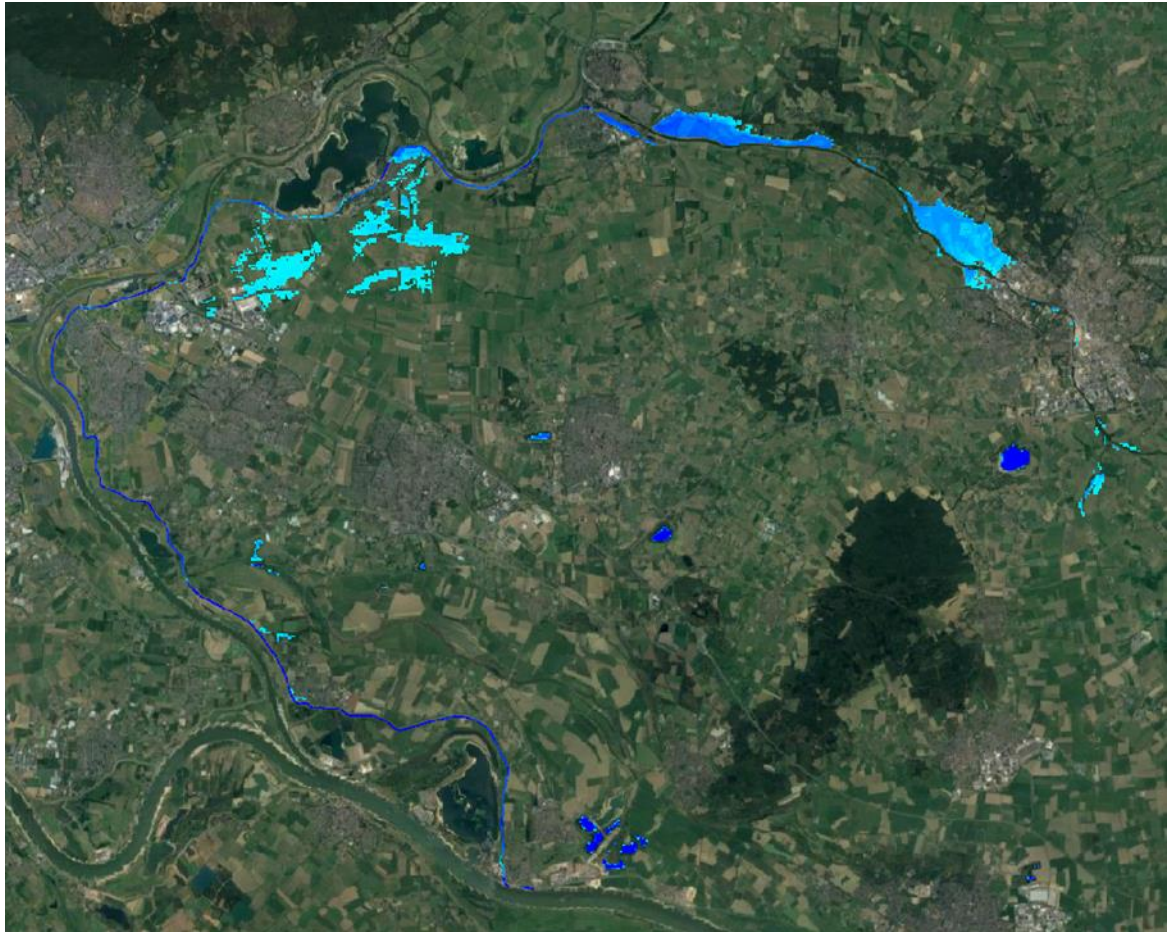
Tabel 4.7 Resultaten van de berekening som6 – $Q=18000 \text{ m}^3/\text{s}$, alleen overloop

Som 6	
Type	Alleen overloop
Herhalingsijd afvoer bij Lobith	$T > 100000$ jaar, $Q = 18000 \text{ m}^3/\text{s}$
Breslocatie	n.v.t.
Maximale bresbreedte [m]	n.v.t.
Tijd tot 99% van de maximale bresbreedte	n.v.t.
Maximum bresdebiet [m^3/s , gem. over 10 minuten]	n.v.t.
Totaal instroomvolume door bres (exclusief retourstroom)	n.v.t.
Maximum geïnundeerd oppervlak	8 km^2
Maximum diepte in 2D grid (ROR klasse)	Tussen 2 en 5 meter
Rekentijd totaal	35 uur en 24 minuten
Rekentijd 1 dag na piekafvoer Lobith	1 uur en 23 minuten
Rekentijd 2 dagen na piekafvoer Lobith	2 uur en 31 minuten



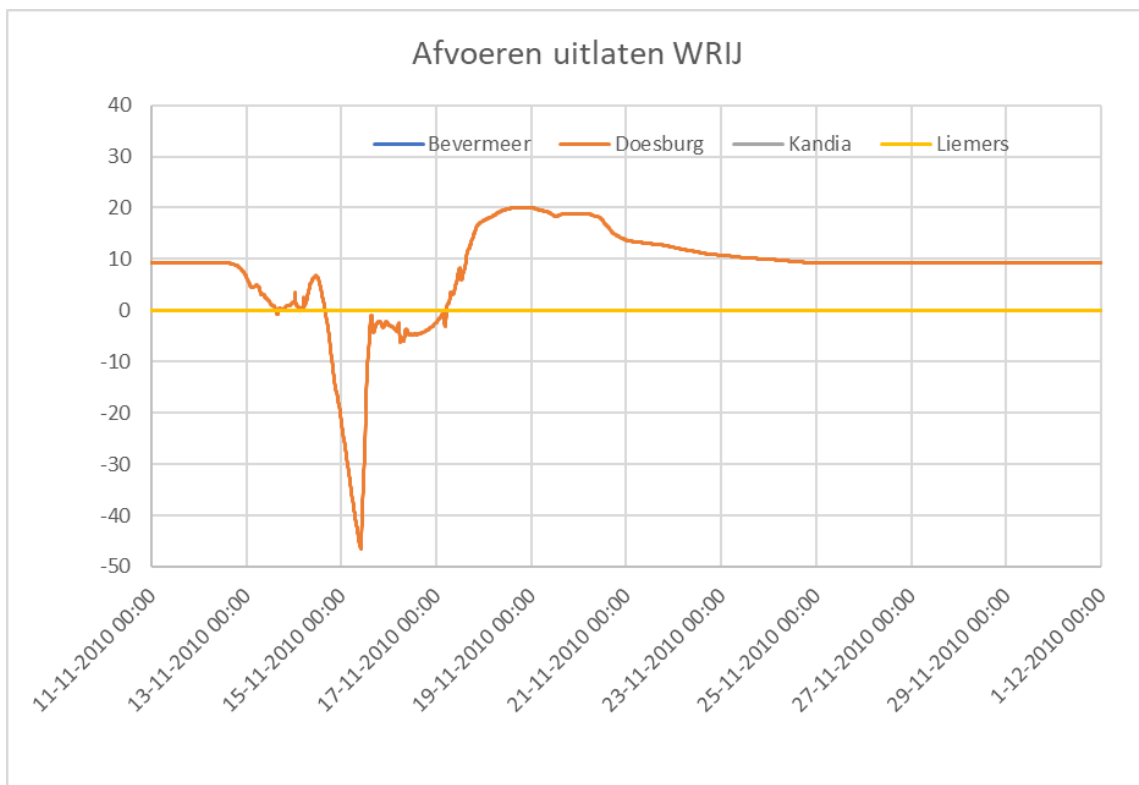
Figuur 4.57 Maximum inundatie dieptes bij $Q_{\text{piek}}=18000 \text{ m}^3/\text{s}$, som 6 alleen overloop

Uit Figuur 4.57 met de maximum inundatiedieptes blijkt dat er op enkele plekken water naar binnen stroomt. Dat is allereerst het geval bij de stuw Doesburg, die momenteel in het model op vaste kruinhoogte +10.0 m NAP staat en waar bij hogere waterstanden op de IJssel water naar binnen kan stromen. Dat is in deze simulatie het geval, en leidt tot enkele overstromde gebieden bij Doesburg en Drempt, en ten westen van Doetinchem. Verder is er overloop langs de primaire kering (in stroomafwaartse volgorde) bij Pannerden langs het Pannerdensch Kanaal, en langs de IJssel bij Lathum en Giesbeek (zie Figuur 4.58).



Figuur 4.58 Inundatiepatroon 1 dag na de piekafvoer Lobith, som 6 overloop

De afvoeren bij de uitstroompunten van het waterschap zijn nihil voor Bevermeer, Kandia en Liemers, omdat er geen laterale instroming is opgegeven en er nauwelijks overstromingen in de stroomgebieden van deze kunstwerken optreden. Voor de Oude IJssel is wel een bovenstrooms randdebiet op de twee bovenranden opgelegd van net beneden de $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit is zichtbaar in Figuur 4.59. Daarbij is ook zichtbaar dat rond het moment dat de piekwaterstand op de IJssel optreedt (als gevolg van de afvoergolf op de Rijn), het water in het model over de stuw Doesburg de Oude IJssel naar binnen stroomt (waterstand op de IJssel is hoger dan die op de Oude IJssel, en de stuw staat stroming in twee richtingen toe). Dit leidt tot een debiet naar binnen van ruim $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Zodra het peil op de IJssel weer lager is dan het peil op de Oude IJssel draait de stromingsrichting weer om en wordt een langere periode tot $20 \text{ m}^3/\text{s}$ afgevoerd.



Figuur 4.59 Afvoeren Bevermeer, Doesburg, Kandia en Liemers voor som6, overloop

4.4.7 Vergelijking van resultaten

In Tabel 4.8 wordt een samenvatting gegeven van rekentijden, maximum overstroomd oppervlak en andere kentallen van de berekeningen. Merk op dat in elke som 30 dagen zijn doorgerekend, waarbij de dijkdoorbraak plaatsvond op dag 15 (som 1 Herwen), of op dag 16 (som 2 tot en met som 5 Loo) of niet (som 6, overloop).

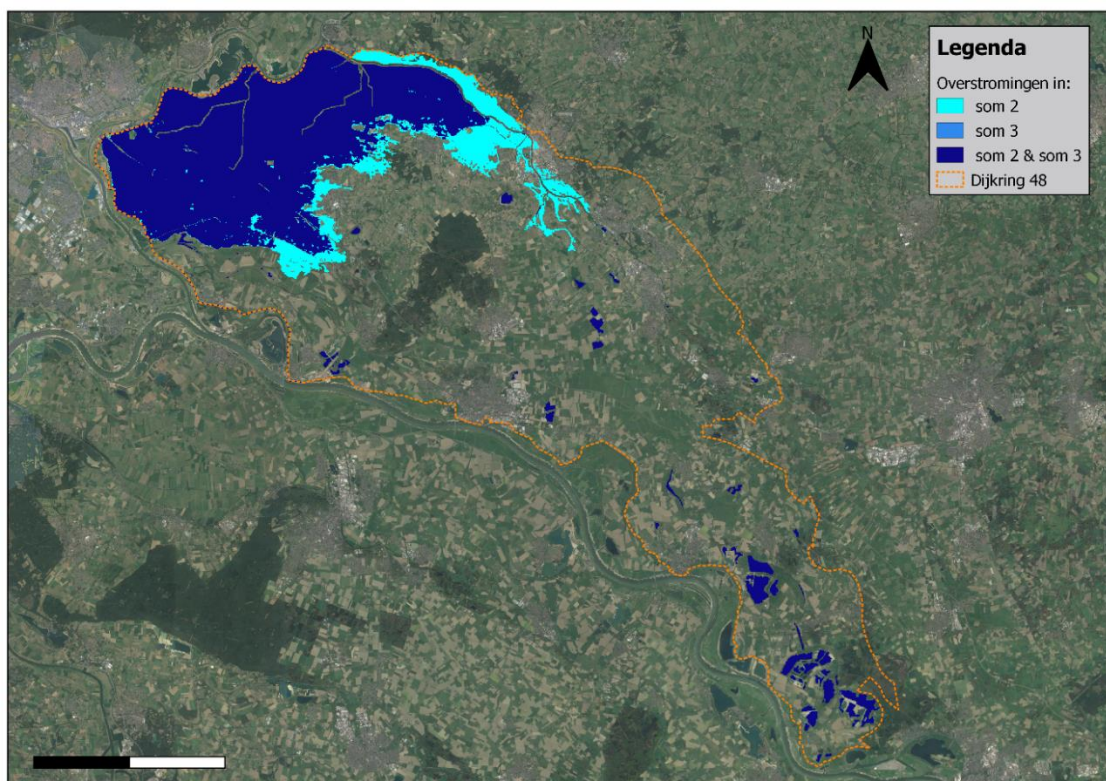
Tabel 4.8 Samenvattende tabel resultaten scenariosommen

	Som 1 Herwen	Som 2 Loo referentie	Som 3 Loo kleidijk	Som 4 Loo minder diepe bres	Som 5 Loo zomer ruwheid	Som 6 overloop
Type	Doorbraak Herwen	Doorbraak Loo	Doorbraak Loo	Doorbraak Loo	Doorbraak Loo	overloop
Herhalingstijd afvoer bij Lobith	T>100000 jaar	T=1000 jaar	T=1000 jaar	T=1000 jaar	T=1000 jaar	T>100000 jaar
Bresgroei-formule	zand	zand	klei	zand	zand	n.v.t.
Minimale dijkhoogte [m NAP]	13.39	10.83	10.83	11.83	10.83	n.v.t.
Diepte bres (m)	5.57	5.34	5.34	4.34	5.34	n.v.t.
Ruwheidslaag	winter	winter	winter	winter	zomer	winter
Maximale bresbreedte (m)	59.78	72.25	58.67	83.48	72.37	n.v.t.
Max. bresdebiet (m³/s, gemiddeld over 10 minuten)	919	1342	482	1449	1323	n.v.t.
Totaal instroomvolume bres (in Mm³, (excl. retourstroom)	272	617	361	691	589	n.v.t.

	Som 1 Herwen	Som 2 Loo referentie	Som 3 Loo kleidijk	Som 4 Loo minder diepe bres	Som 5 Loo zomer ruwheid	Som 6 overloop
Tijd tot 99% van de max. bresbreedte	1 dag en 7 uur	4 dagen en 20 uur	8 dagen en 3 uur	2 dagen	4 dagen en 21 uur	n.v.t.
Maximum overstromd oppervlak (km2)	151	137.5	110.7	143.8	134.7	8.5
RekenPC type	Laptop 32 Gb RAM, 2.8GHz	WCF node, 16Gb RAM, 3.5GHz	Projectnode, 16Gb RAM, 3.5 GHz	Projectnode, 16Gb RAM, 3.5 GHz	Projectnode, 16Gb RAM, 3.5 GHz	Projectnode, 16Gb RAM, 3.5 GHz
Rekentijd totaal	25 uur 27 min	54 uur 45 min	41 uur 57 min	69 uur 33 min	58 uur 33 min	35 uur 24 minuten
Rekentijd dag 1 na bres	2 uur 40 min	4 uur 2 min	2 uur 22 min	5 uur 28 min	2 uur 37 min	1 uur 23 minuten
Rekentijd dag 1+2 na bres	6 uur 10 min	10 uur 59 min	5 uur 10 min	13 uur 7 min	7 uur 38 min	2 uur 31 minuten

De rekentijd voor de eerste dagen na de bres (of na de piekafvoer Lobith in som 6) varieert sterk. Hierbij is niet alleen de locatie belangrijk, maar ook de gebruikte parameterwaarden hebben effect op de rekentijd. Het is dus niet goed mogelijk om (zonder alle opties te testen) een versie van de schematisatie te maken waarbij gegarandeerd voor alle mogelijke dijkdoorbraken en gekozen parameter-waarden wordt voldaan aan de gewenste rekentijd. Algemeen is wel duidelijk dat het verfijnen van cellen en toevoegen van 1D elementen in vergelijking met de eerste (puur) 2D berekeningen met grovere cellen een duidelijk effect heeft op de rekentijd. Op dit moment, met de huidige versie van de D-HYDRO rekenkern en de huidige schematisatie, wordt de gewenste performance niet gehaald. Hierop wordt in de volgende paragraaf verder ingegaan.

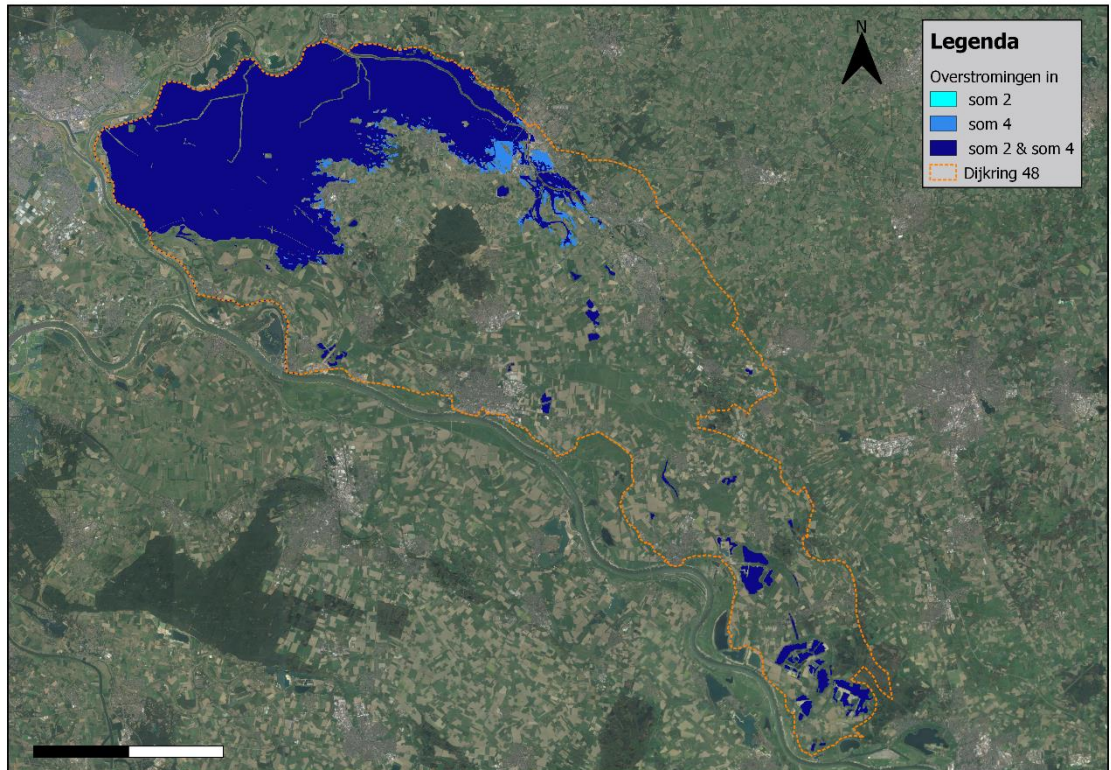
Figuur 4.60 tot en met Figuur 4.62 vergelijken som 3, 4 en 5 met de referentiesom som 2 in termen van het maximum overstromd oppervlak.



Figuur 4.60 Vergelijking geïnundeerd oppervlak Loo som 2 (referentie) en Loo som 3 (kleidijk)

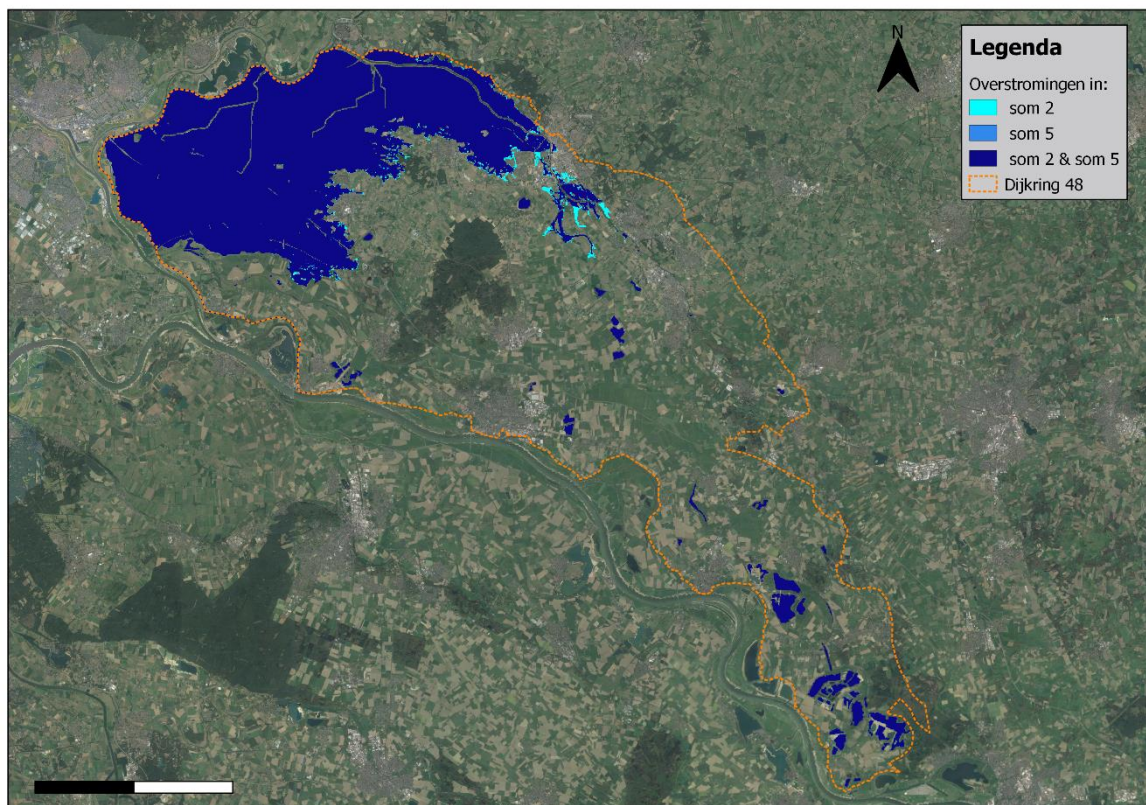
Som 2 is de referentiesom Loo, en som 3 is een som met exact dezelfde condities, maar alleen de bresgroeiparameters volgens een kleidijk in plaats van een zanddijk. Hierdoor blijkt de bresgroei trager te verlopen (de bres wordt in plaats van ruim 72 meter slechts ruim 58 meter), het bresdebiet en totaal instroomvolume via de bres blijft lager, en het overstromd oppervlak blijft kleiner (zie Figuur 4.60)

Het verschil tussen som 2 (referentiesom Loo) en som 4 is dat in som 4 de bres een meter minder diep wordt verondersteld. In eerste instantie zou je dan kunnen verwachten dat er minder water door de bres stroomt en dus een kleiner oppervlak overstromt (of minder diep). Echter, het blijkt dat bij deze ondiepere bres de bres in de breedte verder groeit, en dat uiteindelijk daardoor een groter maximum debiet en een groter volume via de bres naar binnen stroomt. Dus het overstromd gebied in som 4 (met minder diepe bres) is uiteindelijk groter dan het overstromd gebied in som 2 (de referentiesom) zoals blijkt uit Figuur 4.61.



Figuur 4.61 Vergelijking geïnundeerd oppervlak Loo som 2 (referentie) en Loo som 4 (minder diepe bres)

De vergelijking tussen som 2 (referentie) en som 5 laat het effect zien van de ruwheid in het 2D overstromd gebied. In som 2 is een winterruwheid gebruikt omdat de hoge afvoeren en mogelijke dijkdoorbraken typisch in de winter plaatsvinden; in som 5 is echter een zomer-ruwheid gebruikt. Die geeft typisch een hogere weerstand omdat vegetatie in de zomer verder ontwikkeld is. Bij verder dezelfde condities leidt dit bij een dijkdoorbraak tot een lagere maximum instroom bij de bres, een kleiner volume dat de dijkkring instroomt en dus een iets kleiner overstromd oppervlak c.q. iets minder diepe overstroming. In som 2 is het overstromd gebied dus iets groter dan in som 5 (zie Figuur 4.62)



Figuur 4.62 Vergelijking geïnundeerd oppervlak Loo som 2 (referentie) en Loo som 5 (zomerrutheid)

4.5 Calamiteitenmodel

Vooraf was de wens van het waterschap om zo mogelijk één model van dijkkring 48 te hebben, geschikt voor scenarioberekeningen en voor gebruik bij calamiteiten. Echter, voor beide soorten gebruik zijn verschillende (performance) criteria. Als het scenario-model snel genoeg is, kan er met één model worden volstaan. Als het scenario-model niet snel genoeg is, is de vraag of er een model geconstrueerd moet worden dat sneller rekent maar nog steeds vergelijkbare resultaten geeft. Daarbij zouden dan concessies moeten worden gedaan ten aanzien van het detail van het rekenrooster en/of de representatie van de 1D watergangen in het model.

Uit de scenarioberekeningen blijkt dat de vereiste rekentijd afhankelijk is van de gekozen dijkdoorbraaklocatie. Dat hangt samen met de situatie rond de dijkdoorbraak, kleine celgroottes of kleine rekensegmenten bij uitlaten, de grootte van het ondergelopen gebied en de gekozen waarden van modelparameters. Ook de rekensnelheid van de PC / server waar WRIJ de berekeningen op gaat maken zal van invloed zijn. Op basis van de gemaakte sommen een voor alle mogelijke doorbraaklocaties snel rekenend model te maken is dus niet te garanderen. Wel kan uit de huidige resultaten geconcludeerd worden dat het model op dit moment niet voldoet aan de vooraf gewenste rekentijd.

Voor de rekenkern is een performance-optimalisatie in het algemeen, en specifiek voor het 1D gedeelte, voorzien in het voorjaar van 2020. Hierbij wordt onder andere aandacht besteed aan de volgende aspecten:

- Courant getal;
- Interne parallelisatie van 1D code;

Voor het Courant getal geldt in SOBEK dat het maximum toegestane Courant getal default 1.0 is. In dat geval gaat er door een rekensegment per rekentijdstap niet meer water dan het volume van dat segment, en is de berekening stabiel.

In D-HYDRO (Flexible Mesh) geldt een soortgelijk Courant criterium (voor zowel 1D als 2D). Hier is echter de default instelling 0.7, hetgeen duidelijk lager is dan in SOBEK. Bij testen van het Rijntakken model en het 1D model van de watergangen van dijkkring 48 met als maximum toegestaan Courant getal 0.95 of 1.0 bleek echter dat op een aantal plekken in het model de resultaten instabiel werden. Om dat te reduceren is in de sommen daarom gebruik gemaakt van de default D-HYDRO instelling van 0.70 voor het Courant getal. Dit is meestal streng genoeg, maar blijkt voor het Rijntakken model toch niet altijd voldoende (zie paragraaf 3.6.7). Een strengere Courant criterium heeft negatieve invloed op de performance: een factor $1/0.7=1.42$ betekent een maximum tijdstap die bij dezelfde condities 42% kleiner is, en dus extra rekentijd vraagt. Het issue was al bekend bij de ontwikkelaars, er is ook al een idee om dit te verbeteren. Dat zal voorjaar 2020 worden opgepakt, zodat na oplossen van dit issue het Courant getal op de normale SOBEK instelling van 1.0 kan worden gezet en de rekentijd wordt gereduceerd.

Als tweede punt wordt de performance van de rekenkern voor het 1D netwerk nog verder geoptimaliseerd en intern geparalleliseerd. In de eerste fase van de ontwikkeling van 1D-functionaliteit lag de nadruk op de correcte werking (en verifieerbaarheid daarvan via testbanken e.d.). De performance is het volgende actiepunt. In de D-HYDRO ontwikkelingen van 2020 staat performance hoog op de prioriteitenlijst, en waarschijnlijk is door deze verwachte ontwikkelingen een apart, sneller rekenend calamiteitenmodel minder urgent.

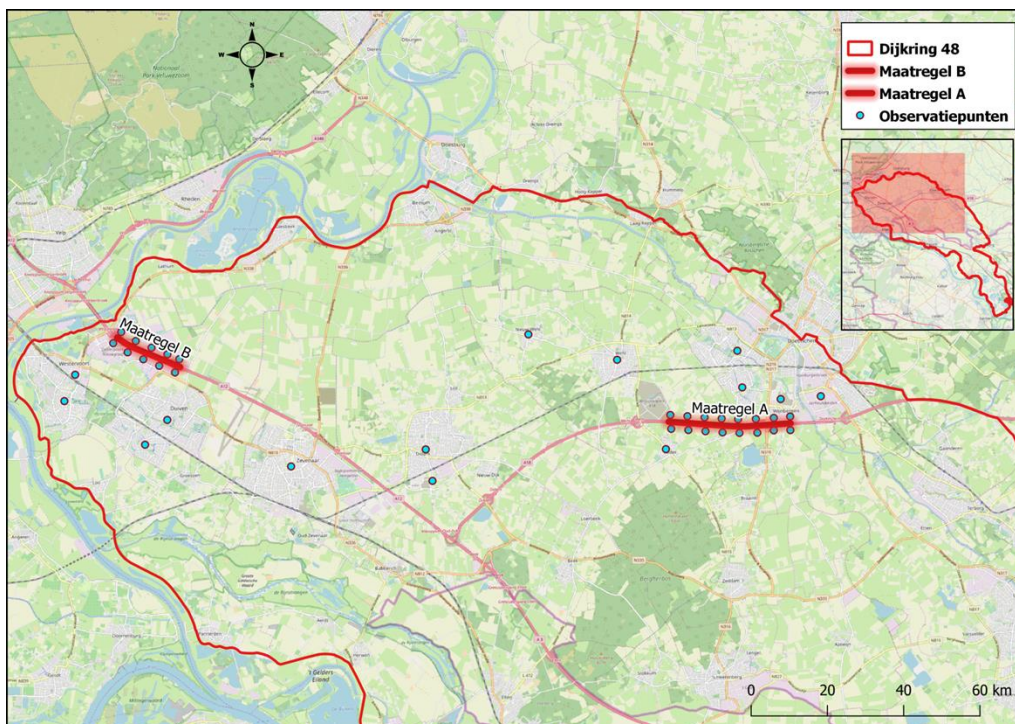
Daarnaast heeft het waterschap aangegeven dat het weliswaar in eerste instantie een wens was om een snel rekenend calamiteiten model te hebben, maar dat dit nu minder kritiek wordt geacht. De rekentijd van een calamiteiten model is veel minder belangrijk dan een goed inzicht in het systeem en de gevoeligheid voor verschillende doorbraken. Dat vraagt om een bibliotheek van berekeningen (zeg 200 scenario-berekeningen) en voldoende beschikbare tijd van de modelleerhydrologen van het waterschap. Bijvoorbeeld dat een dijkdoorbraak bij Herwen met de Verheij-van der Knaap formulering bij een Rijnafvoer met $T=1000$ herhalings-tijd tot veel kleinere bressen en veel minder ondergelopen gebied leidt dan in oude overstromingsberekeningen met een bres van 200m breed, is een belangrijk nieuw inzicht.

Dit alles overwegende is in overleg met het waterschap besloten nu geen apart calamiteiten-model met een grovere resolutie op te zetten en te verifiëren, maar de ontwikkelingen in D-HYDRO voor verbetering van de performance af te wachten. Het waterschap zal ook het vervolgtraject met scenario-berekeningen in 2020 nader uitwerken.

4.6 Mogelijkheden om maatregelen door te rekenen

Door WRIJ is tijdens het project aangegeven dat het belangrijk is dat maatregelen snel kunnen worden doorgerekend met het model. Als voorbeeld is een dijkdoorbraak bij Bislich doorgerekend (zie paragraaf 4.2.1), en aanvullend dezelfde dijkdoorbraak met als maatregel het toevoegen van zandzakken langs de zuidzijde van de A18 tussen Stroombroek en Doetinchem, en langs de oostzijde van de A12 tussen Zevenaar en Duiven (zie Figuur 4.63). Doel hiervan is om een 1 meter hoge kering te leggen om het water tijdelijk tegen te houden en zo meer evacuatietijd te creëren.

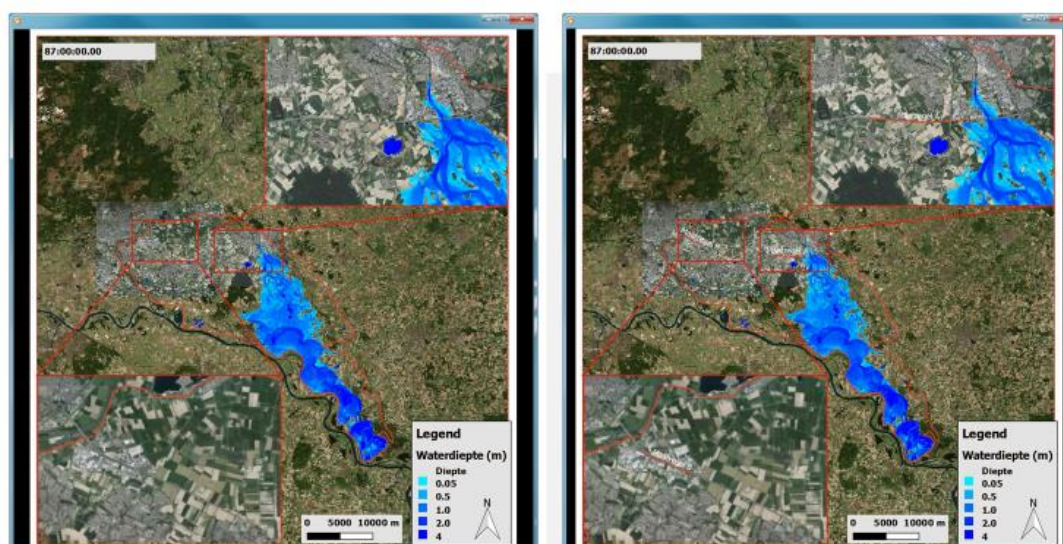
Deze maatregelen zijn doorgerekend met een puur 2D modelversie, waaraan op dat moment nog geen watergangen en interne keringen waren toegevoegd, en ook de uitstroombmogelijkheden naar Pannerdens kanaal en IJssel waren nog niet in het model opgenomen. De resultaten zijn dus vooral indicatief.



Figuur 4.63 Maatregelen langs de A18 bij Doetinchem en A12 bij Westervoort voor een dijkdoorbraak bij Bislich

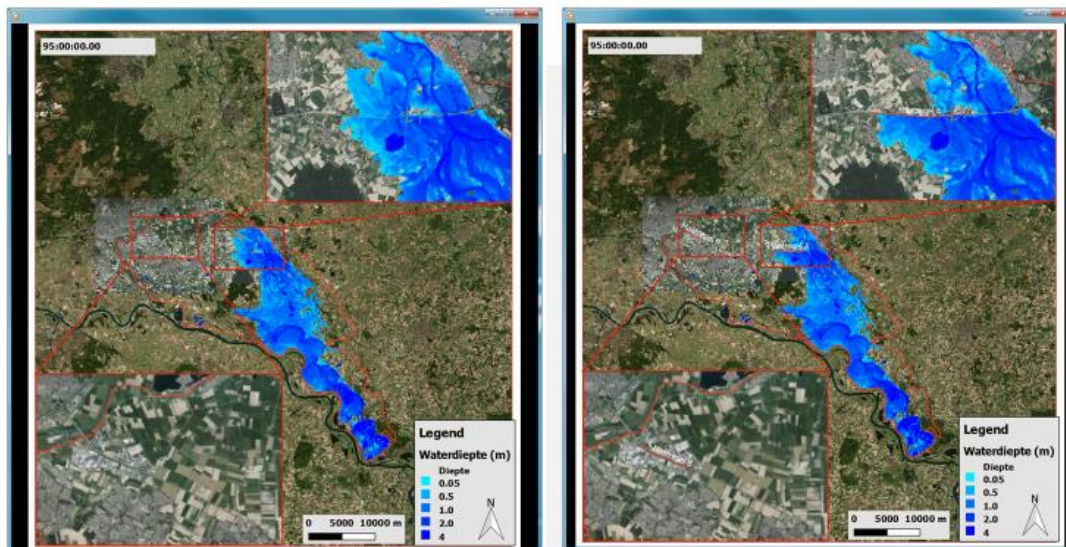
De resultaten van de oorspronkelijke berekening en de berekening met extra zandzakken zijn hieronder weergegeven, op basis van de QGIS visualisatie op kaart. Hierbij is uitvoer voor T=87 uur als startpunt genomen (overstroming bereikt Doetinchem). Op T=87 uur zijn er nog geen verschillen. De maatregelen hebben in de uren daarna effect, zie Figuur 4.64 tot en met Figuur 4.68. Links en rechts wordt de situatie zonder en met maatregel weergegeven, zowel voor het gehele gebied als ingezoomd.

Overstromingsscenarios zonder (links) & met (rechts) maatregelen



Figuur 4.64 Vergelijking maatregelen bij dijkdoorbraak Bislich; Resultaat op T=87 uur

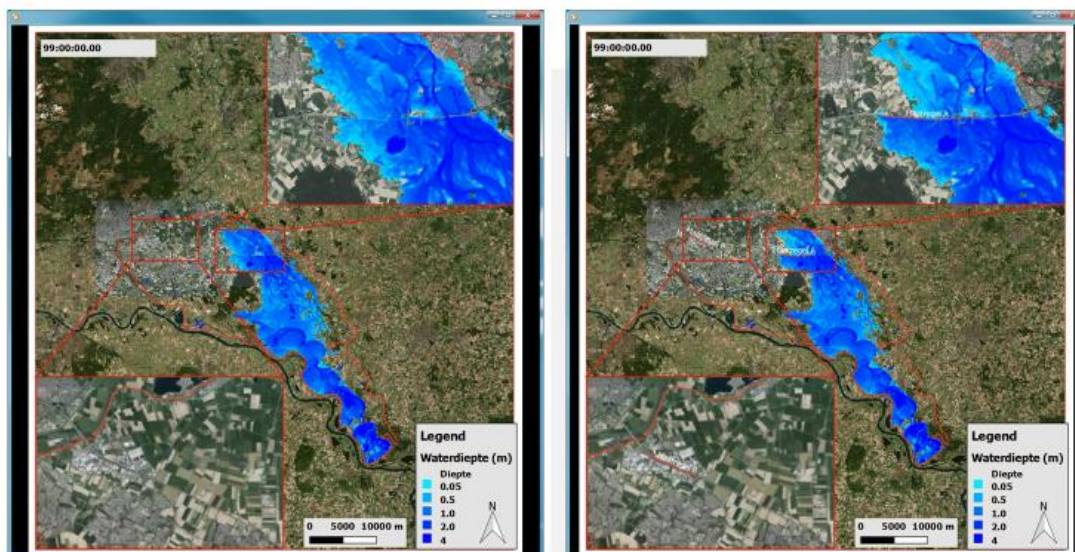
Overstromingsscenario's zonder (links) & met (rechts) maatregelen



Figuur 4.65 Vergelijking maatregelen bij dijkdoorbraak Bislich; Resultaat op T=95 uur

Op T=95 uur is het effect van de maatregel bij Doetinchem zichtbaar, in het plaatje rechts (met maatregel) is de overstroming bij de locatie van de maatregel tijdelijk vertraagd.

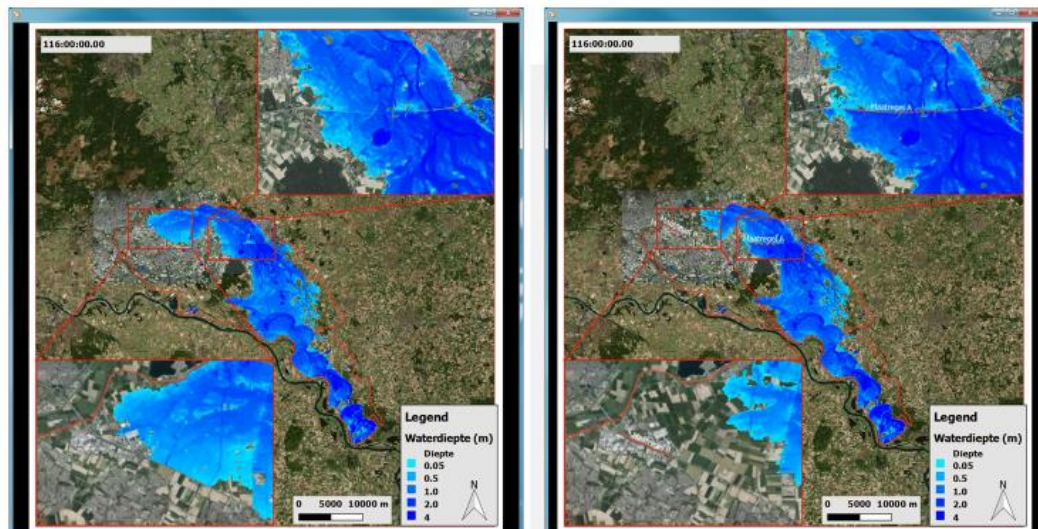
Overstromingsscenario's zonder (links) & met (rechts) maatregelen



Figuur 4.66 Vergelijking maatregelen bij dijkdoorbraak Bislich; Resultaat op T=99 uur

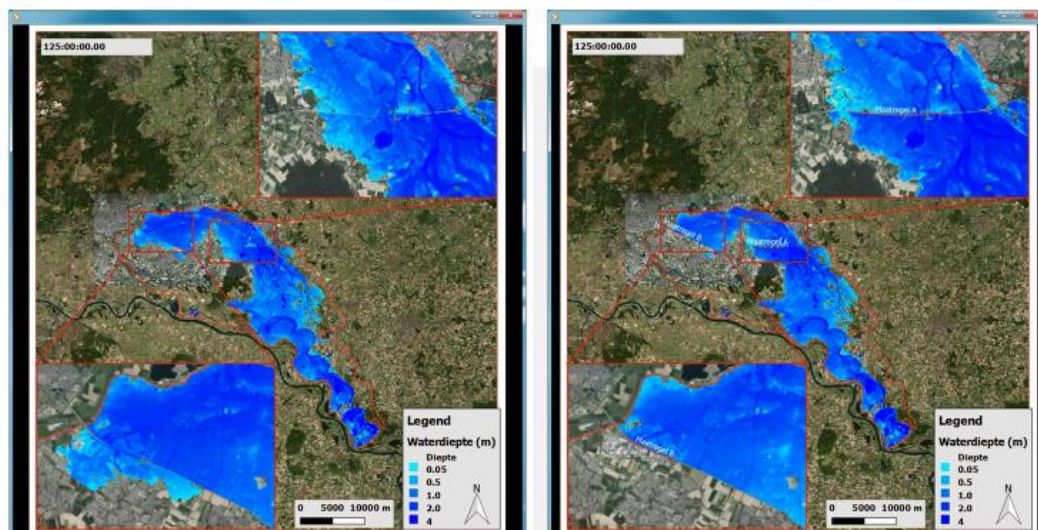
Na 116 uur bereikt in de originele som (links) de overstroming de oostzijde van de A12 bij Westervoort, bij de som met maatregel bij Doetinchem is dat nog niet het geval. Na 125 uur is de originele som (links) de A12 al overstroomt, en in de som met zandzakken langs delen van de A18 en de A12 is dit nog niet het geval.

Overstromingsscenarios zonder (links) & met (rechts) maatregelen



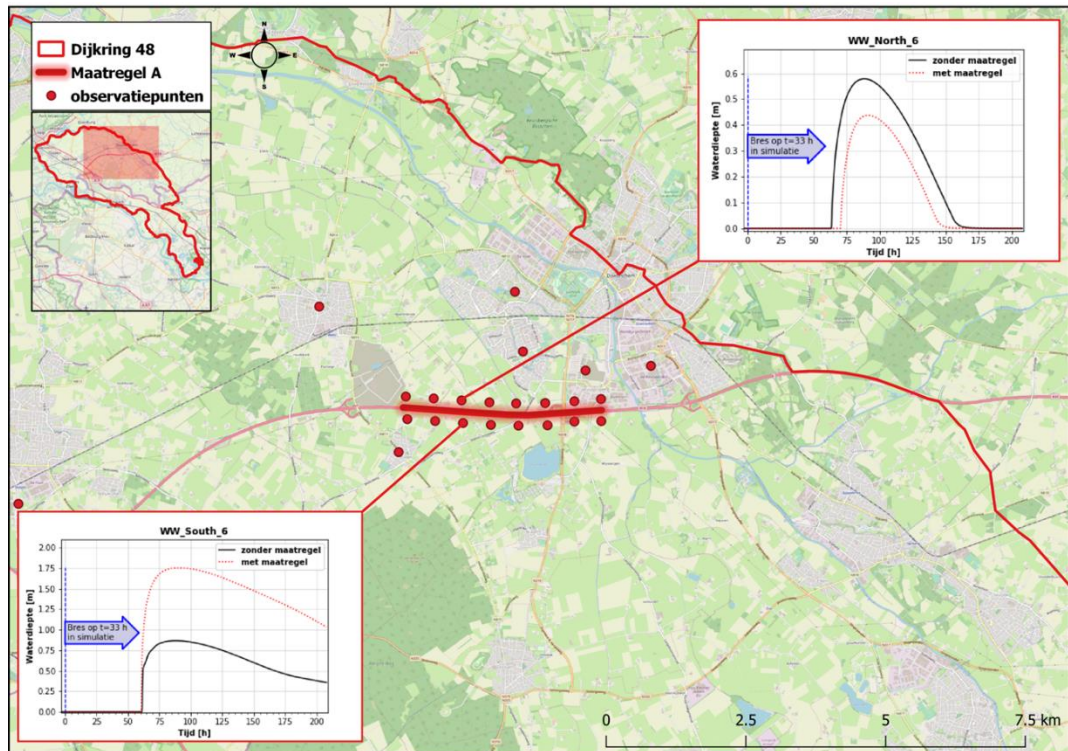
Figuur 4.67 Vergelijking maatregelen bij dijkdoorbraak Bislich; Resultaat op T=116 uur

Overstromingsscenarios zonder (links) & met (rechts) maatregelen



Figuur 4.68 Vergelijking maatregelen bij dijkdoorbraak Bislich; Resultaat op T=125 uur

Verschillen tussen de 2 sommen kunnen ook bekeken worden door het analyseren van waterstanden op waarnemingspunten (observation points). Hieruit blijkt voor de maatregel langs de A18 dat aan de zuidkant van de snelweg de waterstanden door het plaatsen van zandzakken ongeveer een meter hoger worden, maar dat aan de noordkant van de A18 de duur en diepte van de overstroming afneemt. (zie Figuur 4.69) Verder naar het noorden in Doetinchem de Huet is het effect van de maatregel al veel minder; dat komt deels door overstromingen van de Oude IJssel en door het feit dat de uitstroom bij Doesburg nog niet in het model zit. De hier gepresenteerde sommen moeten daarom slechts als indicatieve berekeningen worden gezien waaraan geen absolute conclusies over effectiviteit van maatregelen getrokken kunnen worden. Wel is duidelijk dat het met de gegenereerde uitvoer van de sommen, en wat processing in QGIS en Excel resultaten van ingrepen kunnen worden gevisualiseerd en beoordeeld.



Figuur 4.69 Vergelijking van resultaten, effect van maatregelen langs de A18

4.7 Koppeling met andere dijkringen

Het dijkkring 48 model kan later uitgebreid worden met benedenstroomse dijkringen (bv. Dijkkring 49). Het gemodelleerde gebied is nu al iets groter dan dijkkring 48 zelf, omdat aan de noordostrand van de dijkkring de grens van het meegenomen gebied ruim is genomen (de dijkkring is daar minder scherp begrensd dan aan de westkant van de dijkkring). Door observatie cross-sectionies te definiëren kan voor die secties het debiet als uitvoer worden gegeven, en een inschatting worden gegeven van de overloop naar de volgende dijkkring. Dat is bij de nu gemaakte testsommen niet gedaan, ook omdat nu langs de randen van het rekengrid het model 'waterdicht' is en er geen water uit kan stromen, dus als water naar dijkkring 49 zou overstromen blijft het daar nu staan. Zonder een goede benedenstroomse randvoorwaarde zal een observatie cross-sectie langs de dijkkring 48 grens nu alleen inzicht geven in de locaties waar overloop naar dijkkring 49 als eerste zou optreden.

Het gekoppelde 1D Rijntakken model loopt al wel door tot het Keteldiep, en loopt daarmee al ver genoeg benedenstrooms door. Wat dat betreft is het model dus al wel geschikt om ook de benedenstroomse dijkkring 49 mee te nemen.

4.8 Koppeling met schade-slachtoffermodule

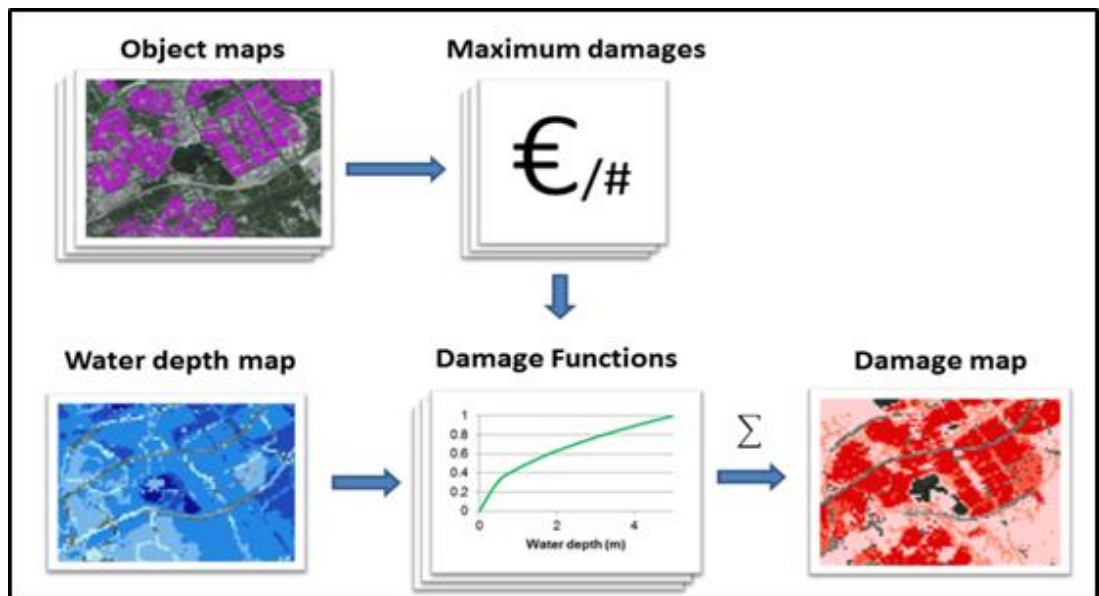
Voor een geselecteerde scenarioberekening (som 2, referentieberekening Loo) is de uitvoer van de D-HYDRO berekening gebruikt om de schades te berekenen met de schade- en slachtoffermodule (D-FIAT). De principes van D-FIAT worden hieronder toegelicht (zie Figuur 4.70).

D-FIAT werkt met kaarten (regelmatige grids). De invoer voor D-FIAT bestaat uit:

- Een kaart met landgebruik en bebouwing;
- Maximum schadebedragen per type landgebruik / bebouwing;
- Een overstromingskaart met maximum dieptes;
- Optioneel ook met een aankomsttijd c.q. stijgsnelheid (bij de slachtofferberekening; dit is niet aangegeven in Figuur 4.70);
- Schadefuncties;
- De standaard schadefuncties zijn gebaseerd op de maximum inundatiediepte. De schadefunctie geeft afhankelijk van de maximum waterdiepte aan welke fractie van de maximum schade wordt gerealiseerd.

Op basis van de maximum waterdieptes, een landgebruikskaart, de maximum schade per type landgebruik/bebouwing, en de schadefuncties wordt de totale schade bepaald door het optellen van de schades voor alle gridcellen. Interessant om te vermelden is dat in onderzoekskader gewerkt wordt aan meer gedifferentieerde schadefuncties, waarbij ook de maximale stroomsnelheden of inundatieduur meegenomen zou kunnen worden.

De D-HYDRO uitvoer bevat standaard een NetCdf bestand met de maximum diepte. Voor gebruik in D-FIAT wordt deze geconverteerd naar een regelmatig grid.



Figuur 4.70 Principe van D-FIAT – Schade en Slachtoffermodule.

Voor Nederlandse toepassingen is D-FIAT voorzien van een gebruikersschil met de naam Schade en Slachtoffermodule (zie Figuur 4.71). Deze module is via de Helpdesk Water (<https://www.helpdeskwater.nl>) verkrijgbaar.

De uitvoer van de schade- en slachtoffermodule bestaat uit kaarten (tif bestanden, png bestanden) en tabellen (in platte tekst en Excel format).

Voor de referentieberekening Loo, som 2, is een schade- en slachtofferberekening met D-FIAT gemaakt. Hierbij is de optionele invoer m.b.t. stijgsnelheid niet meegenomen. Wel meenemen van die stijgsnelheid in de slachtofferberekeningen zou, in gevallen waarbij de waterstand snel stijgt (bv. meer dan een halve meter per half uur), kunnen leiden tot een hoger aantal slachtoffers. Voor de schadeberekening is de stijgsnelheid niet van invloed.

De resultaten voor de schade – en slachtoffer berekening voor de referentie som Loo (met een $T=1000$ afvoer Rijn, dijkdoorbraak bij Loo met maximale bresbreedte 72 meter, maximum bresdebiet $1342 \text{ m}^3/\text{s}$ en totaal instroomvolume 617 Mm^3) met de methode SSM2017 Binnendijks, voor normtraject 48-1 (dijkkring 48 traject 1 langs Bovenrijn-Pannerdens Kanaal) zijn als volgt:

- Totale schade : 7.4 miljard euro
- Totaal aantal slachtoffers (zonder evacuatie) : 490 personen
- Totaal getroffen en : 96297 personen

In het schaderapport wordt onderscheid gemaakt naar schades bij verschillende typen bedrijven, typen infrastructuur, woningen, speciale en overige typen. Bij de getroffen en wordt onderscheid gemaakt naar getroffen en in eensgezinswoningen, hoogbouw, laagbouw en middenbouw. Figuur 4.72 laat de totale schade in dijkkring 48 zien voor de referentieberekening dijkdoorbraak bij Loo. De kaart laat de schade in euro per hectare zien. Het resultaat is duidelijk gerelateerd aan de kaart met maximale waterdieptes (zie Figuur 4.24). Bij de overdracht van de modellen zullen ook de resultaten van de schadeberekeringen worden overgedragen.



Schade-en slachtofferfuncties

Scenario naam:

*Waterdiepte bestand: ...

Stroomsnelheid bestand: ...

Incrementeel bestand: ...

Doorbraak tijdstip [uur]:

Aankomsttijd bestand: ...

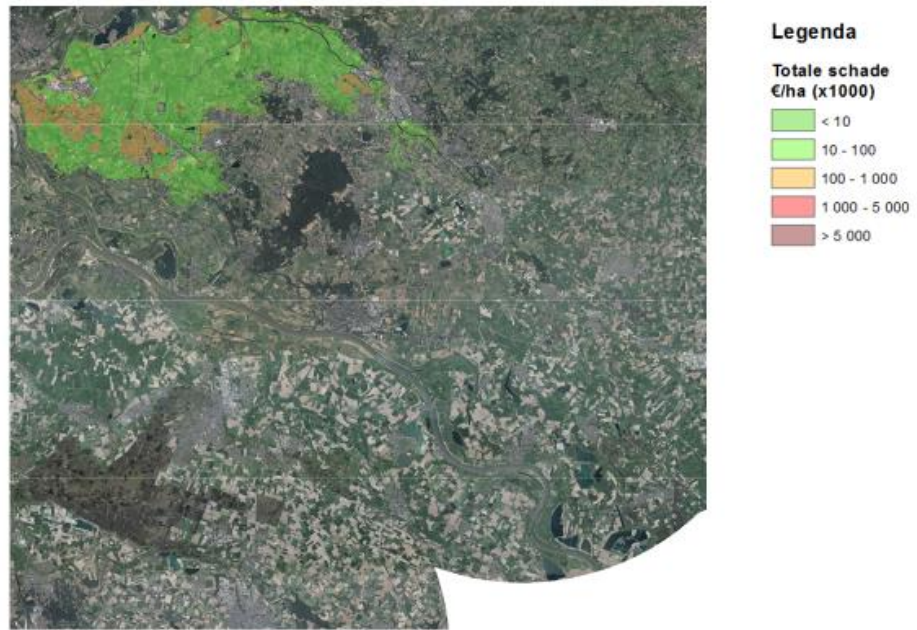
Stijgsnelheid bestand: ...

Norm traject: Kaart per categorie:

Prijspeil: Achtergrond kaart:

*Uitvoermap: ...

Figuur 4.71 Schade en Slachtoffermodule – user interface scherm.



Figuur 4.72 Schade en Slachtoffermodule – uitvoer totale schade in euro/ha.

5 Visualisatie

5.1 Inleiding

Er zijn diverse vormen van visualisaties van overstromingssimulaties beschikbaar en denkbaar. In dit hoofdstuk worden enkele visualisatietools beschreven en met plaatjes toegelicht. Verder wordt een toelichting gedaan op een gesprek met de 'VR Dutchman' over Virtual Reality toepassingen. In het kader van het TKI-project 'Hydrologie in D-HYDRO' zal in een pilot de visualisatie nader worden uitgewerkt. De in dit rapport beschreven tools geven input aan die door Hydrologic uit te voeren pilot.

Voor modelleurs zijn nu de volgende tools beschikbaar:

- Interactor (modelleursinterface bruikbaar bij draaien model) en
- DeltaShell (D-HYDRO GUI, in ontwikkeling).

Verder zijn er een aantal tools om de NetCdf uitvoerbestanden van D-FLOW FM te visualiseren:

- Panoply is een door NSA ontwikkelde en gratis verkrijgbare, downloadbare NetCdf viewer. Panoply vereist JAVA 8 of hoger.
- Quickplot wordt standaard als viewer bij D-HYDRO meegeleverd. Quickplot is geprogrammeerd in Matlab en vereist daarom geïnstalleerde Matlab run-time libraries.

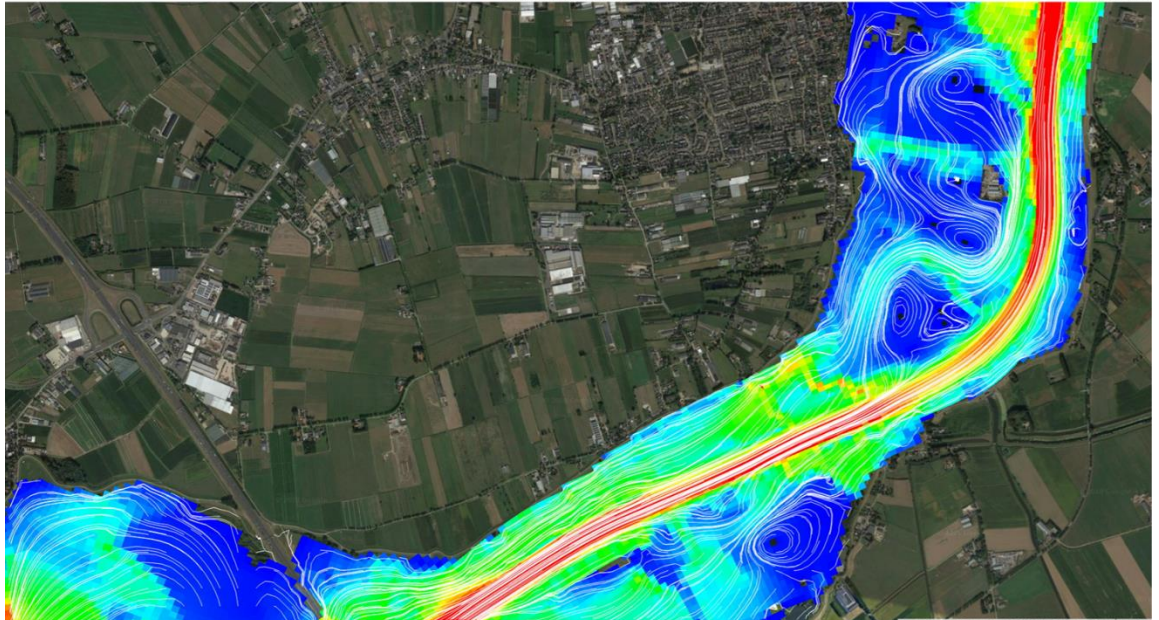
Voor visualisatie in een GIS omgeving is QGIS (open software) een mogelijk te gebruiken pakket. In QGIS 2.18.22 kunnen D-HYDRO uitvoer MAP-bestanden met de Crayfish plugin gevisualiseerd worden. Crayfish is in opdracht van Deltares door Lutra geschikt gemaakt voor de D-HYDRO NetCdf uitvoer. In de nieuwste QGIS 3.x versie is deze plugin opgenomen in de harde kern van QGIS. Uitvoer gebeurt als platte 2D kaart; resultaten van overstromingssimulaties kunnen als avi-film worden geëxporteerd. De functionaliteit wordt momenteel uitgebreid zodat straks ook 1D resultaten naast de 2D resultaten gevisualiseerd kunnen worden.

Voor quasi 3D visualisatie is door Deltares de DFX tool ontwikkeld. Hiermee is het mogelijk om een 3D beeld van een overstroming weer te geven op een kaart die gebaseerd is op open data (of aanvullend ter beschikking gestelde geografische data). Er kan over het projectgebied worden gemanoeuvrerd en een visualisatie als 'birds eye view' worden samengesteld en als filmpje bewaard worden voor demonstraties.

Verder zijn er technieken als de Hololens en visualisatie in Google Streetview beschikbaar.

5.2 Crayfish plug-in tool in QGIS

Met de Crayfish tool in QGIS kan het overstromingsbeeld op een kaart worden gepresenteerd. Ook kan een overstromingsfilmpje voor presentaties gegenereerd worden (avi file). Hier is bij de voortgangsbesprekingen en het demonstreren en analyseren van resultaten gebruik van gemaakt. De meeste van de in hoofdstuk 4 getoonde resultaten zijn met de Crayfish plugin in QGIS gemaakt. Typisch wordt bij zo'n visualisatie de waterdiepte getoond, zodat in één oogopslag het overstroimd gebied en de diepte (hoe donkerder, hoe dieper) duidelijk wordt gevisualiseerd. De QGIS visualisatie kan behalve waterdiepten ook stroombanen en stroomsnelheden visualiseren (zie Figuur 5.1)



Figuur 5.1 Voorbeeld QGIS visualisatie van stroombanen en stroomsnelheden op kaart

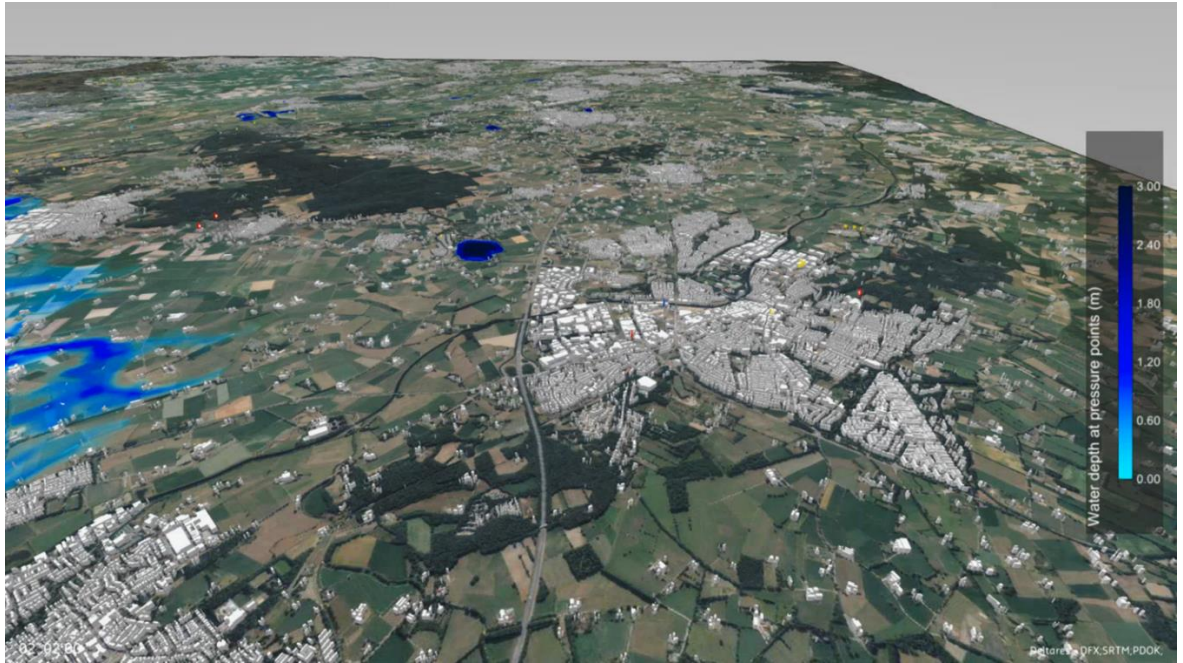
5.3 DFX visualisatie

DFX is een interactieve, quasi 3D visualisatie tool ontwikkeld door Deltares. De door D-HYDRO gegenereerde MAP NetCdf uitvoer kan als invoer gebruikt worden. Verder kunnen op basis van Open Street Map data of andere beschikbare kaartlagen achtergrondkaarten worden toegevoegd. Gebouwen kunnen op basis van een footprint van gebouwen worden 'ingevuld', zodat een 3D-beleving ontstaat.

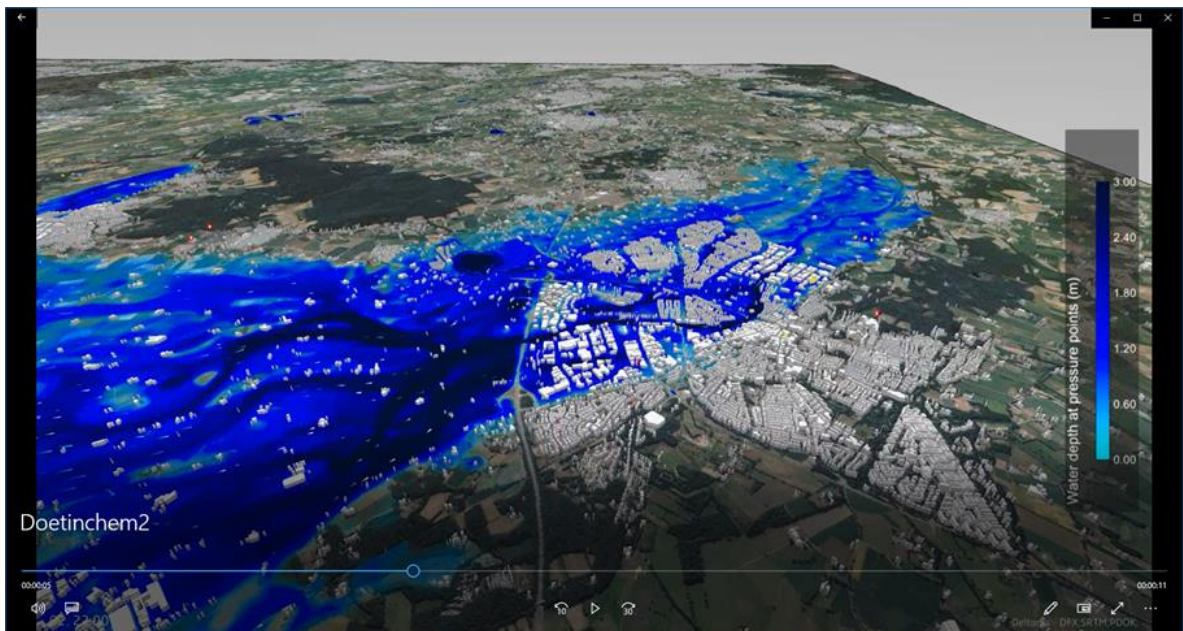
In vergelijking met de kaartvisualisatie in QGIS met Crayfish valt op:

- DFX visualisatie kan 3D aspecten als gebouwen toevoegen (Figuur 5.2);
- De gebruiker kan manoeuvreren over het gebied en op die manier over het gebied vliegen. Dit geeft de mogelijkheid om vanuit een 'birds eye-view' uitzichten op de overstroming uit verschillende invalshoeken te laten zien;
- Er kan een film van resultaten worden gemaakt (net als bij QGIS);
- DFX kan tegelijk zowel waterdiepten als stroomsnelheden visualiseren, waarbij typisch de waterdiepten op een kleurenschaal van lichtblauw (ondiep) naar donkerblauw (diep) wordt weergegeven - overigens zijn de kleuren instelbaar – en stroomsnelheden met pijltjes die langer zijn als het harder stroomt (Figuur 5.3);
- Ook kan het ondergelopen gebied op een bepaald moment tegelijk met een grafiek van een waterdiepte op een geselecteerd punt worden gevisualiseerd, waarbij op basis van het geselecteerde tijdstip in de grafiek het bijbehorende kaartbeeld van de overstromingen wordt getoond;
- Datzelfde kan ook voor een cross-sectie, waarlangs waterdieptes in een aparte grafiek kunnen worden gevisualiseerd (Figuur 5.4);
- 1D en 2D resultaten kunnen tegelijk worden gevisualiseerd (Figuur 5.5);
- DFX kan gekoppeld worden met CIRCLE, de Deltares tool die Critical Infrastructure effecten kan laten zien.

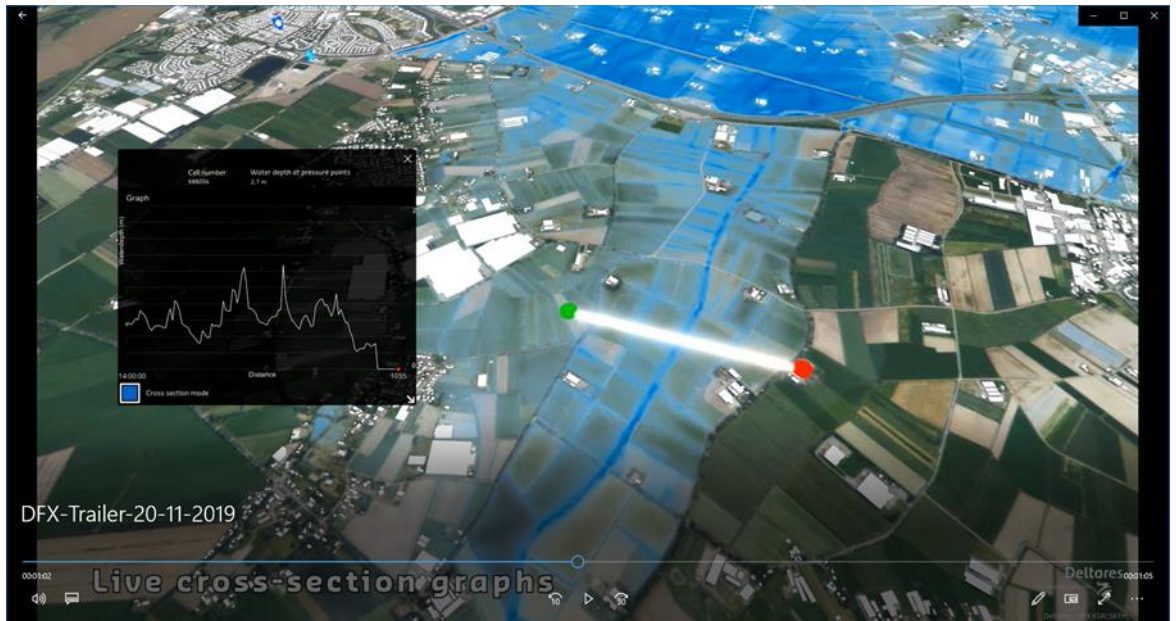
DFX maakt o.a. gebruik van Unity, dat ook in de Virtual Reality wereld gebruikt wordt. De volgende figuren tonen een aantal voorbeelden van visualisatie met DFX.



Figuur 5.2 Voorbeeld DFX visualisatie



Figuur 5.3 Voorbeeld DFX visualisatie (waterdiepte, pijltjes voor stroomsnelheden)



Figuur 5.4 Voorbeeld DFX visualisatie – cross-sectie grafiek



Figuur 5.5 Voorbeeld DFX visualisatie – 1D en 2D resultaten

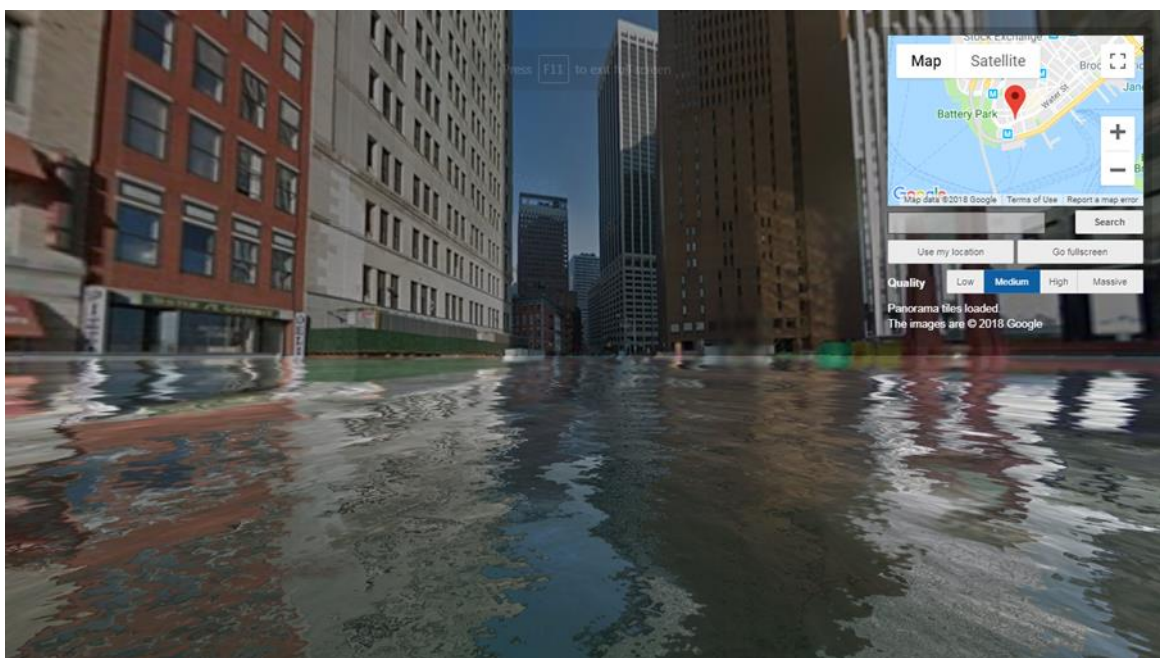
5.4 Overig

Met Hololens zijn diverse visualisaties te projecteren (bijvoorbeeld op een virtueel tafelblad)



Figuur 5.6 Voorbeeld Hololens

In Google Streetview is het – zo blijkt uit onderstaande figuur – mogelijk om een (vaste) geprojecteerde waterhoogte realistisch te projecteren op een straatbeeld. Dus dit is een statisch beeld, niet gekoppeld aan een overstromingssimulatie.



Figuur 5.7 Voorbeeld Google Streetview visualisatie

5.5 VR visualisatie

Bij het projectoverleg van 29 oktober is door Bart Kok een uitleg en demonstratie van de mogelijkheden van Virtual Reality gegeven (<https://thevirtualdutchmen.com/archivision-tvdm/>) Hij is creative director bij een Virtual-Reality bedrijf gevestigd in Almelo. Bij dit overleg waren behalve WRIJ en Deltares ook 2 mensen van Hydrologic aanwezig, omdat Hydrologic in het kader van het TKI project "Hydrologie in D-HYDRO" een pilot visualisatie gaat doen. In dit TKI-project zullen resultaten van (onder andere) het dijkkring-48 D-HYDRO model gebruikt worden.

Tijdens de meeting werd na een korte uitleg een demonstratie gegeven, waarbij de deelnemers met een VR-bril op in een VR-wereld konden rondlopen. Op deze manier is het dus mogelijk om in 3D ontwerpen rond te lopen, of op afstand ontwerpen met elkaar door te nemen. Voor een dergelijke toepassing doet Bart een project bij Dura Vermeer.

Met VR kun je een groep bij elkaar brengen in een virtuele wereld, waarbij ieder hetzelfde beeld kan zien en geluiden kan horen. Je hoeft dus niet fysiek bij elkaar te zitten, maar op afstand. Dat is op zich vergelijkbaar met Skype, maar in Skype is er nog geen 'virtuele wereld'. Dat is het grote verschil met VR: hierin kun je gezamenlijk (virtuele) beelden bekijken op verschillende manieren, op verschillende schalen. Bart noemt VR ook wel het nieuwe powerpoint.

Na de demonstratie is er nog kort doorgesproken over technische aspecten, en hoe VR-technieken te gebruiken zouden zijn in de wereld van het waterbeheer en overstromingen. Daarover een aantal opmerkingen:

- Een van de engines die Bart gebruikt is Unity; dit wordt ook in DFX gebruikt;
- Step bestanden en Revit software worden gebruikt in de wereld van AR (augmented reality) en VR (virtual reality);
- DFX visualisatie ziet er al heel goed uit volgens Bart;
- Gebruik maken van de point cloud data bij de visualisatie wordt niet aangeraden door Bart. De point cloud data is daar te zwaar voor (veel te veel gigabytes);
- Wel zou een mogelijkheid zijn om naast de bird's eye view zoals in DFX, van een aantal landmarks (photogrammetry) foto's en 360 graden beelden te hebben waarop een overstroming zoals bv. in Google Streetview (zie Figuur 5.7) geprojecteerd zou kunnen worden. Dus meer vanuit menselijk perspectief op de grond;
- Het is nog niet haalbaar om voor elke willekeurige locatie of huis realistische beelden te maken, het moet beperkt blijven tot bekende plekken (centrum, kerk, stadhuis);
- Het sterke punt van VR is dat je zelf in de 3D wereld kunt stappen.

Verder zijn op internet diverse filmpjes te vinden over dit onderwerp, zoals de Google 3D viewer, virtual reality, augmented reality, mixed reality (Mike Abrash).

De conclusie van het overleg was dat eerst de opgedane indrukken moeten bezinken. Vervolgens moet er nagedacht worden over vervolgstappen. Hiervoor zal Hydrologic in het kader van het TKI-project een overleg organiseren tussen WRIJ, Hydrologic en Deltares.

De belangrijke vragen zijn:

- Wat is er nodig om dit soort technieken toe te passen?
- Wat zouden we willen en kunnen in het kader van de pilot visualisatie in het TKI-project?

6 Gebruikersschil

6.1 Inleiding

Door WRIJ is voorafgaand aan het project voor de modellering van dijkkring 48 een 'programma van eisen' opgesteld. Dit programma van eisen gaat in op eisen die aan het modelpakket en de te maken modelschematisatie gesteld worden (zoals o.a. de performance eisen met betrekking tot de rekentijden voor scenarioberekeningen en voor calamiteiten). Een ander deel van de eisen gaat in op de gebruikersomgeving. Daarin kan onderscheid worden gemaakt tussen een interface voor de modelleur (de D-HYDRO GUI en tools daar omheen) en een gebruikersschil voor derden.

Voor wat betreft de eisen aan de rekenkern voldoet D-HYDRO al aan veel van de eisen, en in het ontwikkeltraject dat momenteel loopt voor 1D-functionaliiteit en hydrologie in D-HYDRO wordt de belangrijkste ontbrekende functionaliteit in de rekenkern toegevoegd.

Eind december 2019 wordt een versie van D-HYDRO met 1D functionaliteit uitgebracht. De rekenkern zal dan de 1D functionaliteit voor waterschappen goed ondersteunen. De user-interface bouwt voort op de in eerdere TKI projecten ontwikkelde GUI maar zal dan nog niet compleet zijn. Die ontwikkelingen worden in 2020 voortgezet.

Een gebruikersschil voor derden (niet-modelleurs) stelt heel andersoortige eisen dan de eisen die aan de D-HYDRO (modelleurs)interface gesteld worden. Dan komen ook zaken als gebruikerslogging en (rechten tot) toegang tot informatie om de hoek kijken. Het wordt dan belangrijk te registreren wie welke informatie heeft geplaatst, goedgekeurd, en wie bepaalde informatie mag bekijken, editen, plaatsen of verwijderen. Dit valt echter buiten de D-HYDRO interface.

Door het regelmatige overleg en het meekijken met modelbouw en analyse van resultaten van het D-HYDRO model van dijkkring 48 heeft WRIJ nu een beter begrip voor de mogelijkheden, en heeft het project geholpen om de introductie van het gebruik van D-HYDRO binnen WRIJ qua informatiebehoefte, datastromen en proces nu scherper in beeld te hebben.

6.2 Aanscherping eisen

In het project zijn de diverse manieren van visualisatie gebruikt en toegelicht. Kijkend naar de diverse visualisaties is de conclusie getrokken dat met de reeds beschikbare technieken er voldoende mogelijkheden voor de modelleur zijn om resultaten van modelruns te analyseren en ook om deze op inzichtelijke wijze te presenteren aan niet-modelleurs met behulp van andere pakketten.

WRIJ heeft intern op een rijtje gezet hoe het gebruik van D-HYDRO binnen WRIJ georganiseerd zou kunnen zijn, hoe informatiestromen zouden lopen en welke pakketten flankerend gebruikt worden. Dit is door WRIJ in een stroomschema weergegeven (appendix F)

Voorzien wordt dat de volgende pakketten gebruikt worden:

- Operationele systemen (IWP Twentekanalen, RWS-OS) voor actuele waterstanden en debieten;
- D-HYDRO als modelpakket hydrodynamische modellering overstromingen;
- GIS pakketten: ArcGIS (standaard GIS pakket bij het waterschap) en QGIS;

- Beide kunnen gebruikt worden voor voorbereiding en bewerking van specifieke geografische informatie tot invoer voor het D-HYDRO model. Met QGIS kunnen ook modelresultaten worden gevisualiseerd (Crayfish plugin) en filmpjes van resultaten worden gemaakt. Voorzien is dat ook resultaten met ArcGIS tot kaarten voor derden worden bewerkt;
- DFX visualisatietool voor 3D visualisatie van modelresultaten en genereren van filmpjes van resultaten.

Behalve reeds binnen WRIJ beschikbare data zijn er belangrijke Nederlandse databronnen als AHN3, PDOK, BGT. Voor actuele informatie over waterstanden en debieten is naast WRIJ zelf Rijkswaterstaat belangrijk voor actuele informatie over de Rijkswateren langs de grenzen van de dijkringen van WRIJ. Het gaat dan om actuele waterstanden op de Rijn, Pannerdens kanaal, de IJssel en de Twentekanalen.

Resultaten van scenarioberekeningen kunnen na goedkeuring verspreid worden naar LDO en LIWO (in de toekomst naar verwachting geïntegreerd in de LVO, Landelijke Voorziening Overstromingsinformatie), en van daar ook naar websites als overstroomik.nl, risicokaart.nl. Bij een calamiteit zullen resultaten via ArcGIS kaarten of filmpjes getoond kunnen worden, zowel voor derden intern WRIJ als voor externen. Hierbij zullen naast de modellers/hydrologen ook de calamiteitenorganisatie en communicatie betrokken zijn.

In het oorspronkelijke 'programma van eisen en wensen' voor de modellering zijn vooraf door het waterschap diverse aandachtspunten op een rij gezet. Doel is het maken, beheren en runnen van modelschematisaties, en het goed geregeld hebben van opslag en validatie van modellen en resultaten. De aandachtspunten kunnen onderverdeeld worden in eisen aan de D-HYDRO rekenkern, de D-HYDRO GUI voor modellers, en een gebruikersschil voor derden. De onderstaande tabellen bevatten de eisen en wensen verdeeld over deze categorieën. Eisen en wensen in het PvE die niet rechtstreeks op de rekenkern of user-interface betrekking hebben zijn hierin weggelaten. Bijvoorbeeld, in par. 3.3.1 punt 2 staat genoemd dat er met het model dijkdoorbraakscenario's moeten worden geactualiseerd, en data voor LDO en LIWO aangeleverd kunnen worden. Dit is een activiteit die logisch valt na het uitvoeren van het pilot project, maar geen extra eisen stelt aan de D-HYDRO rekenkern of user-interface.

Tabel 6.1 Eisen en wensen voor de rekenkern D-HYDRO

nr. in PvE ISO	Omschrijving	Eis wens	D-HYDRO Rekenkern Beschikbaar?	opmerking
3.3.1.				
1	overstromingsgebied	Eis	Ja	
	Diepte	Eis	Ja	
	Snelheid	Eis	Ja	
	Aankomsttijd	Eis	Nee	postprocessing stap
	Kade doorsteek	Eis	Ja	
	Uitval gemalen	Eis	Ja	Eventueel via sturing
	Noodpompen	Eis	Ja	Eventueel via sturing
	Effect overloop	Eis	Ja	
	Extreme neerslag	Eis	Ja	
	Over 5 jaar: Live aanvullende simulaties binnen 1 uur bij calamiteit	wens	Ja, maar nog niet snel genoeg qua rekentijd	Rekentijd D-HYDRO wordt voorjaar 2020 opgepakt
2	Regionale wateroverlast	wens	ja	Neerslag (zowel constant, tijdreeks, als variabel in tijd en ruimte) op het 2D grid is mogelijk. Ook open water verdamping en infiltratie in de bodem. Dit is niet toegepast in pilot.

nr. in PvE ISO	Omschrijving	Eis wens	D-HYDRO Rekenkern Beschikbaar?	opmerking
2	Koppeling naar HIS-SSM (D-FIAT)	wens	Ja, op basis van D-HYDRO uitvoerbestanden	Uitvoer van D-HYDRO is na conversie naar een regelmatig grid (via los script) bruikbaar voor SSM. Dit is in de pilot toegepast.
3.3.2				
1	D-HYDRO of opvolger	eis	Ja	
2	Modelgebied (WRIJ + Duitsland)	eis	ja	Reeds in pilot gebruikt
	Dijkdoorbraakdebiet (variabel in de tijd) of bresgroefunctie met instelbare parameters	eis	Alle opties zijn beschikbaar in de rekenkern	In pilot beide opties gebruikt (Bislich en Spijksedijk debiet, Herwen en Loo bresgroef)
	Dijkdoorbraak op willekeurige door gebruiker op te geven locatie	eis	Ja	In pilot reeds gebruikt
3	Cascade-effecten naar andere dijkringen	wens	Ja	Kan als losse modelkoppeling of in 1 groot D-HYDRO model (afhankelijk van o.a. performance wensen)
4	Effect bres op rivierwaterstand	wens	ja	Toegepast in pilot met 1D Rijntakken model. In toekomst uit te breiden naar 1D model incl. Duits deel Rijn en optie 2D riviermodel
5	Bezwijken keringen als functie van belasting	wens	Ja	Via sturingsmodule RTCTools gekoppeld met D-HYDRO FM (iets dergelijks is eerder voor SOBEK-2 en RTC gedaan in Zeeland)
6	Vollopen en leeglopen	eis	ja	Toegepast in pilot Voor gemalen die tijdelijk uitvallen is sturing via RTCTools nodig.
7	Rekensnelheid: bij calamiteit binnen 1 uur 2 dagen doorgerekend	wens	Nu nog niet	Aan rekentijd-issues wordt voorjaar 2020 gewerkt, en hoewel harde garanties niet te geven zijn, is de hoop dat er dan aan deze wens wordt voldaan.
8	Interactief model	wens	nee	Alleen in Interactor omgeving, dat is een niet-standaard modellersomgeving. So-wie-so is stoppen van de berekening met behoud van de resultaten tot dan toe mogelijk.
11	Modelaanpassing	Eis	Ja	
12	Roosteraanpassing	eis	ja	
13	Prestatie (stabiliteit, uptime)	eis	ja	
15	Presentatie, diverse punten voor de user-interface en soms impliciet voor de rekenkern	eis	Ja, met uitzondering van j (postprocessing)	Presentatie van deze resultaten vereist dat ze door de rekenkern worden berekend of via postprocessing
16	Live rekenen in modellersomgeving		Ja	Interactor modellersomgeving;
18	Aankomsttijd	eis	Nu nog als postprocessing op uitvoer	
23	Kunstwerken en waterlopen (shp file) opnemen in model, inclusief sturing (uitval) in model	Eis	Rekenkern	Basis in D-HYDRO model, eventuele sturing via RTC-Tools

De wensen en eisen voor de user-interfaces van zowel het rekeninstrumentarium als de gebruikersschil voor derden worden toegelicht in de volgende tabel. Omdat de gebruikersschil voor derden er nog niet is, en de GUI voor D-HYDRO in ontwikkeling, wordt volstaan met aan te geven of het een aspect is voor de D-HYDRO GUI of voor de gebruikersschil derden.

Tabel 6.2 Eisen en wensen voor de user-interfaces (D-HYDRO GUI en gebruikersschil derden)

nr. in PVE ISO	Omschrijving	Eis wens	Voor D-HYDRO GUI en/of gebruikersschil derden	opmerking
3.3.1.				
1	overstromingsgebied	Eis	Beide	
	Diepte	Eis	Beide	
	Snelheid	Eis	Beide	
	Aankomsttijd	Eis	Beide	
	Effect kade doorsteek	Eis	Beide	
	Effect uitval gemalen	Eis	Beide	
	Effect noodpompen	Eis	Beide	
	Effect overloop	Eis	Beide	
	Extreme neerslag	Eis	Beide	
	Over 5 jaar: Live aanvullende simulaties binnen 1 uur bij calamiteit	wens		
2	Regionale wateroverlast	wens	Beide	
2	Koppeling naar HIS-SSM (D-FIAT)	Wens	-	off-line koppeling
3.3.2				
1	D-HYDRO of opvolger	eis	D-HYDRO GUI	
2	Modelgebied	eis	beide	
	Dijkdoorbraakdebiet (variabel in de tijd) of bresgroefunctie met instelbare parameters	eis	D-HYDRO GUI	
	Dijkdoorbraak op willekeurige door gebruiker op te geven locatie	eis	D-HYDRO GUI	
3	Cascade-effecten naar andere dijkringen	wens	beide	
4	Effect bres op rivierwaterstand	wens	Beide	
5	Bezwijken keren als functie van belasting	wens	D-HYDRO GUI	
6	Vollopen en leeglopen	eis	Beide	
8	Interactief model	wens	D-HYDRO GUI	
9	Metadata	eis	gebruikersschil	Wie heeft welke modelruns in de schil ge-upload, wat zijn de uitgangspunten van een modelrun, etc.
11	modelaanpassing	Eis	D-HYDRO GUI	
12	Roosteraanpassing	Eis	D-HYDRO GUI	
13	Prestatie (stabiliteit, uptime)	Eis	beide	
14	Omgeving			Definieert het verschil tussen modelleuromgeving en gebruikersschil derden
15	Visualisatie	Eis	gebruikersschil	
15a	Alleen relevante vensters, menu's, balken en buttons	eis	gebruikersschil	
15b	ondergrond een 2D ;luchtfoto en/of topografie	eis	gebruikersschil	Bv. in QGIS or ARCGIS visualisatie zoals in pilot gebruikt
15c	3d weergave	wens	gebruikersschil	Bv. DFX zoals in pilot gebruikt
15d	kaartopmaak vooraf door applicatiebeheerder gedefinieerd; aanpasbaar door gebruiker	wens	gebruikersschil	
15e	grafieken per lokatie opvraagbaar van tijdsverloop waterstand, diepte, stroomsnelheid, kruin, debiet	eis	gebruikersschil	
15f	stroming in 1D waterlopen visualiseren	eis	gebruikersschil	
15g	het is zichtbaar of een gemaal werkt of niet	eis	gebruikersschil	
15h	bres en bresgrootte visualiseren	eis	gebruikersschil	

nr. in PvE ISO	Omschrijving	Eis wens	Voor D-HYDRO GUI en/of gebruikersschil derden	opmerking
15i	overloop van kades en keringen visualiseren	eis	gebruikersschil	
15j	getroffen gebouwen visualiseren	eis	gebruikersschil	
15k	in/uitzoomen, pannen, zoeken op adres	eis	gebruikersschil	
15l	info i-tje voor kaartlagen met eigenschappen	eis	gebruikersschil	
15m	afstanden op kaart door de gebruiker te meten	eis	gebruikersschil	
15n	gebruiker kan hoogteprofielen maken met maaiveld en waterlopen	eis	gebruikersschil	
15o	rekeningrid kan getoond worden	eis	gebruikersschil	
15p	webviewer met webservices - achtergrondkaarten WRIJ	eis	gebruikersschil	
16	live berekeningen in modellersomgeving, mogelijk interrompeerbaar om invoer aan te passen	Wens	D-HYDRO GUI	
17	presentatie op gedetailleerder DEM dan rekenDEM, 10x10m voor de hele dijkkring, 2x2m voor toepassingen <100km ²	Eis	Gebruikersschil	Vereist postprocessing
18	export uit modelluromgeving naar gebruiksschilomgeving	eis	D-HYDRO GUI En ook de gebruikersschil	Equivalent: import in gebruikersschil, alleen voor bepaalde gebruikers
18a	zie kaartlagen bij punt 1	eis	beide	
18b	time of wetting, time of reaching 0.5 m depth (of instelbaar, postprocessing!)	eis	beide	
18c	default legenda voor diepten 0-0.3m, 0.3-0.5m, 0.5-2.0m, 2-4m, >4m	Eis	Gebruikersschil	Merk op dat er ook andere standaarden zijn (bv. Leidraad, ROR klassen).
18d	default legenda voor stroomsnelheid nog n.t.b.	eis	gebruikersschil	
19	naast kaarten ook punt info met tijdreeksen	eis	gebruikersschil	
19a	bres: bresbreedte, diepte, nat oppervlak, stroomsnelheid, (debiet, waterstand)	eis	gebruikersschil	
19b	punt- en lijnelementen 1D: standaard uitvoer	eis	gebruikersschil	
19c	rekenpunten 2D: waterstand, diepte., stroomsnelheid	eis	gebruikersschil	
Informatiekoppelingen en opslag				
20	export naar LDO	eis	D-HYDRO GUI / gebruikersschil	
21	export naar (Arc)GIS bestanden (.gdb raster, .shp, of .wfs service)	eis	D-HYDRO GUI / gebruikersschil	
22	data volgens open standaarden	eis	Beide	
Gebruik				
24	Single Sign on voor gebruikers/beheerders, rolverdeling via rechten	Eis	Gebruikersschil	
25	afh. Type gebruiker: opvragen historische gegevens	eis	gebruikersschil	
26	afh. Type gebruiker: starten scenario simulatie	eis	gebruikersschil	
27	modelconfiguratie door gebruiker		D-HYDRO GUI Gebruikersschil	
28	Zo weinig mogelijk aanpassingen aan maatwerk programmatuur door update standaardprogrammatuur	eis	Beide	
29	Installatie op systemen WRIJ via msi en andere richtlijnen (bijlage 4.1)	eis	beide	D-HYDRO komt met een msi
30	Onderhoudscontract en support apart af te sluiten	eis	beide	
31	Documentatie, handleidingen, tutorials aanwezig	eis	beide	D-HYDRO documentatie is beschikbaar

nr. in PvE ISO	Omschrijving	Eis wens	Voor D-HYDRO GUI en/of gebruikersschil derden	opmerking
32	Installatie op systemen WRIJ volgens richtlijnen waterschap, zie punt 29	eis	beide	
3.3.3	Documentatie eisen			
1	Ontwerpdocumenten en documentatie Standaard / maatwerkprogrammatuur	Eis	Beide	D-HYDRO komt met documentatie 'as-is'. Gebruikersschil is maatwerk, ontwerp zal gemaakt moeten worden.
2	Documentatie standaard: gebruik, installatie, configuratie	eis	D-HYDRO	
3	Doc. Maatwerk: gebruik, installatie, configuratie, rekenmethode	eis	gebruikersschil	
4	documentatie als doorzoekbare .pdf en in bewerkbare vorm (.docx, xls, .vsd etc)	eis	beide	
5	bij levering documenten als .pdf en ook brondocument 'as built'	eis	beide	
3.3.4	Versiebeheer			
1	Bij oplevering standaardprogrammatuur: de meest actuele versie	eis	beide	
2	bij onderhoud: update met meest recente releases	eis	beide	
3.3.5	Informatie bestaande systemen / modellen /bronnen			
1	Duitsland GIS hoogtekaart 1x1m, watergangen en stroomgebieden	eis	beide	Is nu inderdaad als basiskaart gebruikt
2	Dashboard Weer en Water (ArcGis online, hydronet services, kiwis en wiski, etc)	eis	beide	

7 Oplevering

7.1 D-HYDRO software en modelschematisaties

Aan het waterschap wordt bij de afronding van het project het volgende opgeleverd:

- De gebruikte D-HYDRO versie (Dflow FM versie 1.2.88.65640M, Dec 10 2019, 20:40:12) of nieuwer;
- Beleidsmodel dijkkring 48 met 6 scenario sommen voor dijkdoorbraken, inclusief beschikbare filmpjes van resultaten;
- Een complete set invoer- en uitvoerbestanden van de schade-slachtofferberekeningen; en
- Eerder in het project zijn al diverse filmpjes van modelresultaten en presentaties van voortgangsbesprekingen geleverd.

WRIJ zal D-HYDRO draaien op de server waarop ook het AMIGO grondwater model draait. De D-HYDRO software suite wordt geleverd via een msi (Microsoft Installer).

7.2 Visualisatietools

Naast de standaard D-HYDRO software zijn een aantal modelleurstools en/of visualisatietools beschikbaar. Hierbij maken we onderscheid in:

- NetCdf viewers:
 - Panoply is een standaard, vrij beschikbare, NetCdf viewer van NASA. Panoply heeft regelmatig updates en kan worden gedownload van: <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/download/> Panoply vereist een computer met Java versie 8 of later geïnstalleerd.
 - Quickplot
Quickplot is een NetCdf viewer die standaard bij D-HYDRO en Delft-3D 4 wordt meegeleverd. Quickplot is in Matlab is geprogrammeerd en vereist daarom de installatie van Matlab runtime libraries.
- GIS viewer:
In het open-source pakket QGIS is in QGIS 2.18.22 en latere versies een plugin beschikbaar waarmee de NetCdf MAP uitvoerbestanden van D-HYDRO kunnen worden gevisualiseerd in GIS. Vanaf QGIS 3.6 is de functionaliteit van de Crayfish plugin opgenomen in de QGIS kern, dus is het dan niet meer nodig om een aparte als aparte plugin te installeren. QGIS kan worden gedownload via <https://www.qgis.org/nl/site/forusers/download.html> of <https://qgis.org/downloads/>.
- DFX
DFX is een door Deltares ontwikkelde open-source viewer om (D-HYDRO) NetCdf uitvoerbestanden te kunnen visualiseren in een quasi 3D omgeving. De meest recente en geteste DFX-versie wordt geleverd aan WRIJ. DFX wordt als een zip file of een folder met een set bestanden geleverd en kan vrij gebruikt worden door WRIJ.

8 Conclusies en aanbevelingen

Bij de opzet van het model voor dijkkring 48 is nauw samengewerkt met het waterschap. Hierdoor is het waterschap goed op de hoogte van de gemaakte keuzes en weet het waterschap wat er in het model is opgenomen. Dat is belangrijk voor het toekomstig gebruik door het waterschap en/of voor de beoordeling van modelleerwerk met dit model (door derden) door het waterschap.

Bij de opzet van het model is voor diverse stappen gebruik gemaakt van scripts, zodat kritische stappen in het modelleerproces reproduceerbaar en herhaalbaar zijn. Het model opzetten is immers een iteratief proces, waarbij vaak keuzes nog eens worden herzien of opnieuw getoetst, en dan is het gewenst dat handwerk zoveel mogelijk wordt vermeden. Voor het Duitse deel van het model is gebruik gemaakt van beschikbare (open) data van NordRhein-Westfalen. Er is aandacht besteed aan het consistent krijgen van de basisdata voor het hele gebied. Bij de verdere detaillering met 1D waterlopen e.d. heeft de nadruk wel gelegen op het Nederlandse deel van dijkkring 48, dus het deel van de dijkkring dat bij WRIJ in beheer is.

Het proces van modelbouw is uitgebreid in dit rapport beschreven, zowel toelichtend en beschrijvend in hoofdstuk 3, als meer voorschrijvend (als een kookboek) in Appendix A. Dit geeft een goede beschrijving voor het opzetten van modellen voor andere dijkkringen. De Leidraad Overstromingssimulaties is hierbij strikt gevolgd. De enige punten waarop afgeweken is, gaan om interpolatiemethode (bilineair is gebruikt, omdat mediane interpolatie nog niet beschikbaar was) en het verfijnen van het rekengrid bij verhoogde lijnelementen omdat dit de kwaliteit van de resultaten ten goede komt.

Het model voor dijkkring 48 is getest op diverse aspecten, zowel tijdens de bouw als na afronding van de bouw en het gereedkomen van het 1D2D model. Tijdens de bouw is een 2D modelversie getest voor Spijksedijk en Bislich dijkdoorbraken (door het dijkdoorbraakdebiet op te drukken). Het uiteindelijke 1D2D model is getest voor een zestal scenario-berekeningen voor dijkdoorbraken op 2 locaties (Loo en Herwen) met verschillende parameters. Deze berekeningen zijn gerapporteerd in het nu voorliggende rapport.

Uit de berekeningen zijn al belangrijke conclusies getrokken:

- Door het meenemen van meer detail zoals uitlaten, secundaire dijken en kerende wegen, tunnels en onderdoorgangen, en het rekenen op fijnere resolutie, zullen resultaten zeker op details afwijken van oude berekeningen met SOBEK2, DelftFLS of de GRADE schematisatie. Het globale beeld van de tot op heden gemaakte en gerapporteerde berekeningen sluit wel aan bij de verwachtingen van het waterschap.
- Het is belangrijk om ervaring op te doen met het model en de gevoeligheden voor verschillende parameters.
- Een ervaring uit de tot op heden gemaakte berekeningen is dat de dijkdoorbraakformulering gevoelig is voor zowel de parameters van de doorbraak zelf (bv. moment van doorbreken, diepte van de bres, type zanddijk of kleidijk, gebruikte 2D waterstandspunten voor het verval over de bres), maar ook voor de gebruikte weerstand in het 2D grid (gevoeligheid winter-zomerruwheid).
- Bij de huidige sommen, met de 2D waterstandspunten vlak voor en achter de breslocatie, blijkt dat de bresbreedtes smaller zijn dan aangenomen in oude berekeningen. Het is daarom belangrijk om de gevoeligheid van de Verheij-van der Knaap bresgroeiformulering voor de verschillende parameters goed in kaart te brengen. Zodra de 1D2D Levee breach ook beschikbaar is met de Verheij-van der Knaap formulering, kan de bresgroeiformulering

ook direct op 1D2D verbindingen worden toegepast (in plaats van nu alleen tussen 2D cellen).

- Bij de modellering zijn veel keuzes gemaakt, samen met het waterschap. Belangrijk is om steeds goed te bedenken welke invloed die keuzes kunnen hebben op het uiteindelijke resultaat. Zo kan voor dijkkring 48 het wel of niet meenemen van sturing op de stuw bij Doesburg in de Oude IJssel een belangrijk aspect zijn om nader te onderzoeken (in het huidige model is de stuw ingesteld op een vaste kruinhoogte). Ook het al of niet bezwijken van een secundaire kering of geluidsscherm is een optie die nu niet is meegenomen (geluidsscherm Betuwelijn is kerend verondersteld tot een hoogte van 1.5 meter).

Geadviseerd wordt dat het waterschap het 1D2D model van dijkkring 48 in 2020 gaat gebruiken voor meer gevoeligheidsanalyses om ervaring op te doen met het model en het maken van scenario-berekeningen voor diverse dijkdoorbraken en afvoergolven op de Rijn. Deze sommen geven inzicht in het systeemgedrag dat zeer belangrijk is voor een eventuele calamiteit. Verder leveren deze berekeningen input aan de LDO database van overstromingsberekeningen.

Voor visualisatie van modelresultaten kan het waterschap op dit moment goed uit de voeten met de nu beschikbare visualisaties in QGIS (Crayfish plugin) en de DFX visualisatietool van Deltares. In het TKI-project "Hydrologie in D-HYDRO" is een pilot visualisatie gepland, waarin o.a. gebruik zal worden gemaakt van D-HYDRO modelresultaten van WRIJ. In de pilot worden diverse visualisatieopties nader bekeken, waaronder ook Virtual Reality.

Resultaten van het model kunnen worden gebruikt voor schade- en slachtofferberekeningen met D-FIAT. De schade van de doorgerekende dijkdoorbraak Loo (som 2) is ruim 7 miljard euro met bijna 500 slachtoffers. Bijna 100000 personen worden bij deze overstroming getroffen.

Het huidige D-HYDRO model van dijkkring 48 is nu gekoppeld met het Nederlandse Rijntakken model (gebaseerd SOBEK3 model "SOBEK-Rijn-J17_5-v3"). Dit model is geconverteerd naar een 1D D-HYDRO schematisatie en gekoppeld aan het dijkkring 48 1D2D model. Omdat D-HYDRO en SOBEK3 verschillende rekencodes zijn, en omdat er in het SOBEK3 Rijntakken model gebruik wordt gemaakt van 'extra resistance' (knopen met een extra weerstand) die nog niet in D-HYDRO beschikbaar zijn, zijn er voor het Rijntakken model wat verschillen in berekende maximale 1D waterstanden. Omdat er op termijn betere D-HYDRO schematisaties (inclusief het Duitse deel) van de Rijn langs dijkkring 48 beschikbaar zullen komen wordt aanbevolen die aan te sluiten. Ook kan bij koppeling met een 1D Rijntakken model op termijn gebruik worden gemaakt van de 1D2D levee breach als alternatief voor de nu gebruikte (2D-2D) schematisering.

Dijkdoorbraken in Duitsland moeten nu in het model worden gesimuleerd door het dijkdoorbraakdebiëet direct in het 2D-deel van het model op te drukken (source-sink methode). Idealiter zou een 1D of 2D model inclusief het Duitse deel van de Rijn (vanaf Wesel) zijn gekoppeld. Een 2D D-HYDRO model (of snel in D-HYDRO om te zetten model) is echter nog niet beschikbaar. Een 1D SOBEK-3 model inclusief het Duitse deel van de Rijn is er wel, maar de grensoverschrijdende samenwerking bleek een tijdrovend proces. Daarom is in overleg met het waterschap uiteindelijk besloten om in dit project alleen het beschikbare Nederlandse model van de Rijntakken aan te sluiten. Het waterschap neemt in 2020 verdere stappen om intensiever op dit vlak met Rijkswaterstaat WVL en Nordrhein-Westfalen (NRW) samen te werken. Aanbevolen wordt om op basis hiervan in de nabije toekomst een gekalibreerd D-HYDRO 1D of 2D riviermodel inclusief het Duitse deel aan te sluiten aan het dijkkring 48 model.

Deltares zal de D-HYDRO software en visualisatietool DFX, en het model met de gemaakte berekeningen overdragen aan WRIJ. De D-HYDRO software (zowel rekenkern als user-interface) en visualisatietool DFX zijn continu in ontwikkeling. Het waterschap zal op de hoogte worden gehouden van nieuwe versies en verbeteringen in de software.

9 Referenties

Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland: Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok), ATKIS-Objektartenkatalog Basis-DLM version 7.1.rc.1, 2018.

M. Arends, projectbureau VNK2: Veiligheid Nederland in Kaart 2, Overstromingsrisico Dijkkring 48 Rijn en IJssel. VNK2, oktober 2014.

N.E.M. Asselman: Modelleren rampenscenario's Vallei & Eem. WL | Delft Hydraulics rapport Q2903, 2001

A. Becker: 1D2D model of the Lower Rhine and the upper Dutch Rhine branches between Andernach and Nijmegen, Arnhem and Zutphen. Deltares-rapport 11203685-002-ZWS-0003, december 2019 (in concept).

K.D. Berends: Rijnmodellen 5^e generatie SOBEK, 5^e generatie SOBEK-Rijntakken kalibratiemodel. Deltares rapport 1207880-002-ZWS-0005-v2, 2013.

Karin de Bruijn, Kymo Slager, i.s.m. Rene Piek, Durk Riedstra, Robert Slomp: Leidraad voor het maken van overstromingssimulaties, Deltares rapport 11200537-002, februari 2018.

H. Chbab, Waterstandsverlopen Rijntakken en Maas, Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017. Deltares rapport 1220082-002, 2016.

H. Chbab, J. den Bieman, J. Groeneweg: Hydraulische belastingen Rijntakken en Maas, Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium WBI-2017. Deltares rapport 1230087-003, 2017.

Deltares: D-FLOW FM User Manual. Deltares, oktober 2019

W. van Doornik en F. Hoefsloot: Baseline Trans Boundary Rhine. Baseline schematisation including embanked areas. Documentcode: 16M2007.RAP001.05. LievenseCSO, Juni 2017.

G.W. Hazeu, C. Schuiling, G.J. Dorland, G.J. Roerink, H.S.D. Naeff en R.A. Smidt, Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland versie 7 (LGN7), Alterra Wageningen UR, juli 2014.

M. Hegnauer, J.J.Beersma, H.F.P van den Boogaard, T.A. Buishand, R.H. Passchier: Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins, Deltares rapport 1209424-004, 2014.

M. Hegnauer, Discharge statistics for Rhine and Meuse – Based on improved GRADE models. Deltares, draft report 11202192-004, 2018.

W. van der Ham: Afleiden of opruimen, de strijd om de beste aanpak tegen het rivierbederf. Spankrachtstudie, Rijkwaterstaat, 2004.

PDOK (Publieke Dienstverlening op de kaart): <https://www.pdok.nl/nl/ahn3-downloads>

G.F. Prinsen, M. Hegnauer, H.F.P. van den Boogaard: Onzekerheidsanalyse hydraulica in GRADE. Deltares rapport 1220082-010, 2015.

K. Slager en M. van der Doef: Handboek overstromingsrisico's op de kaart. Deltares rapport 1209425, 2014.

Robert Slomp: Overstromingsrisico en waterbeheer in Nederland, de stand van zaken in 2012, Rijkswaterstaat, oktober 2012.

R. Ver Loren van Themaat: De Oude IJssel, de veelzijdige rol van het water. Misset, 1966.

T. Visser: Verbeteringen SOBEK3-model Rijntakken. Deltares rapport 12202220-004-ZWS-0027_v1.2, december 2018.

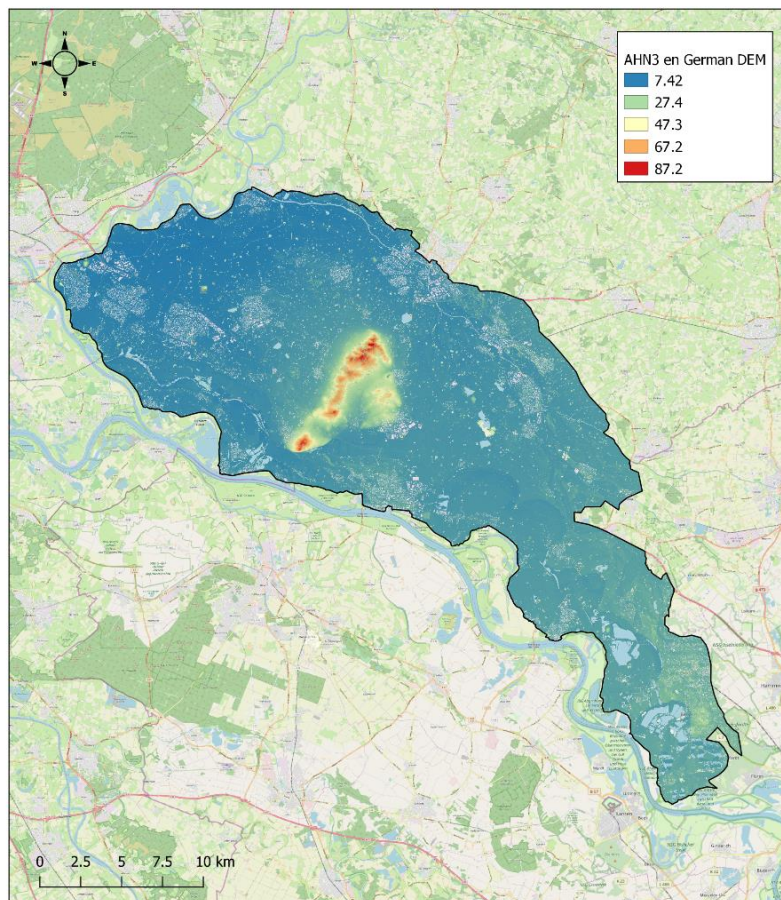
Waterschap Rijn en IJssel: Waterbeheerplan 2016-2021 Waterschap Rijn en IJssel, november 2015.

A Bewerkingstappen modelopzet

Afleiding hoogtemodel 2D overstromingsgebied

Voor het afleiden van de hoogtekartaart worden de volgende stappen doorlopen:

- 1 Verzamel AHN3 kaartbladen voor de dijkkring inclusief buitenwater met een extra buffer van 2 kilometer.
De kaartbladen kunnen worden gedownload van PDOK. Let op dat je AHN3 (DTM) verzamelt **zonder** de maaiveld objecten.
- 2 Inspecteer de hoogtekartaartbladen op eventuele oneffenheden.
- 3 Voeg de hoogtekartaartbladen samen.
- 4 Vul de gaten bij niet-maaiveldobjecten en bij waterlopen en -vlakken op door middel van bilineaire interpolatie (bijvoorbeeld `gdal_fillnodata.py`).



Figuur A.1 AHN3 en Duitse hoogtekartaart

- 5 In geval van onhandelbare bestandsgrootte (en grensoverschrijdende dijkkringen) aggregeer de hoogtekartaart bijvoorbeeld van 0.5 bij 0.5 meter naar 2 bij 2 meter resolutie door de waardes te middelen. Dit gebeurt in de huidige D-FLOW FM versie door bilineaire middeling. In de Leidraad wordt de mediane waarde voorgesteld, maar die optie is nog niet beschikbaar in D-FLOW FM.

- Een basis hoogtemodel is nu gecreëerd. De volgende stappen zijn het verlagen van de hoogtes bij de relevante meren en plassen naar bodemhoogtes en het branden van tunnels en onderdoorgangen in het hoogtemodel.
- 6 Download Basis Grootschalige topografie (BGT) van PDOK voor het overstromingsgebied.
 - 7 Extraheer de watervlaktes uit BGT.
 - 8 Afhankelijk van de resolutie van het rekenrooster en de grootte van de dijkkring selecteer je eventueel meren en plassen met een oppervlakte groter dan een vastgestelde waarde (voor dijkkring 48 is genomen: 50 000 m²).
 - 9 Bepaal de diepte van elk watervlakte:
 - Als de diepte bekend is, pas deze diepte dan toe.
 - Anders neem een diepte van (bijvoorbeeld) 10 meter aan.
 - 10 Bepaal de minimale hoogte binnen elk watervlakte. Deze hoogte kan bepaald worden uit de opgevulde hoogtekaart. Een aanname is dat de hoogtes in de opgevulde hoogtekaart bij watervlaktes gelijk zijn aan de waterspiegel.
 - 11 Bereken de nieuwe bodemhoogte door de diepte af te trekken van de minimale hoogte in het watervlak.
 - 12 Creëer een nieuw vlakkenbestand met dieptes op basis van de geselecteerde watervlaktes minus een inwendige buffer. Deze buffer aan de binnenkant is noodzakelijk om te voorkomen dat het water niet gelijk uit de meren en plassen gaat stromen na het initialiseren van je model.
 - 13 Laat dit vlakkenbestand controleren door het waterschap en pas indien nodig aan.
 - 14 Voeg aan het gecontroleerde vlakkenbestand het overige gebied (gelijk aan hoogtekaart minus watervlaktes) met een Nodata bodemhoogte toe.
 - 15 Converteer het vlakkenbestand naar een raster met dezelfde resolutie, Nodata-waarde en coördinatensysteem als het hoogtemodel.
 - 16 Brand het raster in het hoogtemodel.
 - 17 Selecteer tunnels en onderdoorgangen uit BGT, in samen werking met het waterschap en/of na inspectie van hoogtemodel.
 - 18 Bepaal de correcte hoogte voor elk element.
 - 19 Brand deze waarde in het hoogtemodel.

Tenslotte wordt het hoogtemodel tot één waarde per cel in het flexibele 2D rekenrooster geaggregeerd.

- 20 Gebruik de mediane methode voor het aggregeren van het hoogtemodel één waarde per cel. Als deze methode niet mogelijk is, gebruik dan het gemiddelde. Voor het curvilineaire gedeelte moet de minimale waarde bepaald worden per cel om de dijk uit het hoogtemodel te verwijderen.

Afleiding lijnobstakels

Voor het afleiden van de lijnobstakels worden de volgende stappen doorlopen:

- 1 Selecteer welke verhoogde lijnobstakels meegenomen moeten worden in de modelschematisatie. Doe dit in overleg met een waterbeheerder met kennis van het gebied.
- 2 Stel met de waterbeheerder vast of bepaalde lijnobstakels een bepaalde standzekerheid moeten hebben. Raadpleeg de leidraad.
- 3 Creëer lijnelementen van de verhoogde obstakels indien geen lijnen bestand beschikbaar is.
- 4 Controleer en pas de ligging van lijnelementen aan, zodat ze in het midden liggen van het ruimtelijke element of op het hoogste gedeelte. Voor de dijk moet het lijnobstakel worden geprojecteerd naar het midden van het curvilineaire rekenrooster. Dit vereist enkele handmatige aanpassingen.
- 5 Verwijder lijnelementen bij onderdoorgangen (in verband met de buffer in stap 8).
- 6 Pas de lijnelementen, waar nodig, bij ongelijkvloerse kruisingen in verband met de buffer in stap 8 aan.

- 7 Converteer de lijnelementen naar punten met x- en y-coördinaten. Elke vertex van de (poly) lijn wordt een punt en elke 10 meter moet er minimaal een punt zijn.
- 8 Maak een buffer rondom elk punt, bijvoorbeeld een buffer van 20 meter voor de punten van een primaire dijk.
- 9 Bepaal de maximale hoogte uit hoogtemodel in elke buffer en voeg deze aan de buffer toe aan de punten als z-coördinaat.
- 10 Zet de punten om naar 'fixed weir' formaat bruikbaar voor de D-Flow FM rekenkern:

Elk lijnelement heeft zijn eigen 'fixed weir' bestand. Lijnelementen, die uit polylijnen bestaan, hebben meerdere reeksen in een bestand. Elke reeks begint met de naam van de lijn gevolgd door het aantal punten in de reeks en het getal '3'. Elk punt is een rij in de reeks. Het getal '3' staat voor het aantal kolommen in een reeks. De x-, y- en z-coördinaten van de punten zijn respectievelijk gegeven in ieder zijn eigen kolom.

- 11 Verwerk de standzekerheid van bepaalde lijnelementen in 'fixed weir' bestand.
- 12 Laat de bestanden controleren door de waterbeheerder.

Afleiding initiële waterlaag

Voor de initiële waterlaag worden de watervlaktes geselecteerd in stap 8 van de afleiding hoogtemodel gebruikt als startpunt:

- 1 Bepaal de minimale hoogte binnen elke watervlakte. Deze hoogte kan bepaald worden uit de opgevulde hoogtekaart. Een aanname is dat de hoogtes in de opgevulde hoogtekaart bij watervlaktes gelijk zijn aan de waterspiegel.
- 2 Voeg de minimale hoogte binnen elke watervlakte toe als initiële waterstand.
- 3 Zet het polygonen bestand om naar een raster.
- 4 Interpoleer dit raster op het rooster om een initiële waterlaag te creëren.
- 5 Laat het controleren door de waterbeheerder.

Afleiding ruwheidslaag

Voor het maken van een ruwheidslaag worden de volgende stappen doorlopen:

- 1 Verzamel de meest actuele LGN kaarten van het overstromingsgebied.
- 2 Identificeer de verschillende landgebruiksklassen.
- 3 Maak een conversietabel met een Nikuradse ruwheidswaarde voor elke landgebruiksklasse.
- 4 Converteer de landgebruikskaarten naar een ruwheidslaag met behulp van de conversietabel.
- 5 Laat de ruwheidslaag controleren door de waterbeheerder.
- 6 Zorg dat elke cel een correcte ruwheidswaarde krijgt in het model:

Aangezien het rooster verschillende resoluties heeft, is eerst de ruwheidswaarde voor roostercellen, die een ruwheidswaarde bevatten, bepaald door het gemiddelde van ruwheidswaarde(s) te nemen. De ruwheidswaardes in kleine roostercellen, waarin ruwheidswaardes ontbraken als gevolg van de resolutie van de ruwheidslagen, zijn in een tweede bewerkingstap door middel van triangulatie bepaald.

Afleiding 2D rekenrooster

Voor het maken van een rekenrooster moeten de volgende stappen worden doorlopen, startend met het cartesisch rekenrooster. Bij het generen van het 2D rekenrooster is het belangrijk om de handleiding van D-HYDRO te raadplegen om te kijken welke functionaliteiten en voorbeelden er beschikbaar zijn.

In verband met de ontwikkeling van de software zijn de stappen voor het maken van het 2D rekenrooster alleen globaal beschreven:

- 1 Maak een cartesisch rekenrooster bestaande uit cellen met de grootste roosterresolutie die wordt toegepast in het overstromingsmodel, bijvoorbeeld 40 bij 40 meter. Dit rekenrooster moet de gehele dijkkring inclusief een buffer gelijk aan grootste roosterresolutie beslaan. Knip hierbij het rooster niet met de omtrek van de dijkkring. Dit wordt pas uitgevoerd, nadat het rekenrooster is verfijnd op de geselecteerde locaties.
- 2 Selecteer de locaties in de dijkkring waar het rooster moet worden verfijnd zoals kerende (spoor)wegen en andere kerende elementen. Creëer polygonen van deze gebieden. Doe dit in overleg met de waterbeheerder van het gebied.
- 3 Bepaal de roosterresolutie en verfijningswaardes voor de verschillende locaties, die worden verfijnd. Stel de grootste resolutie toegepast in het rooster bij stap 1 is 40 bij 40 meter. Eén verfijningsstap geeft dan een resolutie van 20 bij 20 meter. Twee verfijningsstappen geven een resolutie van 10 bij 10 meter, enzovoorts. Wanneer de grootste celgrootte 50 bij 50 meter is, leiden één en twee verfijningsstappen tot cellen van respectievelijk 25 bij 25 meter en 12.5 bij 12.5 meter.
- 4 Creëer een verfijningsraster (ASCII bestand) met de verfijningswaardes op basis van de polygonen van stap 2. Meer informatie hierover staat in de appendix 'Locally refined Cartesian grid' uit de handleiding van D-HYDRO.
- 5 Verfijn het rekenrooster van stap 1 met het verfijningsraster gecreëerd in stap 4.
- 6 Verwijder nu de delen van het rekenrooster buiten de dijkkring door het te knippen met de omtrek van de dijkkring.

Het cartesische rekenrooster is nu grotendeels af. Indien er eisen aan de rekentijden zijn gesteld voor kunnen bovenstaande stappen worden herhaald totdat de rekentijden in lijn met de wensen zijn. Het aantal cellen afhankelijk van de grootte van het gebied en de resolutie van deze cellen zijn hierin bepalend. Te kleine cellen kunnen leiden tot het significant toenemen van de rekentijden.

Een curvilineair rekenrooster van 2 cellen wordt toegepast rondom de primaire dijken om zo goed mogelijk de ligging van de dijk te kunnen volgen en de stroming bij de bressen goed te modelleren. In de handleiding van D-HYDRO zijn voorbeelden gegeven voor het creëren van een curvilineair rekenrooster voor rivier toepassingen. Deze voorbeelden kunnen als leidraad worden gebruikt.

- 7 Importeer een lijnen bestand van de dijk.
- 8 Bepaal de grootte van de cellen rondom de dijk.
- 9 Creëer een spline die globaal overeenkomt met de dijk (midden spline). Zorg ervoor dat het dijk lijnelement overal binnen de curvilineaire cellen valt. Het is de bedoeling dat de dijk als fixed weir elementen wordt geprojecteerd naar het midden van het curvilineaire rekenrooster. Als de dijk (midden spline) buiten de curvilineaire cellen valt of geprojecteerd wordt op de buiten- of binnenrand van de curvilineaire cellen, dan moet dit handmatig worden aangepast. Geprojecteerd op het midden van de 2 rijen curvilineaire cellen is de gewenste schematisatie en het beste voor de rekentijd in verband met de 1D2D links die op de 'buitendijkse' curvilineaire cellen worden gekoppeld.
- 10 Kopieer de spline over de lengte van de lange zijde naar beide kanten van de midden spline. Of teken een nieuwe spline op een afstand gelijk aan de lange zijde aan beide kanten van de midden spline.
- 11 Teken aan beide uiteindes van de dijk een vierde en vijfde spline, die loodrecht staan op de andere splines.
- 12 Laat het curvilineaire rooster nu groeien op basis van de splines en vastgestelde instellingen. Zie hiervoor de handleiding van D-HYDRO.
- 13 Converteer het curvilineaire rekenrooster van gestructureerd naar ongestructureerd.

14 Controleer het rekenrooster op orthogonaliteit en smoothness (zie uitleg verder beneden) en verbeter zo nodig.

Het cartesisch gedeelte en curvilineaire gedeelte van het 2D rekenrooster zijn nu gemaakt. De twee delen overlappen elkaar en moeten worden samengevoegd tot één rekenrooster.

15 Maak een polygoon ten grote van het gebied waar de twee delen elkaar overlappen plus een extra buffer van minimaal 1 à 2 keer de lengte van de lange zijde van een cel uit het curvilineaire rooster. Deze buffer is noodzakelijk voor het maken van de overgang tussen het curvilineaire en cartesische rooster met driehoekige cellen.

16 Verwijder met behulp van de polygoon uit stap 14 het onderliggende deel van het cartesisch rekenrooster.

17 Voeg het curvilineaire en cartesische rekenrooster samen tot één rekenrooster.

18 Genereer driehoekige cellen (in één keer of meerdere stappen) tussen de verschillende delen van het rekenrooster.

19 Orthogonaliseer (en verander de oppervlaktes van) de driehoekige overgangscellen zodanig dat de 'orthogonality' en 'smoothness' waarden van het rekengrid goed zijn om nauwkeurige modelresultaten te krijgen. Hoe stomper een hoek in de driehoek des te slechter is de orthogonaliteit. Het middelpunt kan hierdoor buiten de desbetreffende driehoek komen te liggen. In de handleiding van D-HYDRO zijn de principes van 'orthogonality' en 'smoothness' nader toegelicht.

20 Laat het uiteindelijke 2D rekenrooster door de waterbeheerder van het waterschap controleren.

Afleiding 2D bres (dambreak)

De volgende stappen moeten worden genomen om verschillende bressen te kunnen modelleren met de Verheij – van der Knaap formulering in D-HYDRO:

1 Stel de verschillende scenario's vast. Bespreek met het waterschap de volgende punten voor 2D dambreak door:

- breslocaties;
- aannahme initiële dijkhoogte, minimale dijkhoogte en initiële bresbreedte;
- moment van breken;
- tijd benodigd voor het verlagen van de dijk tijdens fase 1;
- grondsoort van de dijk inclusief parameters;
- kritische stroomsnelheid.

Bespreek ook de herhalingstijd van de afvoergolf van het buitenwater met het waterschap.

- 2 Indien niet alle breslocaties binnen het rekenrooster liggen, projecteer deze naar de primaire dijk.
- 3 Bepaal de initiële dijkhoogte op basis van de vastgestelde breslocaties. Doe hetzelfde voor de minimale dijkhoogte.
- 4 Bepaal de periode in secondes vanaf start simulatie tot het moment van breken van de dijk.
- 5 Creëer een lijnelement (met extensie ".pli") waarover de bres kan groeien voor elke breslocatie. Zorg ervoor dat de lengte ongeveer 500 meter is aan beide kanten van de dijk, zodat de bresgroei niet door het ontbreken van dit lijnelement kan worden gestagneerd.
- 6 Maak de invoerbestanden voor 2D dambreaks voor de verschillende scenario's klaar.
- 7 Overweeg welke waterstandscellen gebruikt worden voor bovenstroomse en benedenstroomse waterstanden (default: de direct aan de bres grenzenden waterstandspunten in het 2D grid).

Afleiding waterlopen

De volgende stappen worden doorlopen voor het implementeren van de waterlopen in 1D. Deze stappen kunnen globaal worden toegepast. Let op, de stappen kunnen veranderen met andere invoergegevens en door ontwikkelingen in D-HYDRO (bv. met betrekking tot importeren en

samenvoegen van 1D modellen). Nieuwe releases van D-HYDRO zullen andere opties mogelijk maken. Raadpleeg daarom altijd de laatste handleiding meegeleverd met D-HYDRO. Ook wordt er momenteel gewerkt aan 2D D-HYDRO modellen van de Rijntakken door Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat, zodat later ook een 2D model gekoppeld kan worden in plaats van het 1D Rijntakken model:

- 1 Bepaal hoe je de waterlopen wil implementeren in het model: 1D of 2D met kleine cellen.
- 2 Vraag bij Rijkswaterstaatsdienst 'Helpdesk water' de modelschematisatie op die nodig is voor het koppelen aan het buitenwater; geef ook aan dat het voor een project met het waterschap is. Zowel het waterschap als de partij die het model voor het waterschap maakt zullen een gebruiksrechtformulier moeten tekenen om de modelschematisatie van de Rijntakken (of een ander RWS schematisatie) te mogen gebruiken in het model.

In de volgende stappen is aangenomen dat de lokale waterlopen (bv. SOBEK 2.13 modellen) en het buitenwater (SOBEK-3 modelschematisatie) in 1D worden geïmplementeerd.

- 3 Selecteer de binnendijkse waterlopen die meegenomen moeten worden in het model in overleg met het waterschap.
- 4 Vraag het waterschap om het aanleveren van eventuele modellen in SOBEK 2.13 (of hoger) van de geselecteerde waterlopen. Schoon deze modellen op (Clean 1D/2D Flow model).
- 5 Importeer deze SOBEK 2.13 modellen in SOBEK 3 versie (hoger dan SOBEK 3.7.16.42543).
- 6 Pas de modellen waar nodig of waar gewenst aan. Let hierbij op:
 - korte afstanden tussen rekenpunten moeten worden vermeden in verband met de rekentijd;
 - het functioneren van kunstwerken (wel/geen kunstwerksturing);
 - randvoorwaarden bij instroom en uitstroom van waterlopen;
 - verwijderen van eventuele kunstwerken zoals gemalen als deze inactief zijn in de overstromingssimulatie (of geef ze capaciteit nul in dat geval).

Doe de aannames in overleg met het waterschap.

- 7 Herhaal stappen 5 en 6 voor het buitenwater model.
- 8 Voeg de twee modellen samen met de 'merge' functionaliteit in SOBEK 3.
- 9 Koppel de binnendijkse waterlopen aan het buitenwater bij de uitlaten van de dijkkring. Hanteer hiervoor zoveel mogelijk de laterale debiet locaties van het model van het buitenwater.
- 10 Converteer het gekoppelde 1D waterlopen model van SOBEK 3 naar D-Flow FM formaat. Pas waar nodig de bestanden aan zodat ze overeenkomen met het laatste D-Flow FM formaat aan. Controleer tijdens elke stap de performance en de resultaten van de modellen. Indien een afwijking of onverwacht resultaat optreedt, check dit en overleg met het waterschap.

Afleiding van een goed werkend en gekoppeld 1D2D overstromingsmodel

De volgende stappen moeten worden genomen om een goed werkend en gekoppeld 1D2D overstromingsmodel te krijgen:

- 1 Bepaal welke elementen in het 1D2D overstromingsmodel horen te zitten.
- 2 Plaats al deze elementen in één folder.
- 3 Voeg het 1D netwerk samen met het 2D rekengrid.
- 4 Genereer embedded of laterale 1D2D links tussen het 1D netwerk en 2D rekengrid en sla deze op in het gecombineerde 1D2D netwerk.
- 5 Controleer de gegenereerde 1D2D links. Pas foutieve 1D2D links aan of voeg ontbrekende 1D2D links toe.
- 6 Plaats het uiteindelijke netwerk in dezelfde folder als stap 2.
- 7 Combineer de MDU-bestand van zowel het 1D gedeelte en het 2D gedeelte tot één MDU-bestand. Zorg ervoor dat de verwijzingen naar de andere elementen er goed inzitten.
- 8 Pas modelparameters zoals beschreven in paragraaf 3.9.4, waar nodig, in het MDU-bestand aan.

B Memo Baseline

B.1 Inleiding

In het GRADE-project is in opdracht van RWS-WVL een model gemaakt van de Rijn inclusief overloopgebieden in Nederland en Duitsland, waaronder dijkkring 48. Hiervoor is een model in SOBEK-3 gegenereerd, dat bestaat uit een 1D SOBEK-3 model gekoppeld met een 2D FM-model van de overloopgebieden. Hiervoor is basisdata verzameld in Baseline, dat is ArcGis applicatie van RWS. Typisch zijn in Baseline databases de gegevens van de buitendijkse riviergebieden opgeslagen, waarmee de 1D en 2D riviermodellen voor RWS worden gegenereerd. Voor het genereren van de modellen voor de dijkkringgebieden (“binnendijks”) zijn ook gegevens toegevoegd aan Baseline. Voor het genoemde GRADE-project is door Lievense CSO een Baseline database gevuld met gegevens voor de Rijn en aanliggende dijkringen en overloopgebieden in Duitsland en Nederland (tussen Andernach en Nijmegen, Arnhem, en Zutphen). Dit is beschreven in de rapportage ‘Baseline Trans Boundary Rhine, document 16M2007.RAP001.05, Lievense CSO (Van Doornik en Hoefsloot, juni 2017).

Deze appendix beschrijft de verschillen tussen de Baseline data en de data gebruikt voor het WRIJ-model. Het gaat dan vooral om het hoogtemodel, de ruwheid, oppervlaktewater en hoogtelijnen. Doel is na te gaan wat de verschillen en overeenkomsten zijn in de gebruikte data, en wat dit betekent voor de modellering.

B.2 Hoogtegegevens

Het hoogtemodel in Baseline bestaat uit twee typen invoer, namelijk punten en lijnen met bijbehorende hoogtes. Deze invoer is afgeleid uit de beschikbare hoogtemodellen (AHN2 met resolutie 0.5x0.5m en ook 5x5m, en voor Duitsland DGM met resolutie 1x1m). Omdat het gebruik van al deze data tot een onpraktisch grote dataset leidt, is de dataset ingedikt. Hiervoor is de raster resampling methode gebruikt om de invoer data voor Baseline te genereren.

Met de raster sampling methodes wordt het input raster (bij AHN2 met resolutie van 0.5x0.5m) geconverteerd naar een output raster. Hiervoor is een resolutie van 25x25m gekozen, dat betekent 1 punt per 625m². Voor de resampling is door Lievense CSO gebruik gemaakt van de ArcGis bilineaire middeling. Vergelijking van het met raster resampling gegenereerde hoogtemodel met het originele AHN2 hoogtemodel laat zien dat de hoogtemodellen op details verschillen, maar in grote lijnen goed vergelijkbaar zijn. Het hoogtemodel volgens de raster resampling methode is in de Baseline Trans Boundary Rhine database opgenomen. Het uiteindelijk gegenereerde 2D FM model heeft 2D cellen van orde 200x200m.

In het model van dijkkring 48 zijn voor het Nederlandse deel de hoogtegegevens van AHN3 gebruikt. Deze data is recenter dan AHN2 en heeft dezelfde 0.5x0.5m resolutie. Voor het Duitse deel zijn de data door WRIJ aangeleverd (open data van NRW, resolutie 1x1m). Voor het opzetten van het model is dezelfde methode als voor Baseline gebruikt, namelijk de raster resampling methode met bilineaire middeling. Het raster dat hiermee is gegenereerd heeft een resolutie van 2x2m, dat is dus een stuk gedetailleerder dan de 25x25m DEM data in Baseline. Het gegenereerde 2D FM model heeft een flexibel grid, met gridcellen tussen 10x10 en 40x40 meter.

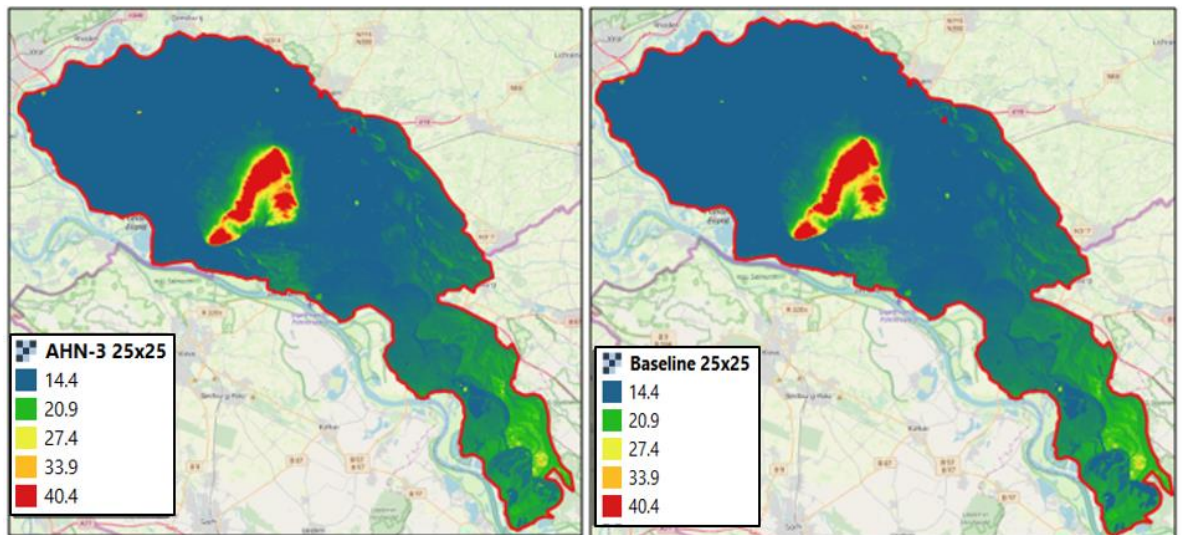
Figuur B.1. toont de vergelijking van de hoogtegegevens van AHN3 en NRW (opgeschaald naar 25x25m) met de Baseline 25x25 hoogtegegevens (gebaseerd op AHN2 en DGM). Figuur B.2 laat het verschilplaatje zien. Figuur B.3 laat een profiel zien met de verschillende hoogtegegevens (AHN3, AHN2, zowel origineel als resampled).

Uit Figuur B.2 blijkt dat de verschillen tussen AHN3 resampled (25x25) en Baseline (25x25) vooral optreden bij waterlopen, meren en wegen. Dat verschil komt bij waterlopen en meren doordat het AHN3 het waterniveau weergeeft, terwijl die data in Baseline al is aangepast (verlaagd tot bodemniveau).

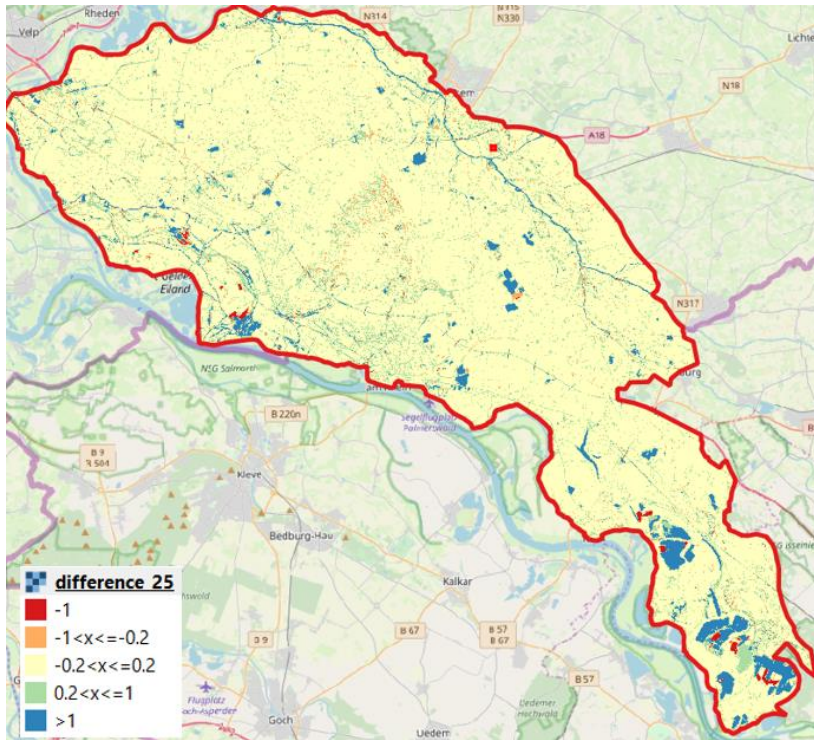
Figuur B.3 toont een profiel van een weg in Nederland. Het verschil tussen het originele AHN3 en AHN2 is gering (beide op 0.5x0.5m). Op de DEM resolutie van 2x2m voor WRIJ komt het profiel nog zeer goed overeen met de AHN basisdata. Er is een groter verschil tussen AHN3 25x25m en Baseline 25x25m. Dit komt doordat vermoedelijk de wegen die als lijnelementen zijn toegevoegd aan Baseline, uit het Baseline DEM zijn verwijderd door Lievense, om dubbelingen te voorkomen (standaard procedure bij Baseline schematisaties).

Algemeen geldt dat voor het hoogtemodel Baseline dus oudere basisinformatie heeft gebruikt (AHN2) dan voor het WRIJ-model van dijkkring 48 gebruikt is (AHN3). De verschillen tussen AHN2 en AHN3 zijn echter gering, bv. typisch voor nieuwbouwgebieden.

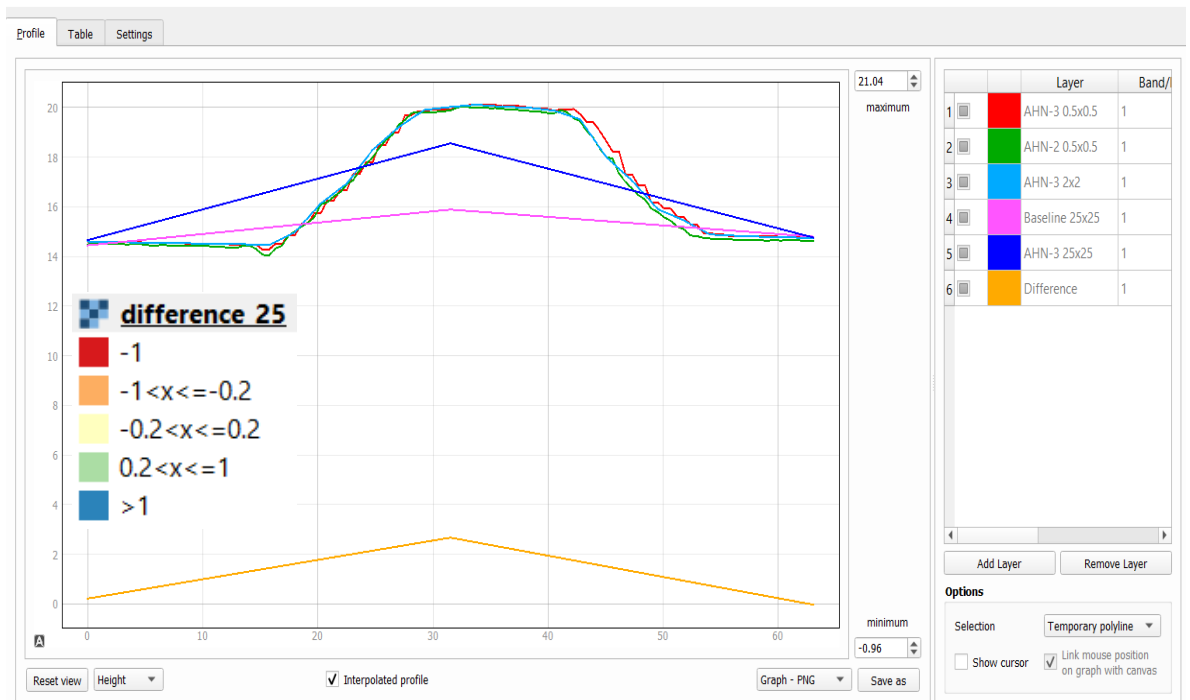
Een belangrijk verschil is dat voor Baseline de basisinformatie is opgeschaald (resampled) naar 25x25m en vervolgens in Baseline opgeslagen. Voor WRIJ is gebruik gemaakt van recentere data die is opgeschaald naar 2x2m, dat is dus veel gedetailleerder dan in Baseline.



Figuur B.1: Hoogtegegevens van resampled AHN3 (links) en Baseline data (rechts) in meters



Figuur B.2: Verschillen tussen resampled AHN3 (25x25) en Baseline data (25x25) in meters



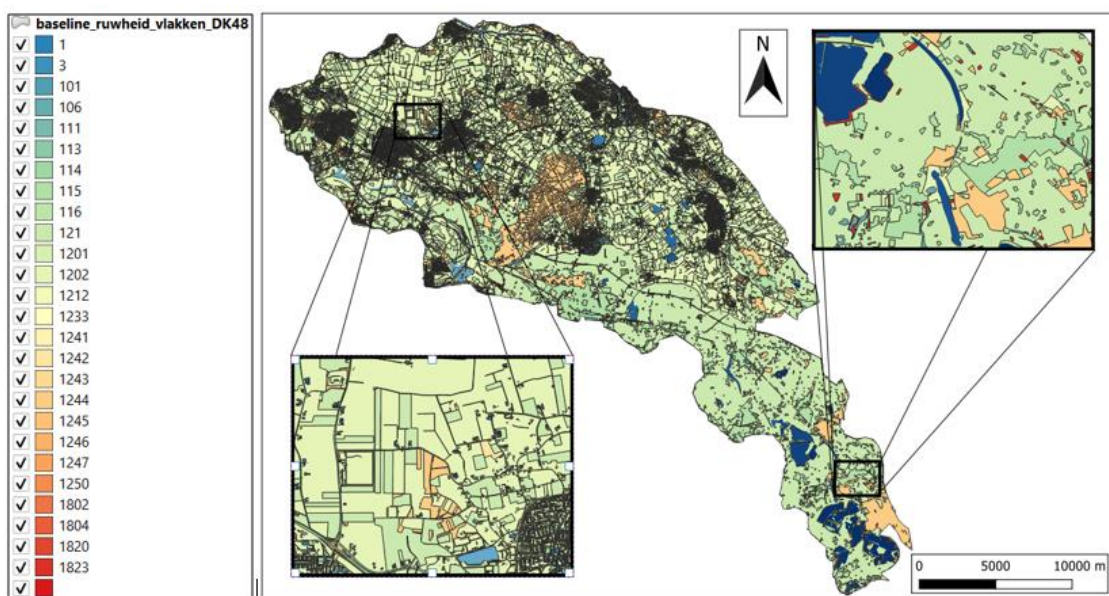
Figuur B.3: Profiel van een snelweg vlak bij de Duitse grens, AHN3 0.5x0.5 (rood), AHN-2 0.5x0.5 (groen), resampled AHN-3 2x2 (licht blauw), Baseline 25x25 (paars), resampled AHN3-25x25 (blauw) and verschil tussen AHN3-25x25 & Baseline 25x25 (oranje)

B.3 Ruwheid

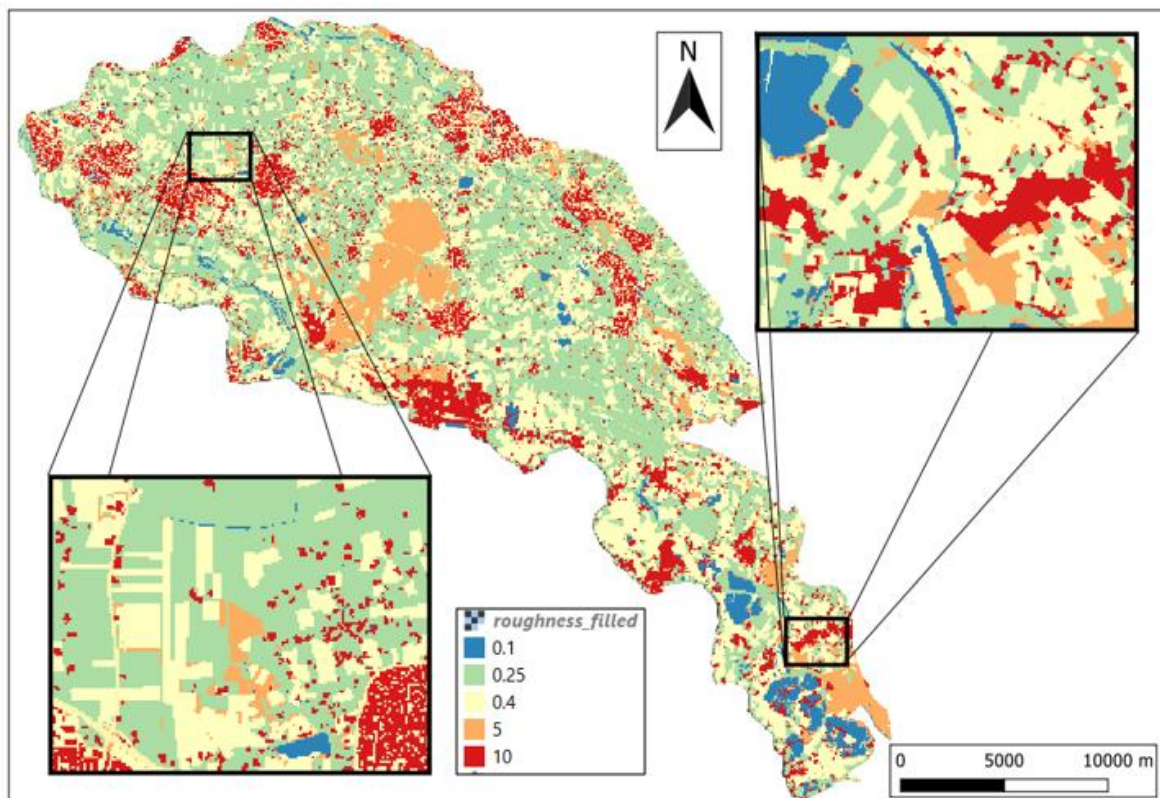
In Baseline is de ruwheid geschematiseerd op basis van polygonen met type vegetatie en landgebruik. Ook lijnelementen (bv. heggen) en punten (individuele bomen) zijn mogelijk. Aanvullend aan vegetatie en landgebruik is gebruik gemaakt van een speciale klasse voor de hoogwatervrije vlakken.

De brongegevens waarmee ruwheidspolygonen voor Baseline afgeleid zijn respectievelijk de ATKIS 2005 en 2013 mapping voor het Duitse deel van het gebied (polygonen uit ATKIS2013, lijnen en punten uit ATKIS2005), en Top10 voor het Nederlandse gebied geweest. Voor het koppelen van ruwheidsdefinities aan de landgebruikstypes is in een eerder project een mapping gedaan op basis van ATKIS2005. Om met de nieuwe ATKIS2013-data op een consistente manier om te gaan is eerst de ATKIS 2013 indeling gemapt op de ATKIS 2005 indeling en de bijbehorende Baseline ruwheidscode. Behalve de polygonen zijn er ook punten en lijnen met hun eigen ruwheidswaarden (gebruikt. Voor het Nederlandse deel is de beschikbare Top10NL mapping gebruikt (die in alle RWS-modelschematisaties van de rivieren wordt gebruikt). De gebruikte ruwheidsformuleringen zijn afhankelijk van het type landgebruik. Bijvoorbeeld wordt voor wateroppervlaktes of verhard terrein een vaste Nikuradse-waarde toegepast. Bij door- en overstroombare vegetatie worden ruwheidsformuleringen gebruikt die rekening houden met de invloed van deze vegetatie op de stroming als functie van waterstand en stroomsnelheid.

Het model van dijkkring-48 gebruikt de meest recente LGN7 25x25m landgebruiks klasse-indeling (conform de Leidraad overstromingen) en is gekoppeld aan vaste Nikuradse ruwheden voor het Nederlandse deel van dijkkring 48. Voor het Duitse deel van dijkkring 48 is het landgebruik door WRIJ aangeleverd op basis van open data van NRW (=ATKIS c.q. Basis-DLM) en vervolgens omgezet naar de LGN-7 klassen. Uit de vergelijking van de Baseline data met de data voor het dijkkring-48 model, blijkt dat het Nederlandse deel zeer vergelijkbaar is (slechts beperkte verschillen als gevolg van gebruik van nieuwere LGN indeling). Voor het Duitse deel van het gebied blijkt de data voor het dijkkring-48 model gedetailleerder dan de beschikbare data in Baseline (zie Figuur B.4 en figuur B.5). Dat komt waarschijnlijk doordat in Baseline toen (per ongeluk) een deel van de ATKIS2013 data niet is meegenomen in de indeling.



Figuur B.4: Baseline polygonen voor ruwheden en ruwheidscodes



Figuur B.5: Nikuradse ruwheidswaarden voor het Dijkkring-48 model

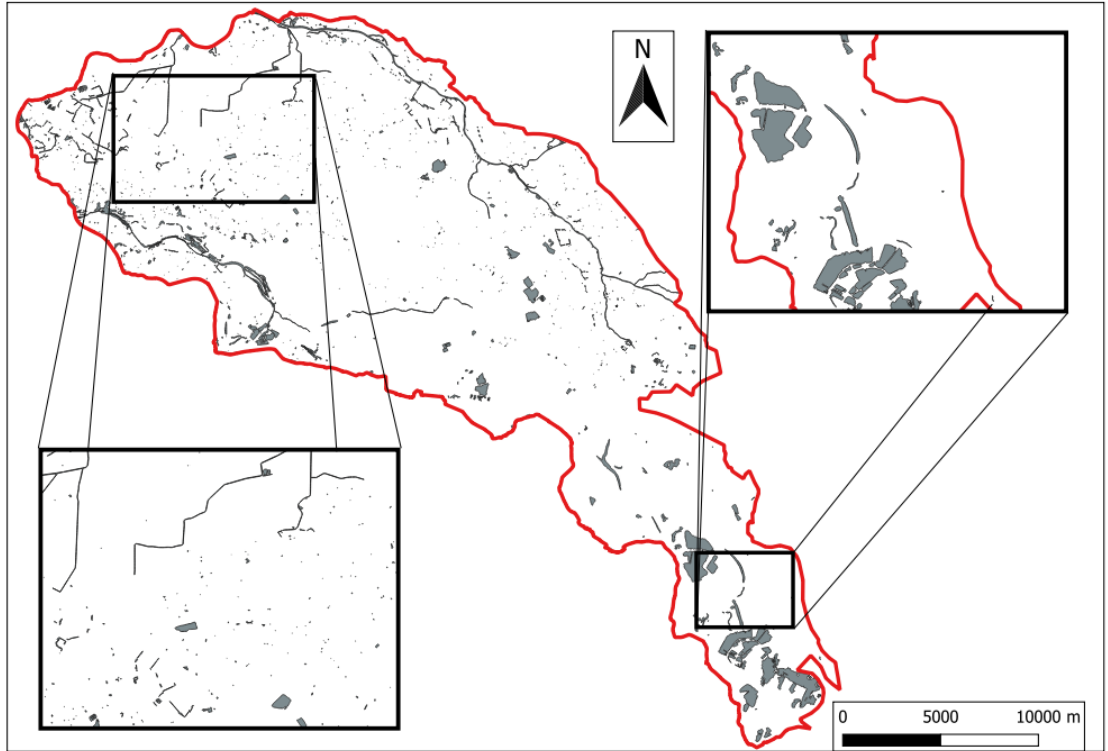
B.4 Oppervlaktewater

Voor de Baseline data zijn de waterlichamen afgeleid uit een shape file met ecotopen ruwheidscodes (afgeleid op Top10NL of ATKIS2013), waarin bij bepaalde ruwheidscodes de klasse 'open water' hoort. Vervolgens is de hoogte bepaald door een GIS bewerking. Eerst is een buffer van 25 meter gebruikt om de waterlichamen. Vervolgens is de gemiddelde hoogte bepaald voor deze polygonen (open water + bufferzone). Voor het Nederlands gebied was voor de waterlichamen de hoogte eerst op 'NoData' gesteld, en geeft de berekening van de gemiddelde hoogte binnen de polygonen (inclusief buffer) dus de gemiddelde hoogte langs de randen van het waterlichaam. Het bodemniveau is vervolgens bepaald door van deze gemiddelde hoogte 2 meter af te trekken. Voor het Duitse gebied was de waterstand als hoogte voor het open water wel gedefinieerd en meegenomen bij de berekening van de gemiddelde hoogte voor de polygonen (open water + bufferzone), en vervolgens de bodem 2 meter lager gesteld. Dit leidt tot iets lagere bodemniveau's.

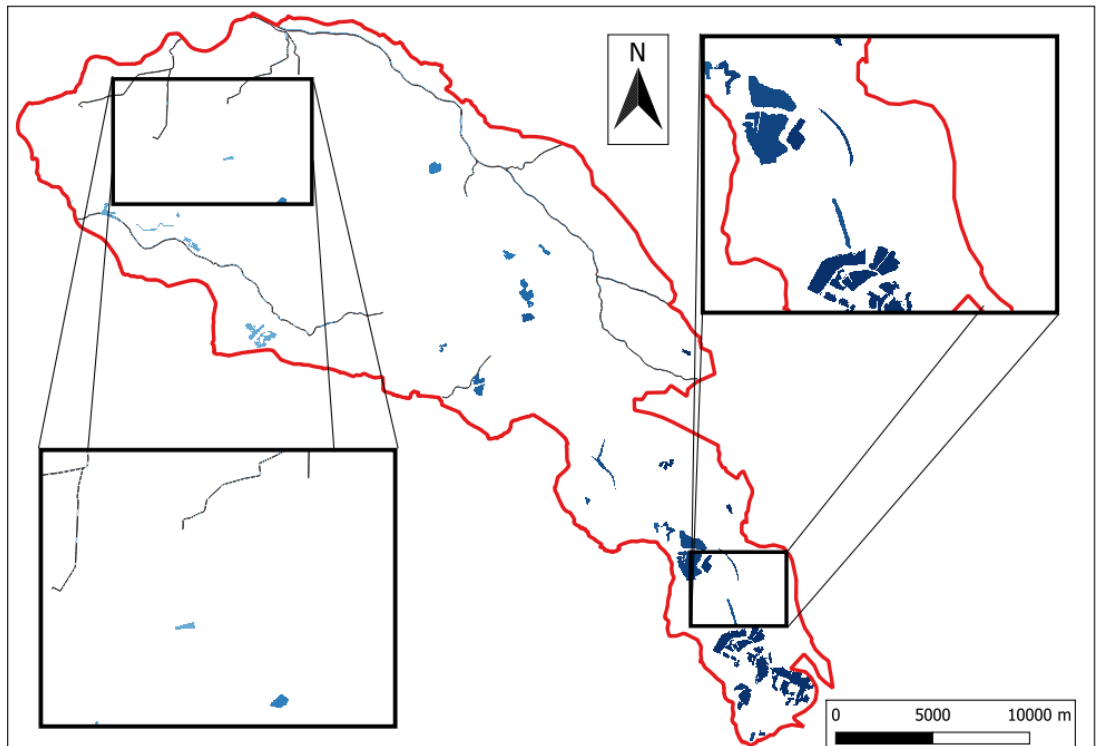
Voor het WRIJ model van dijkkring-48 is door WRIJ vooraf een selectie gemaakt van de in het model mee te nemen waterlopen en meren (op basis van grootte).

Figuur B.6 en Figuur B.7 tonen de waterlopen en meren in Baseline en in het dijkkring-48 model. Baseline bevat veel meer kleinere waterlichamen, maar in het dijkkring-48 model zijn alleen de grotere waterlopen en meren opgenomen. Gegeven de gekozen resolutie van het rekenrooster in het D-HYDRO-model voor GRADE (afgeleid van de Baseline 25x25m schematisatie) vallen veel waterwegen weg en komen niet terug in initiële condities als watergang of klein meer. De bedoeling is om in het GRADE-model in de toekomst een aantal belangrijke waterlopen zoals de Oude IJssel op te nemen als 1D-takken. Deze functionaliteit was toen echter nog niet beschikbaar in D-HYDRO.

Voor het WRIJ model is rondom waterlopen juist met een hogere resolutie in het rekenrooster gerekend (10x10m).



Figuur B.6: Waterlopen en meren in Baseline

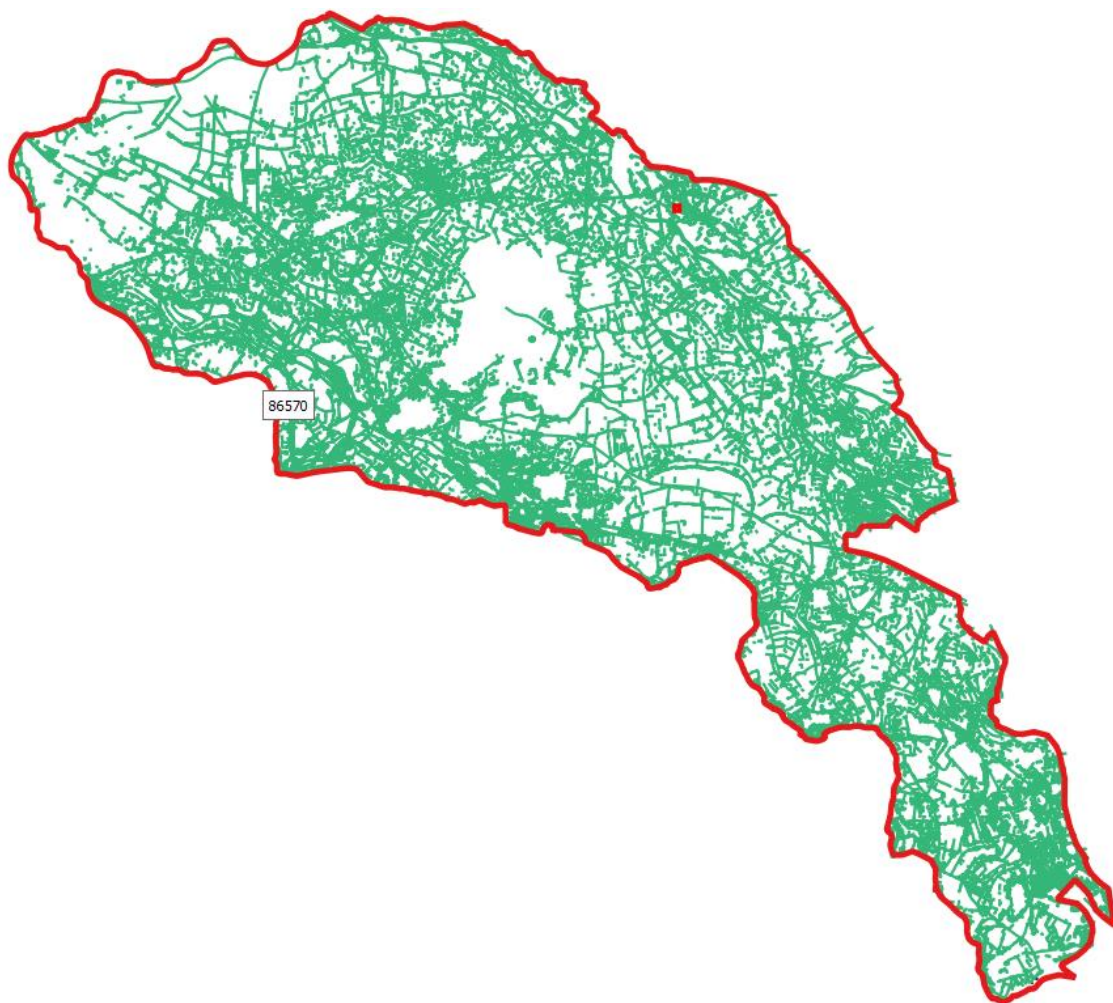


Figuur B.7: Waterlopen en meren geïmplementeerd in het Dijkkring-48 model

B.5 Hoogtelijnen

Baseline bevat zogenaamde 'kades-routes' lijnelementen. Dit zijn de lijnobstakels die bij het genereren van D-HYDRO modellen worden omgezet naar 'fixed weirs'. Op basis van het DEM zijn deze lijnen met behulp van GIS-analyses afgeleid. Deze lijnen bevatten objecten zoals snelwegen, N-wegen en spoorlijnen. Gaten in lijnen langs deze infrastructuur zijn gesloten behalve op plekken waar er openingen (tunnels) zijn. In Baseline zijn hiervoor naast de genoemde 'kades-routes' ook 'bandijken' en 'kades' opgenomen.

In Baseline zijn de dijken in het Nederlandse deel weergegeven op basis van shape files van de waterschappen. De dijken in het Duitse deel zijn overgenomen van de bestaande Baseline database van BfG.



Figuur B.8: Verhoogde lijnelementen in Baseline

Voor het dijkkring 48 model is gebruik gemaakt van de volgende (verhoogde) elementen:

- snelwegen en andere wegen duidelijk hoger van de omgeving;
- spoorwegen;
- tunnels, bruggen en viaducten;
- kades (langs de waterlopen);
- secundaire dijken binnen de dijkkring;
- geluidswallen en geluidsschermen.

Hiervoor heeft het waterschap een selectie gemaakt van de relevante mee te nemen elementen. Het aantal elementen is duidelijk lager dan het aantal elementen opgenomen in Baseline.

B.6 Baseline - Conclusies en aanbevelingen

Hoogtemodel: Baseline heeft iets oudere basisinformatie gebruikt (AHN2) dan voor het WRIJ-model van dijkkring 48 gebruikt is (AHN3). De verschillen tussen AHN2 en AHN3 zijn echter gering, bv. typisch voor nieuwbouwgebieden. Een belangrijk verschil is dat voor Baseline de basisinformatie eerst is opgeschaald naar 25x25m en vervolgens pas in Baseline opgeslagen. Voor WRIJ is gebruik gemaakt van een naar 2x2m opgeschaald hoogtemodel, dus gedetailleerder dan in Baseline.

Ruwheid: In Baseline is gebruik gemaakt van basisinformatie op basis van ATKIS classificatie van landgebruik in Duitsland, en Top10 in Nederland. Voor het WRIJ dijkkring 48 model zijn basisgegevens op basis van LGN7 gebruikt in Nederland (conform de Leidraad Overstromingssimulaties 2018) en de open data van NRW voor Duitsland. De verschillen voor het Nederlandse deel blijken gering, maar in het Duitse deel van het model zijn er grotere verschillen. Dit blijkt bij nader onderzoek te komen doordat er bij het samenstellen van de Baseline data voor GRADE een fout is gemaakt van het vertalen van de data naar ruwheidswaarden, waardoor detail verloren is gegaan.

Oppervlaktewater: In Baseline zijn meer watergangen en meren opgenomen dan door WRIJ voor het dijkkring-48 model geselecteerd zijn. Hier is de Baseline database dus completer dan de set gebruikt voor het WRIJ-model. Echter, gezien de resolutie van het model dat uit Baseline is gegenereerd (dat veel grover is dan de resolutie van het WRIJ model) is het de vraag in hoeverre de meer gedetailleerde data in Baseline over waterlopen echt is gebruikt in het model.

Hoogtelijnen: Baseline bevat veel meer lijnelementen met hoogtes (wegen, spoorwegen, keringen, geluidsschermen) dan door WRIJ aangeleverd als relevant voor het WRIJ model. Voor Baseline zijn deze lijnelementen deels met GIS procedures uit het DEM gegenereerd, en bij gebruik van AHN3 in plaats van AHN2 zouden deze acties opnieuw moeten worden gedaan.

Algemeen:

De focus van het model voor WRIJ van dijkkring 48 is het doorrekenen van dijkdoorbraken, en zien hoe de overstroming zich binnen dijkkring 48 verspreidt (hoe snel, hoe diep wordt het, etc). Voor RWS-WVL is de focus van de Baseline database het gebruik voor een GRADE model met 2D overloopgebieden niet zozeer het in veel detail doorrekenen van dijkdoorbraken, maar vooral een goede voorspelling van de afvoer die nog in de Rijn bij Lobith te verwachten is (rekening houdend met evt. bovenstroomse dijkdoorbraken en overstromingen). In GRADE moest een grote hoeveelheid berekeningen (> 10000) gemaakt kunnen worden en is om dit mogelijk te maken is de rekentijd beperkt door met een grover rooster te rekenen.

Het GRADE model is daarom voor zowel het basis hoogtemodel (in Baseline 25x25m) als de resolutie van het rekengrid in FM (orde 200x200m) grover dan het gebruikte basis hoogtemodel (2x2m) en resolutie van het rekengrid (van 10x10 tot 40x40m) voor het dijkkring-48 model.

De Baseline database en het GRADE model bevatten ook een veel groter gebied dan dijkkring 48; de Baseline database bevat binnendijs gebied en overloopgebieden tussen Andernach en Arnhem/Nijmegen/Zutphen. De Baseline database en het GRADE model zouden dus bij eenzelfde resolutie als het WRIJ model veel groter en zwaarder zijn. Uit praktische overwegingen is ook daarom bij GRADE voor een grovere resolutie gekozen.

B.7 Aanbevelingen en conclusies

- 1 Het wordt aanbevolen om zoveel mogelijk uit te gaan van dezelfde basisdata, en deze data ook met elkaar (RWS, WRIJ, ook NRW) te delen.
- 2 Verder is de conclusie dat Baseline qua DEM iets oudere data gebruikt (AHN2 vs AHN3) en wat belangrijker is, minder resolutie (25x25m) geeft dan voor het 2D model van dijkkring 48 voor WRIJ gewenst is. Het model voor dijkkring 48 heeft nu immers al kleinste gridcellen van 5x5m of 10x10m, gebaseerd op een basis DEM van 2x2m.
- 3 Voor oppervlaktewater en hoogtelijnen (kerende elementen) bevat Baseline veel meer watergangen en wegen. Voor het model van dijkkring 48 is door WRIJ vooraf een selectie gemaakt van mee te nemen wegen, spoorwegen, watergangen e.d.
- 4 Verder is het rekenrooster voor het WRIJ model veel fijner dan het rekengrid van het uit Baseline gegenereerde model. Met de nu in Baseline opgenomen data is een rooster met fijnere resolutie dan 25x25m niet zinvol, terwijl dat met de WRIJ data wel goed mogelijk is (en ook gedaan is).

Kortom, gegeven de verschillende doelstellingen van de modellen is het logisch en verdedigbaar dat de gebruikte resolutie van de basisdata in Baseline en voor het WRIJ model van dijkkring 48 verschillend zijn. Het zou goed zijn om de gebruikte basisdata (voor Baseline en het WRIJ model) zoveel mogelijk met elkaar te delen. Los van alle inhoudelijke opmerkingen hierboven, is het goed als de betrokken partijen (RWS-WVL, WRIJ, NRW) in goed contact met elkaar staan en elkaar op de hoogte houden van ontwikkelingen en zaken die (grensoverschrijdend) spelen.

C Memo D-Flow FM uitvoer

C.1 Inleiding

In de pilotstudie “modellering van dijkkring 48 met D-HYDRO” is tijdens het wekelijkse overleg tussen Deltares (Govert Verhoeven en Rinske Hutten) en Waterschap Rijn en IJssel (Gert van den Houten) op vrijdag 17 mei 2019 besloten om een document op te stellen over de modeluitvoer van overstromingssimulaties. Tijdens het overleg kwam ter sprake dat het opslaan van alle modeluitvoer (kaarten met exacte gegevens per rekencel genaamd MapLayerFile) al 9 Gb aan data per simulatie opleverde. Het is echter werkbaarder om de bestanden kleiner te houden (o.a. in verband met het uploaden van de modeluitvoer naar de landelijke databank overstromingsscenario's (LDO)) en kaarten te gebruiken die ingedikt zijn door met klassen i.p.v. exacte waarden te werken. Dit is de ClassMapLayerFile. Ook het onnodig wegschrijven van overbodige modeluitvoer dient beperkt te worden. De eis om de grootte van de modeluitvoer te beperken in combinatie met de vraag om de modeluitvoer met hogere frequentie weg te schrijven (o.a. om grote sprongen in animaties te voorkomen) gaf de noodzaak voor het opstellen van een document over de modeluitvoer van overstromingssimulaties van dijkkring 48.

Deze bijlage beschrijft de verschillende uitvoerbestanden, data en intervallen, die worden weggeschreven bij het maken van overstromingssimulatie voor deze pilotstudie met D-HYDRO.

C.2 Modeluitvoer overstromingssimulatie

In de rapportages “Handboek overstromingsrisico's op de kaart” (Slager & Van der Doef, 2014) en “Leidraad voor het maken van overstromingssimulaties” (de Bruijn & Slager, 2018) zijn richtlijnen gegeven voor de resultaten van simulaties. Deze richtlijnen zijn grotendeels toegepast bij het vaststellen van de benodigde modeluitvoer.

Voor het gebied binnen dijkkring 48 worden o.a. de maximale waterstanden en maximale stroomsnelheid per rekencel gegenereerd. Voor het exporteren van deze resultaten naar LDO zal de modeluitvoer worden geconverteerd naar ASCII-file met een pixel grootte van 25 bij 25 meter. De huidige werkwijze van het converteren wordt met scripts uitgevoerd. Dit zal met de modelresultaten worden overgedragen. Met het script kan tevens de aankomsttijd van het water en stijgsnelheid van het water over de eerste 1.5 meter bepaald worden zoals voorgeschreven door (de Bruijn & Slager, 2018).

Klassen voor waterdiepte (m)	Klassen voor stroomsnelheid (m/s)
0,020	-5
0,100	-4,5
0,200	-4
0,300	-3,5
0,400	-3
0,500	-2,5
0,600	-2
0,700	-1,5
0,800	-1
0,900	-0,5
1,000	0
1,250	0,5
1,500	1
1,750	1,5
2,000	2
2,250	2,5
2,500	3
2,750	3,5
3,000	4
3,250	4,5
3,500	5
3,750	
4,000	
4,250	
4,500	
4,750	
5,000	
6,000	

Incrementele waterdieptes en stroomsnelheden worden elke 10 minuten geïnclassificeerd per rekencel weggeschreven in de ClassMapLayer. Figuur C.4 geeft de legenda's voor de incrementele klassen gehanteerd voor de classificatie van waterdieptes en stroomsnelheden. De indeling van incrementele klassen voor waterdieptes is aanbevolen in het kader van EU-richtlijn Overstromingsrisico's (Slager & Van der Doef, 2014). De exacte waarden voor waterdieptes, waterstanden en stroomsnelheden per rekencel zullen alsnog worden gegenereerd met een interval van 8 uur in de MapLayerFile. Indien nodig kan dit interval worden aangepast naar een kleinere tijdstap door de simulatie opnieuw uit te voeren, maar een kleiner interval voor het wegschrijven van de MapLayerFile zal leiden tot grote bestanden.

Bij elke overstromingssimulatie worden ook de tijdreeksen van de bresdebieten, de boven- en benedenstrooms waterstanden van de bres en de bresbreedte met een interval van 10 minuten gegenereerd als vastgesteld door (de Bruijn & Slager, 2018). Andere relevante gegevens, die worden weggeschreven in de modeluitvoer zijn data bij observatiepunten & observatie cross-sections, data bij eventuele kunstwerken en pompen, de waterbalans van het model en in welke cellen instabiliteit optreedt in de vorm van tijdstap vermindering.

Figuur C.4 Incrementele klassen voor waterdieptes en stroomsnelheden

Hieronder zijn allereerst de verschillende uitvoerbestanden kort in Tabel C.1 toegelicht.

Tabel C.2 geeft een overzicht van welke gegevens in welke bestanden zijn opgeslagen. De metadata (informatie over uitgangspunten, aannames en eigenschappen van simulatie) van de overstromingssimulatie zullen volgens de tabel gegeven in sectie 4.1 van het "Handboek Overstromingsrisico's op de kaart" van (Slager & Van der Doef, 2014) worden gerapporteerd.

Tabel C.1 Modeluitvoer bestanden inclusief bestandextensie en tijdstap waarmee data wordt weggeschreven.

	Extensie	Interval voor het generen van output	Beschrijving
Diagnostics file (DiaFile)	*.dia	Eenmalig per simulatie	De DiaFile is het logbestand van een enkele overstromingssimulatie. Het geeft informatie over de uitvoering van de simulatie.
History file (HisFile)	*_his.nc	10 min	De HisFile bevat tijdreeksen van parameters die niet per rekencel worden berekend
MapLayerFile (MapFile)	*_map.nc	8 uur	De MapFile bevat tijdreeksen van parameters per rekencel
ClassMapLayerFile (ClassMapFile)	*_clm.nc	10 min	De ClassMapFile bevat tijdreeksen van parameters ingedeeld in klassen en berekent per rekencel.
Restart file	*_rst.nc	-	RestartFile is een bestand, die lijkt op Mapfile met alle data voor één bepaalde tijdstap. Dit bestand kan gebruikt worden voor het opnieuw opstarten van een simulatie vanaf een specifiek moment.
Fourier Analysis File (FouFile)	*_fou.nc	Eenmalig per simulatie	Een FouFile is een bestand met parameters waarop een fourier analyse is uitgevoerd om minima of maxima te bepalen.

Tabel C.2 Een overzicht van welke data in welk uitvoerbestand is opgeslagen.

Variabele	HisFile	MapFile	ClassMapFile	FouFile
Maximale waterstanden per rekencel				x
Maximale stroomsnelheden per rekencel				x
Incrementele waterdieptes per rekencel			x	
Incrementele stroomsnelheden per rekencel			x	
Waterdieptes per rekencel		x		
Waterstanden per rekencel		x		
Stroomsnelheden per rekencel		x		
Stroomrichtingsvector per rekencel		x		
Aantal keren dat de stroming (Courant) gelimiteerd was per rekencel		x		
Bresdebieten	x			
Cumulatieve bresdebieten	x			
Bovenstroomse- en benedenstroomse waterstanden bij bres	x			
Bresdiepte	x			
Bresbreedte	x			
Waterbalans variabelen	x			
Waterstanden, stroomsnelheden en coördinaten bij observatiepunten of -doorsnedes	x			
Data bij kunstwerken, pompen, sluisen en overstorten	x			
Data bij doorsnedes	x			

D Koppelings- en conversietabellen ruwheidslaag

Tabel D.1 Conversietabel LGN7 landgebruiksklasse naar winter/zomer Nikuradse ruwheid

LGN7		LGN 4			LGN7	
Klasse	Landgebruik	Klasse	Landgebruik	Winter Nikuradse ruwheidswaarde	Winter Nikuradse ruwheidswaarde	Zomer Nikuradse ruwheidswaarde
16	Zoet water	16	Zoet Water	0.1	0.1	idem
1	Agrarisch gras	1	Grasland	0.25	0.25	idem
45	Natuurgraslanden	1	Grasland	0.25	0.25	1
2	Mais	2	Mais	0.4	0.4	2
3	Aardappelen	3	Aardappelen	0.4	0.4	1
4	Bieten	4	Bieten	0.4	0.4	1
5	Granen	5	Granen	0.4	0.4	2
6	Overige gewassen	6	Overige Landbouwgewassen	0.4	0.4	1
10	Bloembollen	10	Bollen	0.4	0.4	1
23	Gras in primair bebouwd gebied	23	Gras in bebouwd gebied	0.4	0.4	idem
24	Kale grond in primair bebouwd gebied	24	Kale grond in bebouwd gebied	0.4	0.4	idem
28	Gras in secundair bebouwd gebied	23	Gras in bebouwd gebied	0.4	0.4	idem
61	Boomkwekerijen	6	Overige Landbouwgewassen	0.4	0.4	idem
25	Hoofdwegen en spoorwegen	25	Hoofdwegen en spoorwegen	1	1	idem
35	Open stuifzand en/ of rivierzand	35	Open stuifzand	1	1	idem
36	Heide	36	Heide	1	1	idem
37	Matig vergraste heide	37	Matig vergraste heide	1	1	idem
38	Sterk vergraste heide	38	Sterk vergraste heide	1	1	idem
39	Hoogveen	39	Hoogveen	1	1	idem
41	Overige moerasvegetatie	41	Overige moerasvegetatie	1	1	2
42	Rietvegetatie	42	Rietvegetatie	1	1	2
8	Glastuinbouw	8	Glastuinbouw	5	5	idem
9	Boomgaarden	9	Boomgaard	5	5	idem
11	Loofbos	11	Loofbos	5	5	idem
12	Naaldbos	12	Naaldbos	5	5	idem
20	Bos in primair bebouwd gebied	20	Loofbos in bebouwd gebied	5	5	idem
22	Bos in secundair bebouwd gebied	20	Loofbos in bebouwd gebied	5	5	idem
40	Bos in hoogveengebied	40	Bos in hoogveengebied	5	5	idem
43	Bos in moerasgebied	43	Bos in moerasgebied	5	5	idem
62	Fruitekwekerijen	9	Boomgaard	5	5	idem
18	Bebouwing in primair bebouwd gebied	18	Stedelijk bebouwd gebied	10	10	idem
19	Bebouwing in secundair bebouwd gebied	18	Stedelijk bebouwd gebied	10	10	idem
26	Bebouwing in het buitengebied	26	Bebouwing in agrarisch gebied	10	10	idem

Tabel D.2 Conversietabel Basis-DLM landgebruiksklasse naar winter/zomer Nikuradse ruwheid

Basis-DLM					LGN7	Basis-DLM	
Ebene	Objektart	Objekt - artcode	Anzahl	Landgebruik in NL	Klasse	Winter Nikuradse ruwheidswaarde	Zomer Nikuradse ruwheidswaarde
fdv01_f	AX_StehendesGewaesser	44006	3329	Stagnant water	16	0.1	idem
fdv01_f	AX_Hafenbecken	44005	222	havenbassin	16	0.1	idem
geb03_f	AX_NaturUmweltOder-Bodenschutzrecht	71006	4570	Beschermd gebied natuur of bodem	45	0.25	1
geb03_f	AX_SonstigesRecht	71011	50	Beschermd gebied	11,12	5	idem
gew01_f	AX_StehendesGewaesser	44006	19721	Stilstaand water	16	0.1	idem
gew01_f	AX_Fliessgewaesser	44001	569	Stromend water	16	0.1	idem
sie01_f	AX_Ortslage	52001	6833	Bebouwd gebied	18	10	idem
sie02_f	AX_Wohnbauflaeche	41001	199710	Bebouwing wonen	18	10	idem
sie02_f	AX_Flaeche-GemischterNutzung	41006	114357	Gemengd gebruik	18	10	idem
sie02_f	AX_IndustrieUnd-Gewerbeflaeche	41002	38305	industrie	18	10	idem
sie02_f	AX_SportFreizeitUnd-Erholungsflaeche	41008	21375	sportterrein	23	0.4	idem
sie02_f	AX_FlaecheBesonderer-FunktionalerPraegung	41007	16957	Overige terreinen	18	10	idem
sie02_f	AX_Friedhof	41009	3335	Begraafplaats	23	0.4	idem
sie02_f	AX_TagebauGrubeSteinbruch	41005	631	Open steengroeve	NA	10	idem
sie03_f	AX_BauwerkOderAnlageFu-er-SportFreizeitUndErholung	51006	9460	Gebouwen en terrein sport, vrije tijd en recreatie	23	0.4	idem
sie03_f	AX_BauwerkOderAnlage-FuerIndustrieUndGewerbe	51002	1805	Gebouwen handel en industrie	18	10	idem
sie03_f	AX_Vorratsbehaelter-Speicherbauwerk	51003	1036	Gebouwen voor opslag	18	10	idem
sie03_f	AX_HistorischesBauwerkOder-HistorischeEinrichtung	51007	51	Gebouwen historisch	18	10	idem
sie03_f	AX_SonstigesBauwerkOder-SonstigeEinrichtung	51009	3	Gebouwen overig	18	10	idem
sie04_f	AX_Hafen	52002	157	Haven	16	0.1	idem
veg01_f	Ackerland	43001	1010	bouwland	6	0.4	1
	Grünland		1020	grasland	1	0.25	idem
	Streuobstwiese		1021	boomgaard	9	5	idem
	Gartenland		1030	Gartenland is een gebied voor de teelt van groenten, fruit en bloemen, evenals voor de teelt van gecultiveerde planten	6	0.4	1

Basis-DLM					LGN7	Basis-DLM	
	Baumschule		1031	kwekerij	9	5	idem
	Weingarten		1040	wijngaard	9	5	idem
	Obstplantage		1050	boomgaard	9	5	idem
veg02_f	AX_Wald	43002	22194 4	Bos	11,12	5	idem
veg03_f	AX_Gehoelz	43003	89341	Struweel	11,12	5	idem
veg03_f	AX_UnlandVegetationslose- Flaechе	43007	6859	Braak	24	0.4	idem
veg03_f	AX_Heide	43004	1504	Heide	36	1	idem
veg03_f	AX_Sumpf	43006	244	Moeras	41	1	2
veg03_f	AX_Moor	43005	180	Plasdras gebied	41	1	2
veg04_f	AX_Vegetationsmerkmal	54001	7662	Bos / Park	11,12	5	idem
ver01_f	AX_Strassenverkehr	42001	40199	wegen	25	1	idem
ver01_f	AX_Platz	42009	6781	Parkeerterrei n o.a.	25	1	idem
ver03_f	AX_Bahnverkehr	42010	9356	spoor	25	1	idem
ver04_f	AX_Flugverkehr	42015	226	vliegveld	25	1	idem
ver05_f	AX_Schiffsverkehr	42016	295	scheepvaart	16	0.1	idem
ver06_f	AX_BauwerkIm- Verkehrsbereich	53001	3746	bouwerk verkeer	25	1	idem
ver06_f	AX_Bahnverkehrsanlage	53004	691	bouwwerk spoor	25	1	idem

E Kenmerken visualisatietools

E.1 Inleiding

Deze bijlage geeft een overzicht van visualisatietools voor D-HYDRO. Dit is gedaan in de vorm van een tabel met een overzicht van enkele karakteristieken. De tabel gaat in op de volgende visualisatiemogelijkheden:

- Quickplot (Deltares tool, afkomstig uit Delft3D; gebruikt Matlab run-time libraries die meegeleverd worden; Quickplot wordt geleverd als zip file met een exe-installer voor de Matlab run-time libraries).
- Crayfish plugin in QGIS. Deze is beschikbaar in QGIS2 en inmiddels ook (deels) beschikbaar voor QGIS3 versies. De tabel geeft aan waar de verschillen zitten. Nieuwe ontwikkelingen van Crayfish gebeuren alleen voor QGIS3. QGIS en de Crayfish plugin kunnen vrij gedownload worden.
- DFX visualisatie tool. DFX is een Deltares tool die eenvoudig gekopieerd kan worden (dus geen setup.exe).

Koppeling van D-HYDRO met de schade- en slachtoffermodule FIAT (Flood Impact Assessment Tool) gebeurt door conversie van de D-HYDRO uitvoer naar regelmatige grids met vierkante cellen (.ASC bestanden vergelijkbaar met SOBEK-2); deze bestanden kunnen direct door FIAT worden ingelezen. FIAT berekent op basis van de maximale dieptes berekend met FM en schadefuncties voor diverse landgebruikscategorieën de schade.

CIRCLE is de Deltares tool die Critical Infrastructure effecten kan laten zien. Via DFX kan Circle direct gekoppeld worden aan FM resultaten.

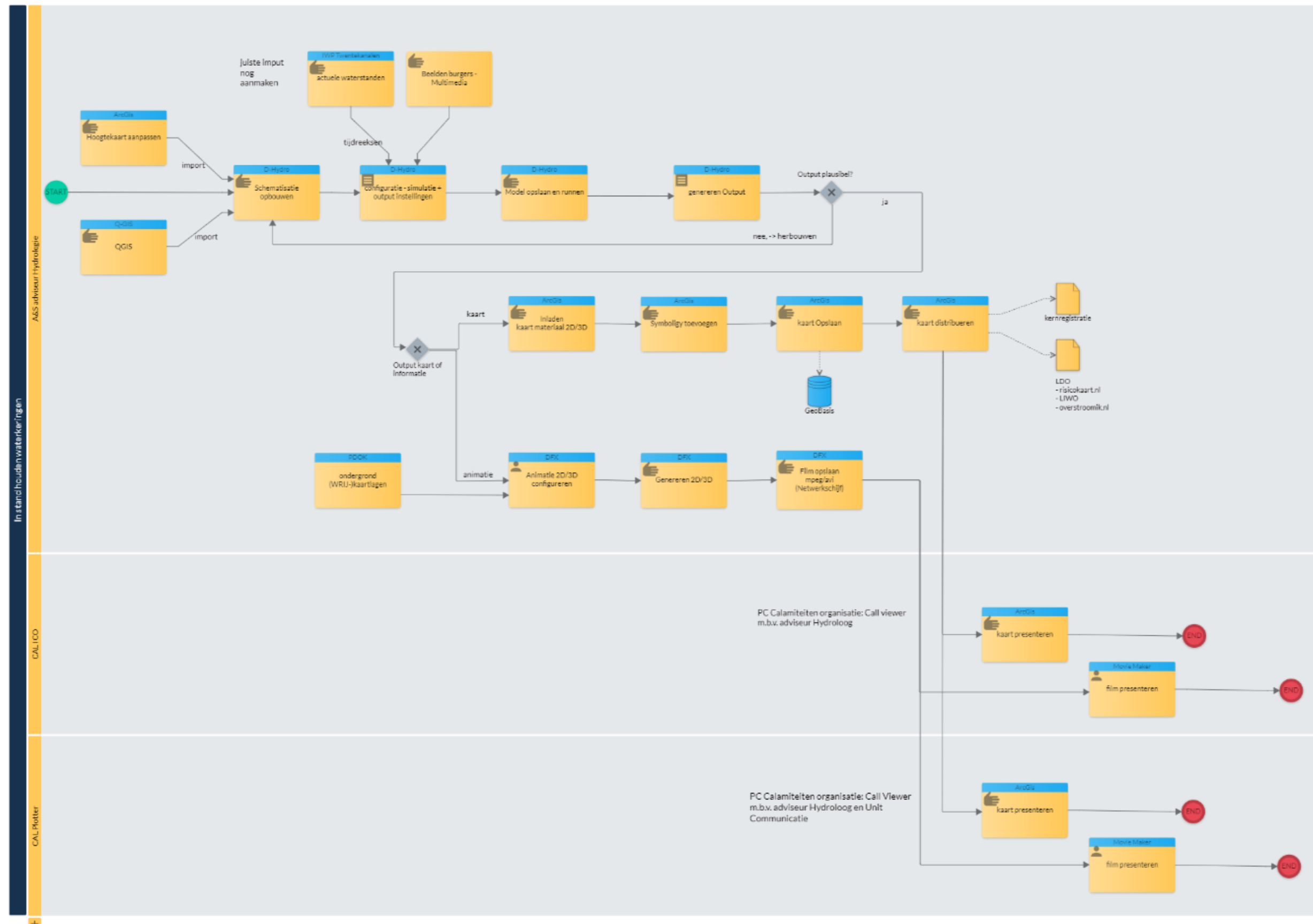
Tabel E.1 Overzicht functionaliteit visualisatietools

Functionaliteit \Tools	Quickplot	Crayfish in QGIS2	Crayfish in QGIS3	DFX tool	Opmerkingen
Ontwikkeld door	Deltares	Lutra consulting	Lutra consulting	Deltares	
Maken van animaties en videos	2D (Top view)	2D (Top view)	2D (Top view)	2D, 3D (bird's eye view vanuit bewegend punt)	
Raster calculator	Ja (mits 2 identieke rasters)	Ja, maar alleen voor regelmatige grids (vraagt dus eerst conversie)	Ja, maar alleen voor regelmatige grids (vraagt dus eerst conversie)	Nee, maar er is een plan om dit in de toekomst op te nemen	
Streamlines /Particle tracking	Nee	Ja	Nee	Ja	Om deze functionaliteit in QGIS3 te realiseren wordt financiering gezocht
1D visualisatie	Ja	Nee	To be implemented	To be implemented	Lutra implementeert deze functionaliteit begin 2020
2D visualisatie	Ja	Ja	Ja	Ja	
3D visualisatie	Ja	Nee	Nee	Ja	3D functionaliteit in Quickplot is typisch voor een gelaagd systeem

Functionaliteit \Tools	Quickplot	Crayfish in QGIS2	Crayfish in QGIS3	DFX tool	Opmerkingen
					(bv chloride concentratie in rivier-estuarium)
Real time modelrun en visualisatie (via BMI)	Nee	Nee	Nee	Ja	
Critical Infrastructure (CI) in animatie (Circle)	Nee	Nee	Nee	Ja	Voorbeeld DFX toepassing met CI voor Ierland en Zwolle
Overstromingskaarten (per tijdstap)	Ja	Ja	Ja	To be implemented	Quickplot exporteert als Shape file, Crayfish en DFX exporteren als raster
Berekenen van maximum inundatiekaarten	Ja	Ja	Ja	Nee (alleen visualisatie van maximum inundatiekaart als die bestaat)	Voor het direct genereren van de maximum inundatiekaart kan in D-HYDRO de Fourier analysis uitvoeroptie in de MDU file (<name.fou) aangezet worden
Interpolatie van datawaarden	Nee	Nee	Nee	Ja	
Snelheidsveld	Ja	Ja	Ja	Ja	De pijlen geven alleen de richting aan, niet de grootte.
Tijd serie plot van een puntlocatie	Ja	Ja, maar alleen voor 2D locatie.	Ja, maar alleen voor 2D locatie. Uitbreiding voor 1D locaties is voorzien.	Ja (2D en 3D)	
Plot een variabele op een cross-sectie	Ja	Ja	Ja	Ja	
File formaten	grid file, spline, ARCview shape, CSV file, sample file (MATLAB binary format), MATLAB binary format.	NetCDF, GRIB, XMDF, XDMF, FLO-2D, Selafin files, SMS DAT en SWW. Voorbeelden softwarepakketten: Weather Research and Forecasting Model (WRF), TUFLOW, AnuGA, BASEMENT, Flood Modeller 2D, HECRAS 2D, FLO-2D, TELEMAC and Hydro_AS 2D.	NetCDF, GRIB, XMDF, XDMF, FLO-2D, Selafin files, SMS DAT en SWW. Voorbeelden softwarepakketten: Weather Research and Forecasting Model (WRF), TUFLOW, AnuGA, BASEMENT, Flood Modeller 2D, HECRAS 2D, FLO-2D, TELEMAC and Hydro_AS 2D.	D-Flow FM NetCDF ('U-Grid'), DelWAQ NetCDF output ('U-Grid'), (SOBEK-2) ASC files, GeoTiffs, ESRI Shapefiles, CSV files	

F Stroomschema bij calamiteit

Door WRIJ is het onderstaande stroomschema opgesteld van de uit te voeren acties en betrokken personen bij een calamiteit.



Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl