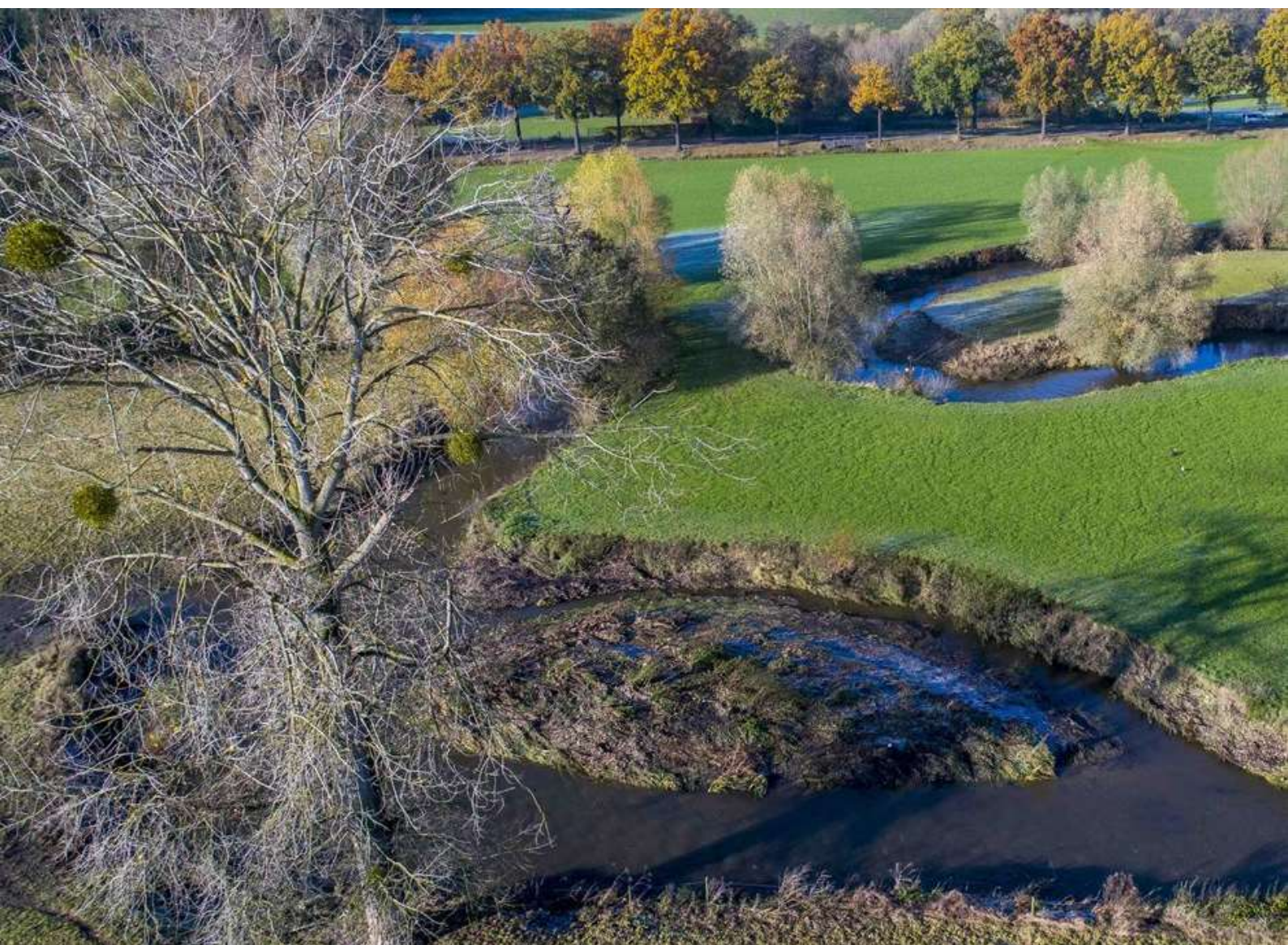




Bronmaatregelen Geuldal

Eindrapportage

Provincie Limburg

27 mei 2026

Project
Opdrachtgever

Bronmaatregelen Geuldal
Provincie Limburg

Document
Status
Datum
Referentie
Classificatie W+B

Eindrapportage
Definitief
27 mei 2026
151411/26-008.098
Projectgerelateerd

Projectcode
Projectleider
Projectdirecteur

151411
Drs. W.M. Zijderwijk
Ir. H.J. Mondeel

Auteur(s)
Gecontroleerd door
Goedgekeurd door

Dr. ir. J. Houwelingen
Drs. W.M. Zijderwijk
Drs. W.M. Zijderwijk

Paraaf



Adres

Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V. | Deventer
Stationsweg 5
Postbus 3465
4800 DL Breda
+31 (0)76 523 33 33
www.witteveenbos.com
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.
© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden veeleenvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos, noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Tekst- en datamining van (delen van) dit document, evenals enige verwerking of reproductie ervan door middel van kunstmatige intelligentie technologieën is uitdrukkelijk niet toegestaan, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Dit document (of delen ervan) mag niet worden veeleenvoudigd en/of anderszins worden gebruikt op enigerlei wijze voor het trainen van kunstmatige intelligentie technologieën, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	5
1.1	Beschrijving opdracht	5
1.2	Doel	5
1.3	Leeswijzer	5
2	UITGANGSPUNTEN	6
2.1	Maatregelen	6
2.2	Aanpak	8
2.3	Events	9
2.4	Modeluitvoer	11
3	SCHEMATISATIE	13
3.1	Maatregel 17: verondieping beek	13
3.2	Maatregel 18: verruwing beekdal	16
3.3	Maatregel 19: checkdams	17
4	RESULTATEN	20
4.1	Maatregel 17: verondieping beek	20
4.2	Maatregel 18: verruwing beekdal	33
4.2.1	Manning $0,07 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$	33
4.2.2	Manning $0,1 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$	42
4.3	Maatregel 19: Checkdams	49
5	CONCLUSIE	61
5.1	Algemene conclusie	61
5.2	Aanbevelingen	62
6	REFERENTIES	63

Bijlage(n)**Aantal pagina's**

I	Afvoergolf bovenstrooms Valkenburg voor verschillende scenario's en events	1
II	Waterstandsverloop bovenstrooms Valkenburg voor verschillende scenario's en events	3

1

INLEIDING

1.1 Beschrijving opdracht

WRL werkt aan maatregelen om toekomstige wateroverlast in het Geuldal te verminderen. In een planMER wordt een viertal varianten voor het stroomgebied met elkaar vergeleken en gescoord op relevante effecten. Dit betreft drie extreme studievarianten en een voorkeursvariant. Deze varianten worden samengesteld uit losse deelmaatregelen die aantoonbaar effectief zijn. In deelstudies wordt voor alle denkbare maatregelen de effectiviteit aangetoond met hydrologische en/of hydraulische modellen. Naast diverse civieltechnische maatregelen is er een groep zogenaamde natuurlijke maatregelen (Nature-based Solutions): water vasthouden waar het valt (bronmaatregelen) of afstromend water vertragen en opvangen (natuurlijk bergen).

Voor 21 verschillende natuurlijke maatregelen zijn gebiedsdekkende kansenskaarten beschikbaar die per maatregel aangeven wat logische en effectieve locaties zijn om de maatregel uit te voeren. Van deze 21 maatregelen ligt een groot deel (vooral) op de plateaus en hellingen. Deze worden binnen een lopende opdracht doorgerekend met het neerslag-afvoermodel OpenLISEM.

Een kleiner deel ligt onder in de beekdalen en is niet geschikt voor dit type modellering en kan beter met een 1D/2D hydraulisch model worden doorgerekend op effectiviteit. Het betreft de maatregelen:

- Maatregel 17: Verondieping beek;
- Maatregel 18: Verruwing beekdal;
- Maatregel 19: Checkdams.

1.2 Doel

Het doel van de studie is het bepalen van de hydraulische effecten van de bovengenoemde maatregelen op de piekafvoeren en -waterstanden in het Geuldal.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 zijn de algemene uitgangspunten beschreven. In hoofdstuk 3 is per maatregel de wijze van schematiseren toegelicht. In hoofdstuk 4 zijn per maatregel de resultaten gepresenteerd. In hoofdstuk 5 zijn de belangrijkste conclusies verzameld.

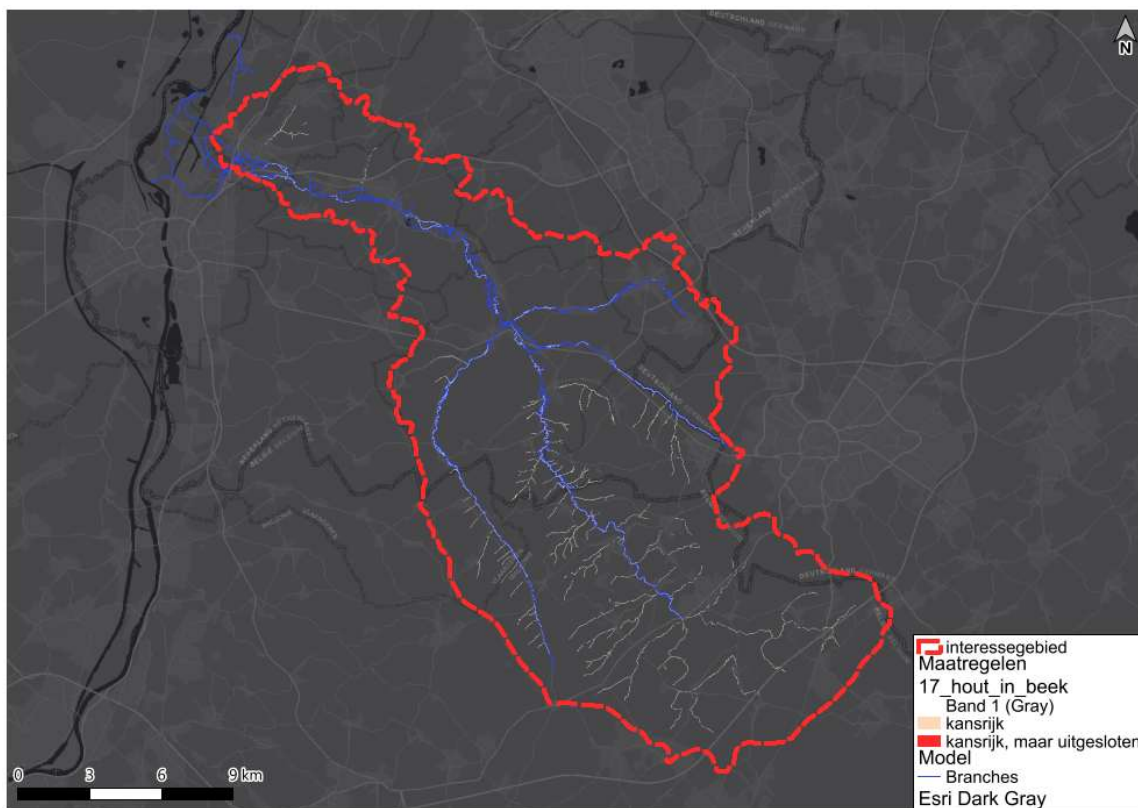
2

UITGANGSPUNTEN

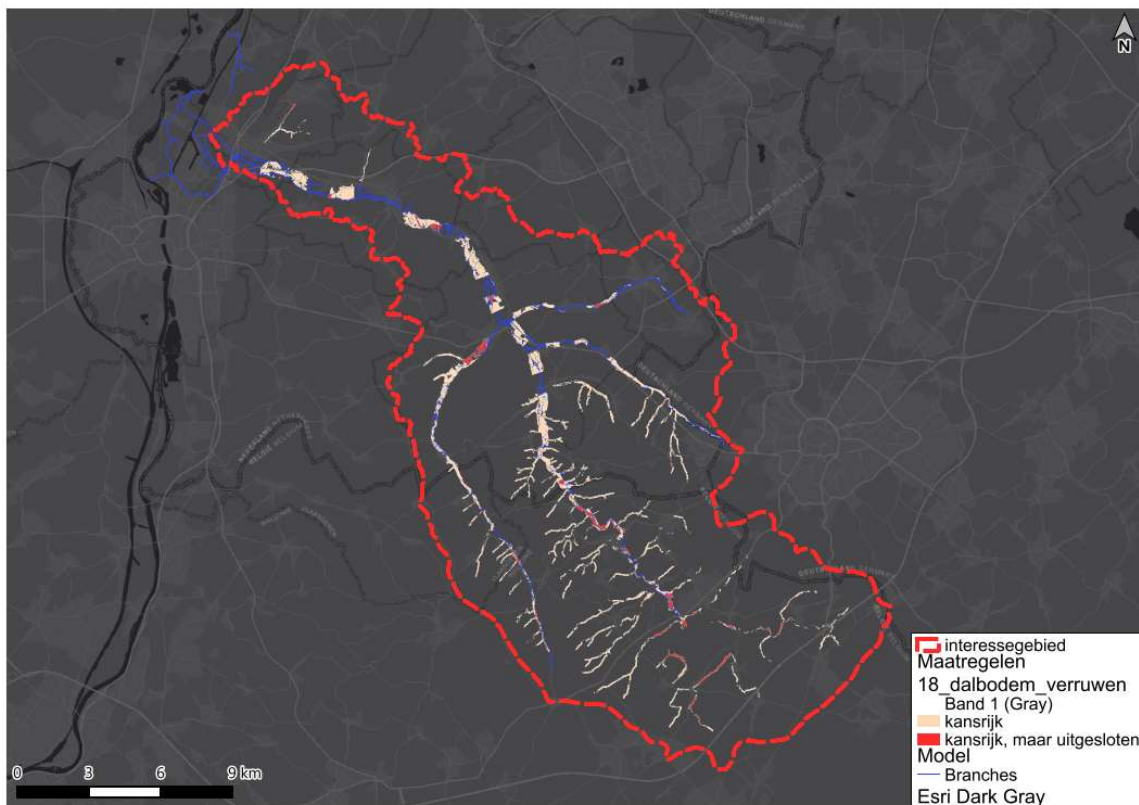
2.1 Maatregelen

Voor maatregelen 17 tot en met 19 heeft WRL-kansenkaarten aangeleverd voor het stroomgebied van de Geul. Deze kaarten zijn door Bureau Strooming opgesteld [ref. 1]. Ook is een beschrijving van de maatregelen aangeleverd [ref. 2]. Deze kansenkaarten vormen de basis voor de aanpassingen in de schematisatie van het model. In Afbeelding 2.1 tot en met Afbeelding 2.3 zijn de kansenkaarten weergegeven. Waarbij de kaart van maatregel 19 gedigitaliseerd is naar punten, zodat de locaties van de Checkdams beter zichtbaar zijn. De kansrijke locaties liggen voor alle maatregelen ook grotendeels in zijtakken van de hoofdbek (Geul) en zijbeken (Eyserbeek, Selzerbeek en Gulp). In het Geul-model zijn alle hoofd- en zijbeken opgenomen inclusief het beekdal. Veel kansrijke locaties vallen daarmee buiten het modelgebied. Maatregelen die buiten het modeldomein vallen worden niet meegenomen in deze studie. Met dit model wordt dus niet het totale potentiële effect van de kansenkaart berekend.

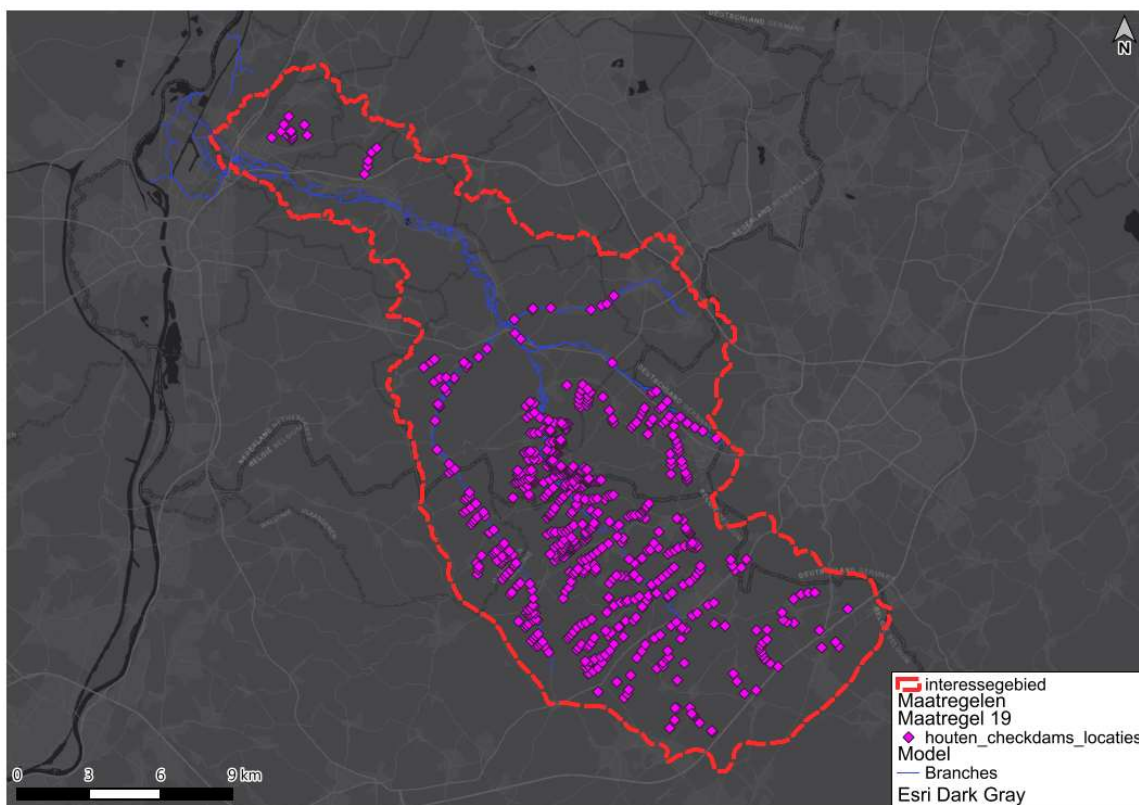
Afbeelding 2.1 Kansenkaart maatregel 17: verondieping beek



Afbeelding 2.2 Kansenskaart maatregel 18: verruwing beekdal



Afbeelding 2.3 Kansenskaart maatregel 19: checkdams.



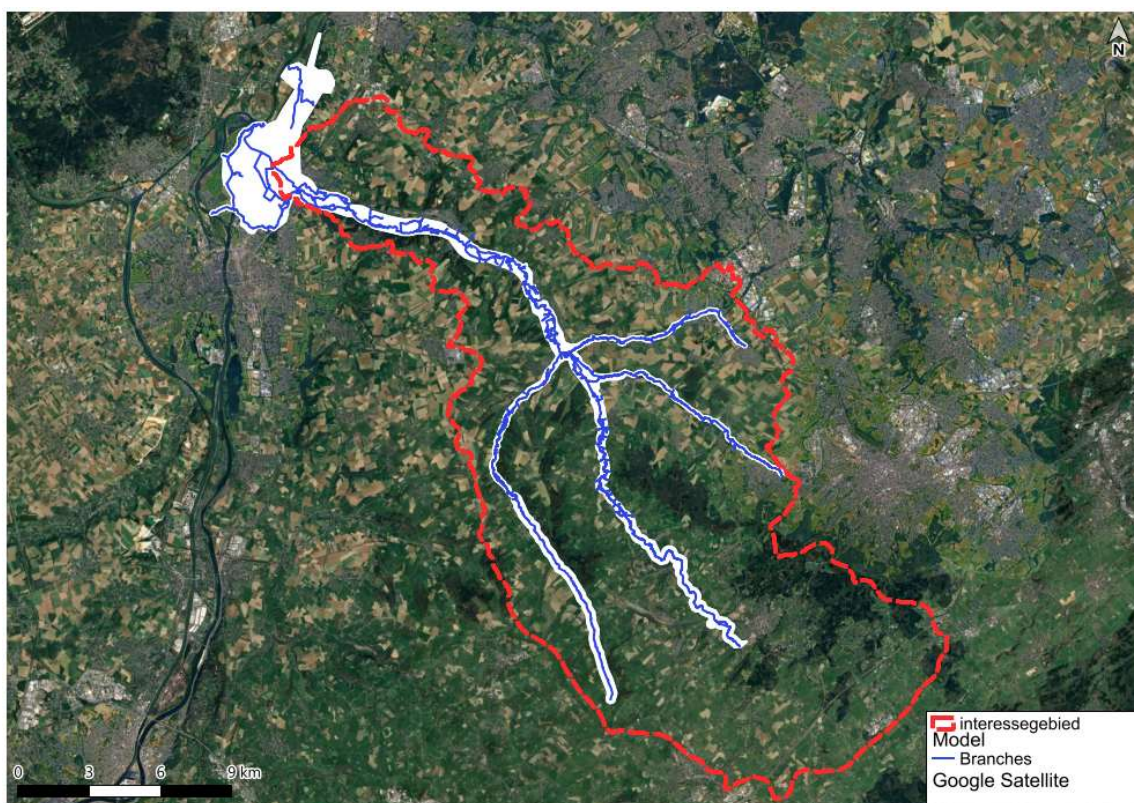
2.2 Aanpak

De maatregelen worden doorgerekend met een 1D2D-RR-RTC D-Hydro model van de Geul. In Afbeelding 2.4 is een overzichtkaart van het modelgebied weergegeven. In het 1D model zijn de hoofd- en zijbeken opgenomen. In 2D is het beekdal van deze beken opgenomen, omdat ten tijde van hoge afvoeren inundaties optreden, en het beekdal mee stroomt. De neerslagafvoer (via RR) vormt de voornaamste forcering van het model. Daarnaast zijn er nog enkele laterale aanvoeren die het model forceren.

De uitgangspunten van de modellering zijn als volgt:

- het modelbouwsript en de databank welke zijn aangeleverd door het waterschap ten tijde van het project 'bypass Valkenburg' worden ook in dit project als basis gebruikt*;
- het model wordt net zoals in het project 'bypass Valkenburg' opgebouwd in D-Hydro versie 2024.03;
- de wijzigingen worden per maatregel aangebracht in kopieën van de originele bestanden in de databank;
- per maatregel worden wijzigingen aangebracht in een kopie van het originele modelbouwsript;
- er worden enkele wijzigingen aangebracht in het referentiemodel, zodat:
 - extra 1D observatiepunten en 2D observatie cross secties worden toegevoegd, de locaties worden gebaseerd op een eerder uitgevoerde studie door HKV [ref. 3];
 - de RTC en RR-module van een model gegenereerd met het aangeleverde modelbouwsript geeft foutmeldingen. De RTC-map, RR-map, .Xml-files, .BAT-files worden automatisch gekopieerd vanuit een ontvangen model, zodat deze foutmelding niet optreedt;
 - maxima.fou wordt toegevoegd aan het model en. MDU-file voor het maximum resultaat;
- het modelbouwsript van het referentiemodel vormt daarna de basis voor de maatregel modellen.

Afbeelding 2.4 Overzichtkaart van het modelgebied



* Gedurende het project bleek dat de verwijzing binnen het model naar de 2D ruwheid niet goed wordt aangemaakt met het aangeleverde modelbouwsript. Het wordt geadviseerd om dit na te gaan in de modelbouwsripts die worden toegepast in andere projecten.

2.3 Events

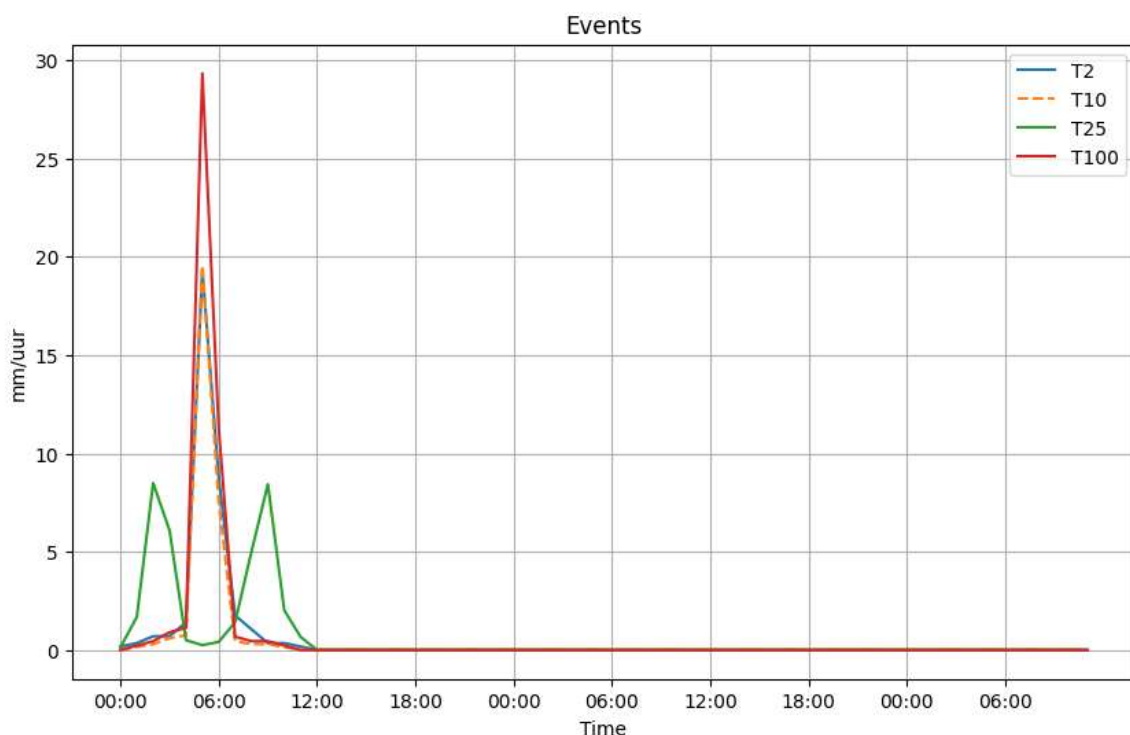
De beekherstelmaatregelen worden voor events met verschillende herhalingstijden doorgerekend. De effectiviteit van de maatregelen kan verschillen per herhalingstijd en vorm van de afvoergolf. Het waterschap heeft 4 (synthetische) events geselecteerd en hiervoor de benodigde invoer (bui-bestanden en lateralen) aangeleverd. De combinaties van buibestanden en laterale aanvoer volgen uit een eerder uitgevoerde stochastische analyse uit de watersysteemtoets van de Geul.

Het gaat om de volgende events:

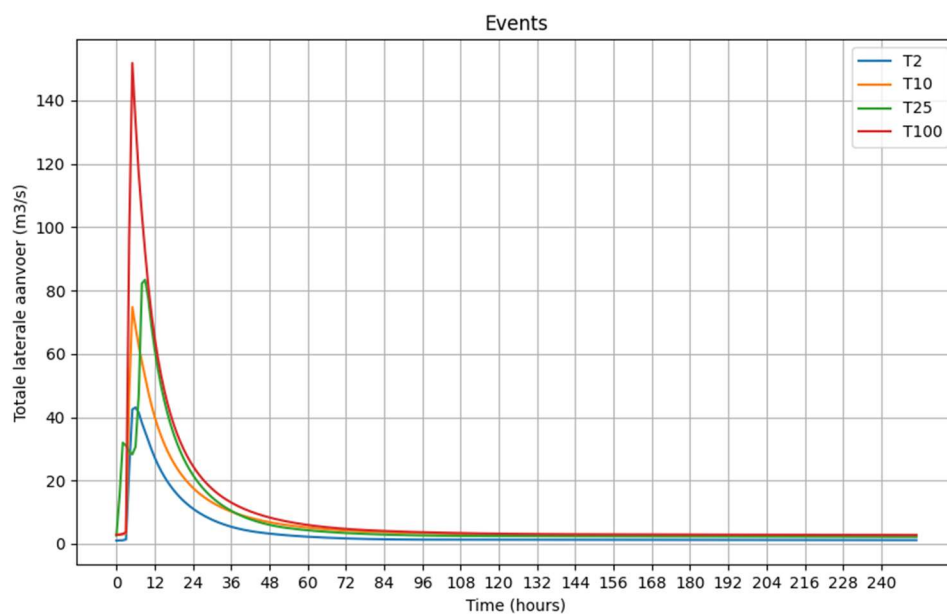
- **T2:** Een event waarbij in de huidige situatie de dalbodem net wel/niet inundeert (bankfull). Inundaties starten bij piekafvoeren van ongeveer 27 m³/s en hoger. Een T=1 situatie heeft een piekafvoer van 23 m³/s. Een piekafvoer van 27 m³/s komt ongeveer overeen met een T=2 situatie. Dit event wordt in het vervolg van dit rapport T2 genoemd;
- **T10;**
- **T25;**
- **T100.**

De forcering van het model vindt plaats via een buibestand in de neerslagafvoermodule (RR) en via laterale aanvoer op het 1D model. In Afbeelding 2.5 zijn de neerslagreeksen van de verschillende events in één grafiek weergegeven. In Afbeelding 2.6 zijn de gesommeerde laterale afvoeren voor de verschillende events weergegeven. Merk op dat (het patroon van) de bui niet maatgevend is voor de afvoergolf. Voornamelijk de lateralen zijn bepalend voor het patroon van de resulterende afvoergolf (door toedoen van o.a. bodemcondities). Zo zijn bijvoorbeeld de neerslagreeksen van het T2 en T10 vrijwel identiek en bestaat T25 neerslagreeks uit twee relatief lage pieken. Terwijl de som van de laterale aanvoeren een duidelijk onderscheid laat zien tussen de verschillende events.

Afbeelding 2.5 Neerslagreeksen voor verschillende herhalingstijden, welke worden gebruikt als invoer voor het model

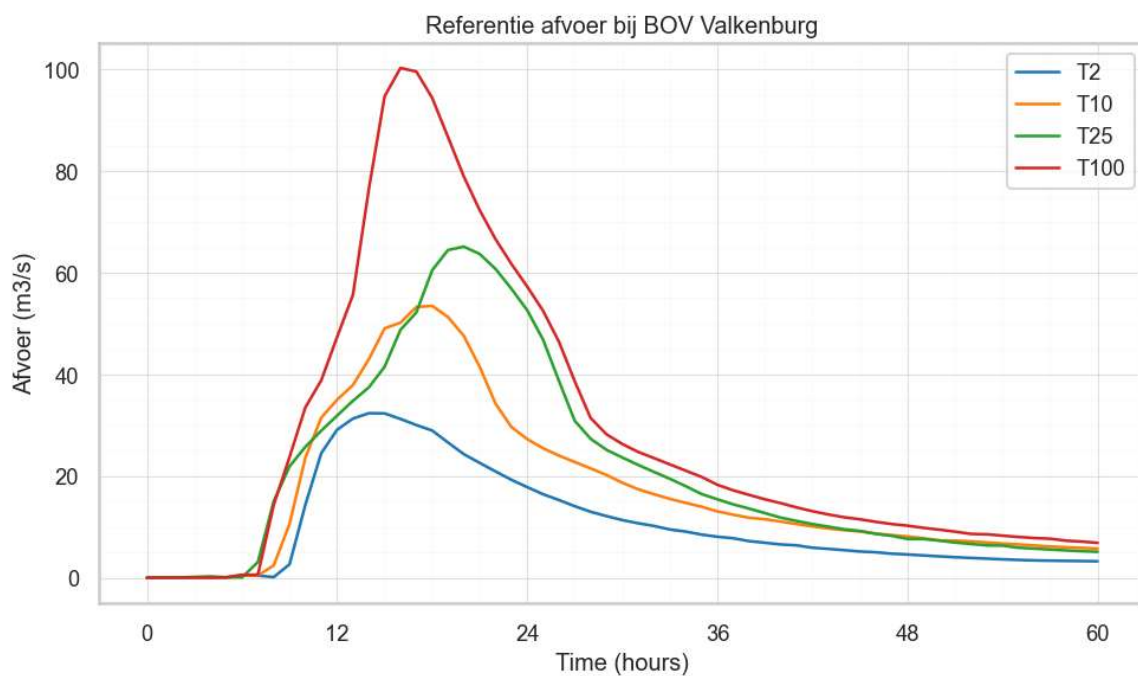


Afbeelding 2.6 Totale laterale aanvoer voor verschillende herhalingstijden, welke worden gebruikt als invoer voor het model



In Afbeelding 2.7 is de resulterende afvoergolf bovenstrooms van Valkenburg weergegeven voor de verschillende events zoals berekend met het referentiemodel.

Afbeelding 2.7 Afvoergolf bovenstrooms (BOV) van Valkenburg zoals berekend met het referentiemodel voor verschillende herhalingstijden



2.4 Modeluitvoer

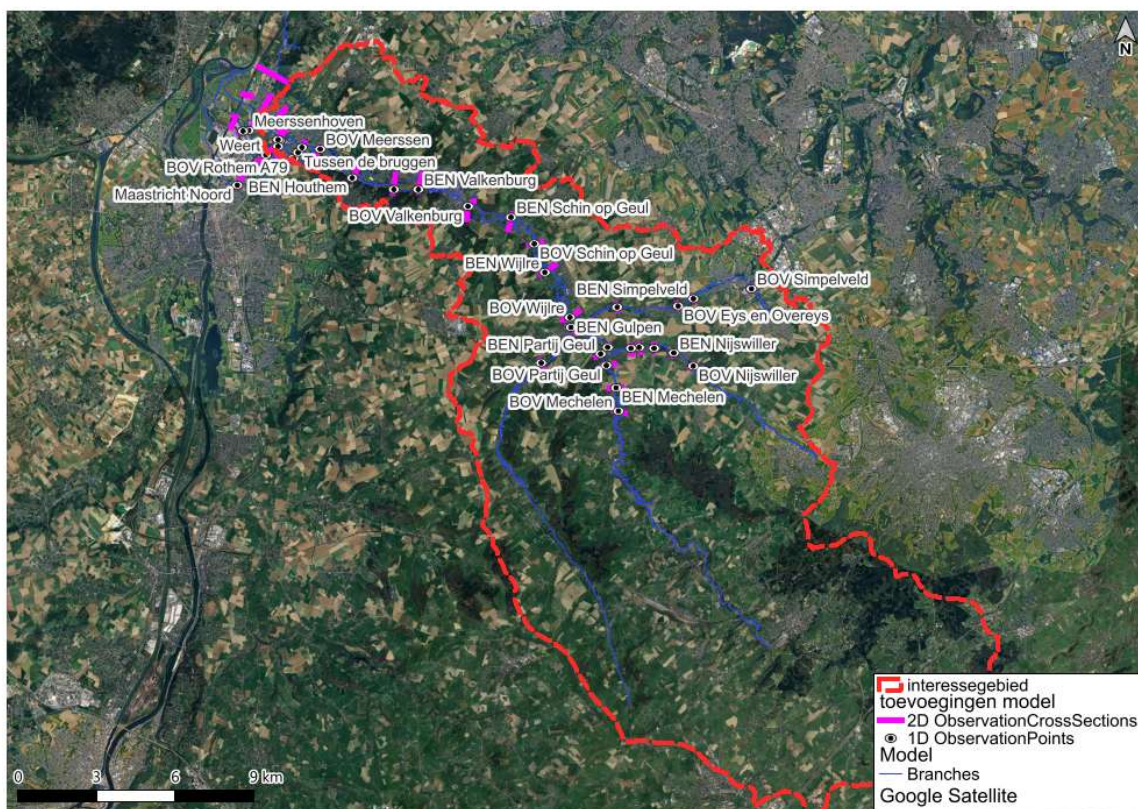
Observatiepunten in het model zijn in lijn met een studie die eerder is uitgevoerd door HKV [ref. 3]. De locaties liggen over het algemeen boven- en benedenstrooms van woonkernen. Naast de 1D observatiepunten, worden op deze locaties ook 2D observatie cross secties toegevoegd in verband met het meestromend beekdal. De afvoer over 2D wordt namelijk niet gevangen in het 1D resultaat.

In Afbeelding 2.8 zijn deze locaties weergegeven op de kaart. Merk op dat een aantal locaties op deze weergave wegvallen, omdat de labels overlappen. In de nabewerking zijn de volgende plots gegenereerd van de modelresultaten:

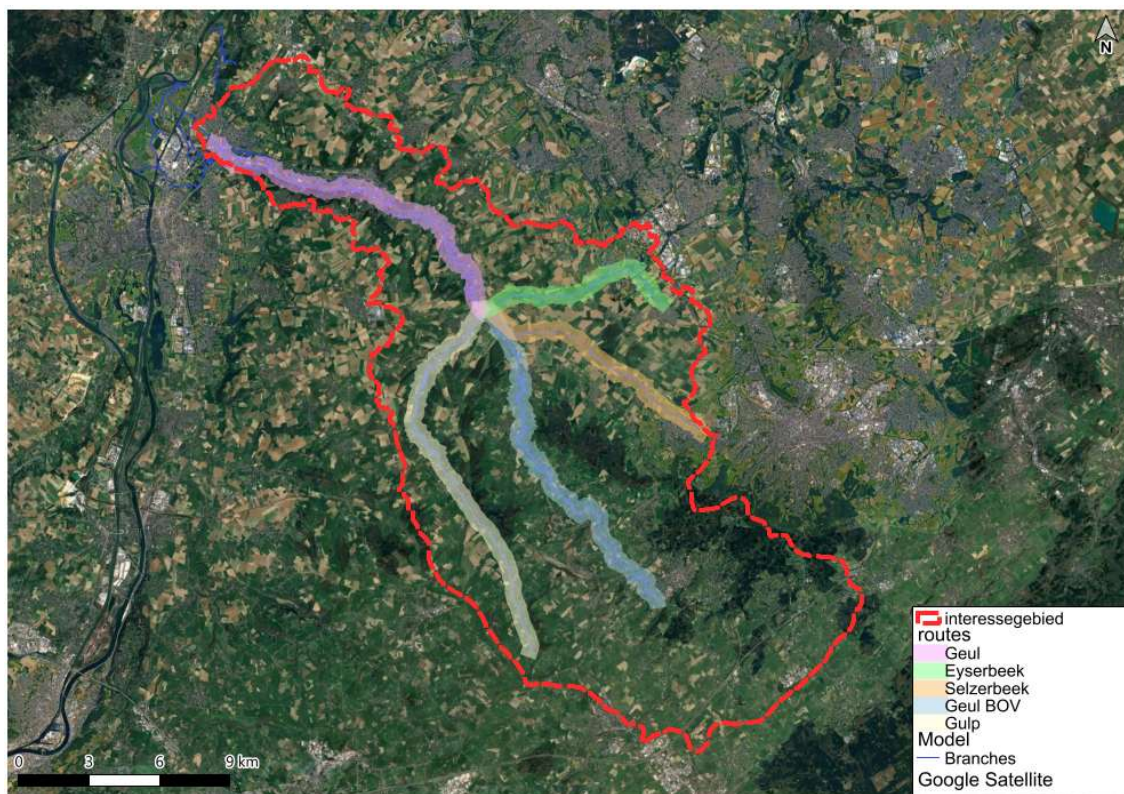
- afvoerplot en afvoerverschil ten opzichte van de referentie situatie voor alle bovengenoemde locaties en events;
- waterstandsplot en waterstandverschil ten opzichte van de referentie situatie voor alle bovengenoemde locaties en events.

Daarnaast zijn er per event afbeeldingen gegenereerd met de ruimtelijke resultaten. Per (zij)beek is een langsdoorsnede gemaakt van de maximale waterstand per rekenpunt. De verschillen ten opzichte van de referentiesituatie zijn op eenzelfde manier gepresenteerd. In Afbeelding 2.9 zijn de verschillende trajecten (Geul, Eyserbeek, Selzerbeek, Geul bovenstrooms en Gulpen) waarlangs langsdoorsneden zijn gemaakt weergegeven op de kaart. Ook zijn er inundatiekaarten en inundatieverschilkaarten gemaakt van de 2D modelresultaten, waarop te zien is hoe de beek buiten zijn oevers treedt en de dalbodem mee gaat stromen.

Afbeelding 2.8 Locaties van 1D observatiepunten en 2D observatie cross sections



Afbeelding 2.9 Indicatie van de (zij)beken en routes waarlangs een deel van de resultaten zal worden gepresenteerd middels langsdoorsneden



3

SCHEMATISATIE

In dit hoofdstuk is per maatregel een beschrijving gegeven van de maatregel en de schematisatie.

3.1 Maatregel 17: verondieping beek

Beschrijving

Met deze maatregel is de gedachte om het beekprofiel te verondiepen door het aanbrengen van hout en sediment. Het sediment hoopt zich op tussen het hout, waardoor de bodem van de beek zich langzaam ophoogt. In Afbeelding 3.1 is een illustratie gegeven van het aanbrengen van zand in de beek.

De gedachte achter deze maatregel is als volgt. Door de beekbodem te verhogen neemt het doorstroomoppervlak van de beek af, het profiel wordt kleiner. Er is minder bergingscapaciteit in de beek, waardoor bij hoge afvoeren de beek sneller buiten zijn oevers zal treden en het beekdal wordt benut (extra berging). Door het grotere doorstroomoppervlak van het beekdal, mogelijk een hogere ruwheid van het beekdal en kleinere waterdieptes neemt de stroomsnelheid af en wordt de afvoergolf gedempt. Benedenstrooms kunnen hierdoor piekafvoeren afnemen. De mate waarin deze maatregel effect heeft is niet op voorhand te beredeneren en is afhankelijk van de vorm van het beekdal en de locaties waar deze maatregel zal worden toegepast, de vorm en duur van de afvoergolf. Bij lagere afvoeren kan deze maatregel mogelijk ook tot meer inundaties leiden, omdat de beek sneller buiten zijn oevers zal treden. Ook kan toepassing van deze maatregel direct benedenstrooms van bebouwing tot verslechtering leiden. Bij toepassing bovenstrooms worden voordelen verwacht.

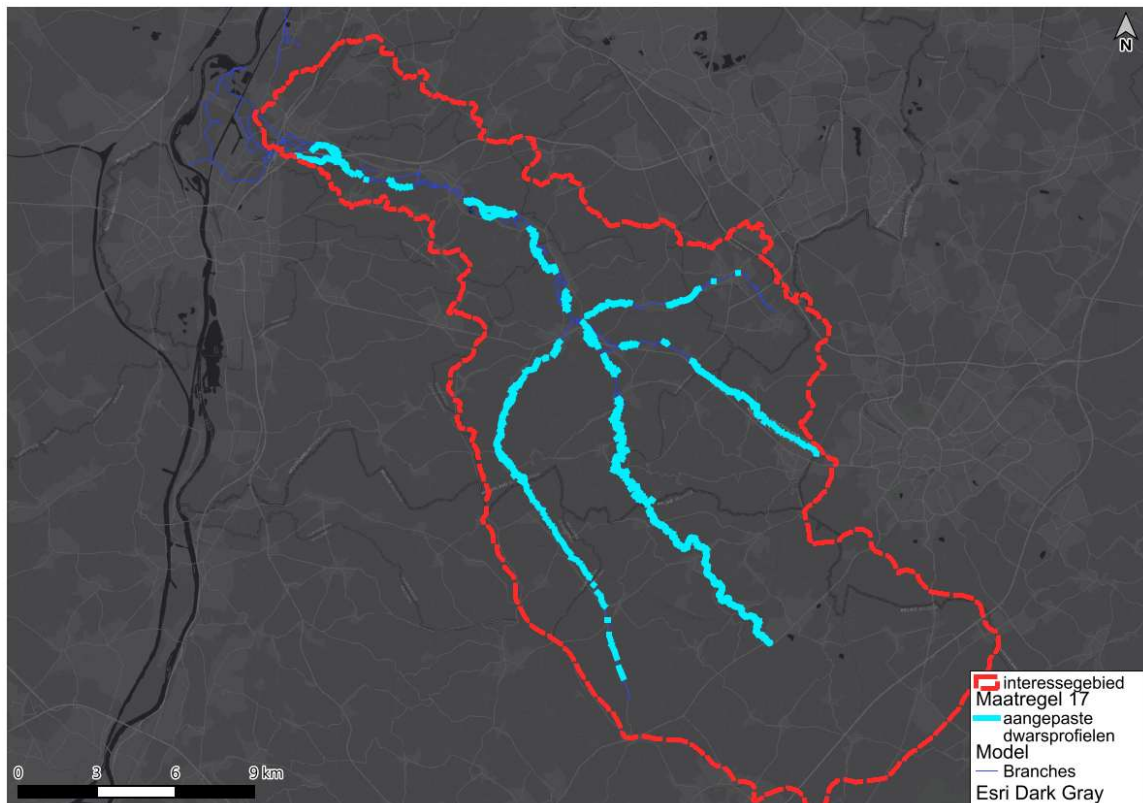
Afbeelding 3.1 Illustratie van verondieping beek door het aanbrengen van zand



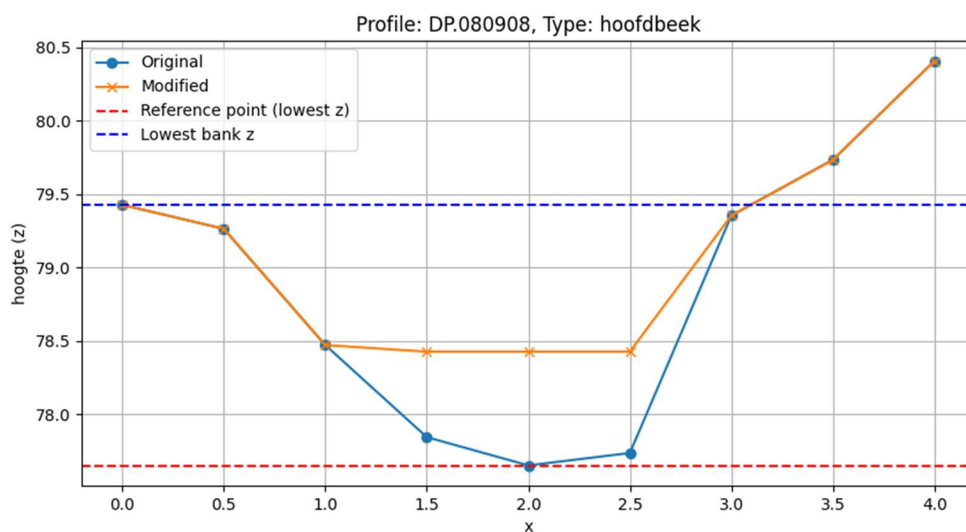
Schematisatie

Alle branches (modelwatergangen) en dwarsprofielen die binnen het kansrijke gebied (Afbeelding 2.1) liggen zijn geselecteerd (Afbeelding 3.2). Dit betreft in totaal 1089 YZ dwarsprofielen en 200 branches. De bodem in de profielen in de hoofdbeek (Geul) worden maximaal met 1 m opgehoogd. De diepte van de hoofdbeek, gemeten vanaf de laagste oever, moet minimaal 1 m blijven. Als hier niet aan kan worden voldaan is de ophoging minder. De bodemhoogte in de profielen die binnen de zijbeken vallen worden maximaal met 0,5 m verhoogd. Voor de zijbeken geldt dat de minimale diepte 0,2 m moet blijven. In Afbeelding 3.3 is een illustratie gegeven van een aangepast profiel (oranje), in dit geval een profiel van de hoofdbeek. Het originele profiel (blauw) is niet diep genoeg om 1 m te kunnen verondiepen.

Afbeelding 3.2 Locaties van aangepaste dwarsprofielen in maatregel 17

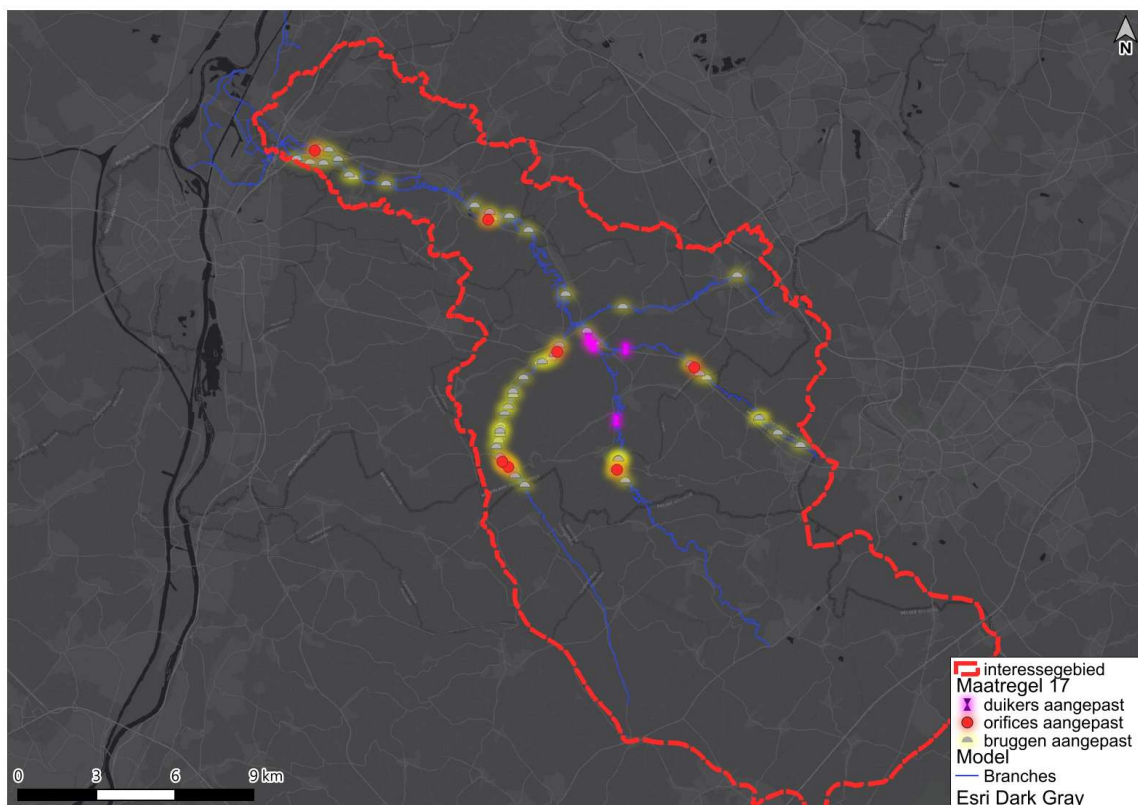


Afbeelding 3.3 Illustratie van de schematisatie van de verondieping van het profiel (hoofdbeek)



Doordat de beekbodem wordt verhoogd klopt de hoogteligging/insteekhoogte van kunstwerken niet meer. Binnen het kansrijke gebied zijn alle orifices (onderdoorlaten), duikers en bruggen geselecteerd (respectievelijk 12, 61 en 95), zodat deze ook in lijn met het dwarsprofiel kunnen worden gewijzigd. De hoogteligging van de kunstwerken wordt aangepast op basis van de ophoging van het bovenstroomse profiel. De (vaste) stuwen zijn niet gewijzigd. Verder worden alleen kleine duikers en orifices aangepast (diameter < 1,5 m). In België liggen geen kunstwerken die voldoen aan de condities om gewijzigd te worden. Uitgaande van bovenstaande condities zijn er in totaal 7 orifices, 4 duikers, 71 bruggen ook daadwerkelijk aangepast in het model (zie Afbeelding 3.4).

Afbeelding 3.4 Locaties van aangepaste kunstwerken in maatregel 17



De volgende geopackages en layers in de databank voor het model zijn aangepast:

- Profielen:
 - 1D_data/02dwarsprofielen/01_act/Profiel_huidig_v4_2Dcut.gpkg;
- Kunstwerken:
 - 1D_data/ HyDAMO_2_2_GEU_met_wasmachine_def_aanlevering20230310 - Copy_RHDHV.gpkg;
 - Orifices: Layers Stuw en Kunstwerkopening;
 - Duikers: Layer Duikersifonhevel;
 - Bruggen: Layer Brug;
- Brugprofielen:
 - 1D_data/04bruggen/01_act/crsdef_huidig.ini.

3.2 Maatregel 18: verruwing beekdal

Beschrijving

Met deze maatregel is de gedachte om de dalbodem te verruwen aan weerszijde van de beek door de overstromingsvlakte te laten ontwikkelen tot ruige vegetatie (zie Afbeelding 3.5). Met betrekking tot ruige vegetatie kan worden gedacht aan doorstroomoerassen, alluviaal bos en grasland met een hoge dichtheid aan struiken en bomen. Wanneer de beek ten tijde van hoge afvoeren buiten zijn oevers treedt, wordt het afstromend water vertraagd, waardoor de afvoerpiek wordt gedempt. Het heeft dus alleen nut om de effectiviteit van deze maatregel door te rekenen voor hoge afvoeren waarbij het beekdal gaat meestromen. Toepassing van deze maatregel kan lokaal juist ook hogere waterstanden opleveren, aangezien de afvoercapaciteit van de dalbodem worden verkleind. Toepassing van deze maatregel direct benedenstrooms van bebouwing kan leiden tot verslechtering, bovenstroomse toepassing geeft waarschijnlijk voordelen.

Afbeelding 3.5 Illustratie van vochtig alluviaal bos (links) en struweelbegroeiing [ref. 5]

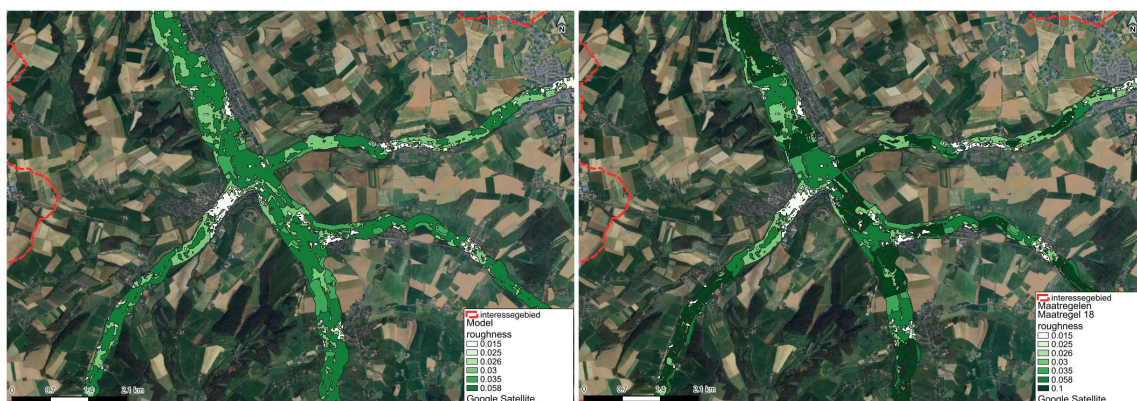


Schematisatie

Alle kansrijke gebieden zijn geselecteerd en overgenomen in de 2D ruwheidsdefinitie van de databank. In Afbeelding 3.6 zijn de aanpassingen weergegeven binnen de 2D ruwheidsdefinitie. Er zijn twee verschillende varianten beschouwd:

- ruwheid alluviaal bos: $0,1 \text{ s/m}^{1/3}$;
- ruwheid grasland met hoge dichtheid aan struiken: $0.07 \text{ s/m}^{1/3}$.

Afbeelding 3.6 Weergave aanpassing 2D ruwheid (links: referentiemodel, rechts: maatregel 18, Manning $0,01 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$)



De volgende geopackages in de databank voor het model is aangepast:

- 2D ruwheid: 2D_data\02_weerstand\01_act\roughness.gpkg.

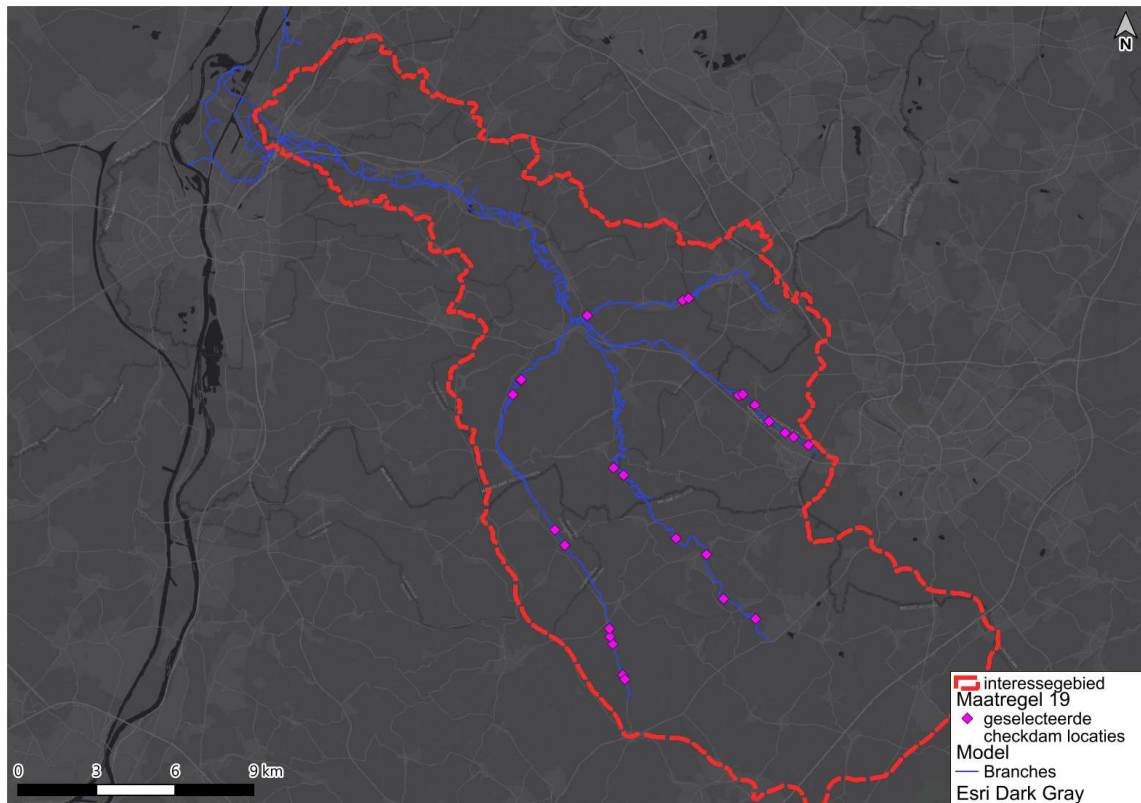
3.3 Maatregel 19: checkdams

Beschrijving

Bij deze maatregel worden op meerdere locaties checkdams in de beek gelegd. De beek wordt overspannen door boomstammen. De hoogte van dit pakket boomstammen is 1 m. Bij lage afvoeren stroomt het water zonder obstructie onder de boomstammen door. Bij hoge afvoeren hebben de boomstammen een stuwende werken. In het verlengde van de boomstammen worden aarden walletjes in het beekdal gecreëerd die aansluiten op de hogere gronden, zodat het water ook tijdelijk bovenstrooms van de checkdams kan worden vastgehouden. Naar verwachting heeft deze maatregel geen effect bij lage afvoeren. Bij hoge afvoeren kan het water tijdelijk worden geborgen waardoor de afvoerpiek wordt afgevlakt. Ook voor deze maatregel geldt dat toepassing lokaal ook hogere waterstanden kan opleveren. Wanneer een checkdam direct benedenstrooms van bebouwing wordt geplaatst kan dit leiden tot verslechtering van de situatie. Bij bovenstroomse toepassing worden voordelen verwacht.

Op de kansenkaart (Afbeelding 2.3) zijn in totaal 670 checkdams ingetekend. Het grootste aandeel van deze checkdams valt buiten het modelgebied. Daarnaast is het op veel locaties die wel binnen het modelgebied vallen (75 locaties) praktisch onhaalbaar om invulling te geven aan checkdams. De selectie is daarom verder beperkt door het waterschap, wat resulteert in 26 locaties die worden meegenomen in deze modelstudie. In Afbeelding 3.7 zijn deze locaties weergegeven op de kaart.

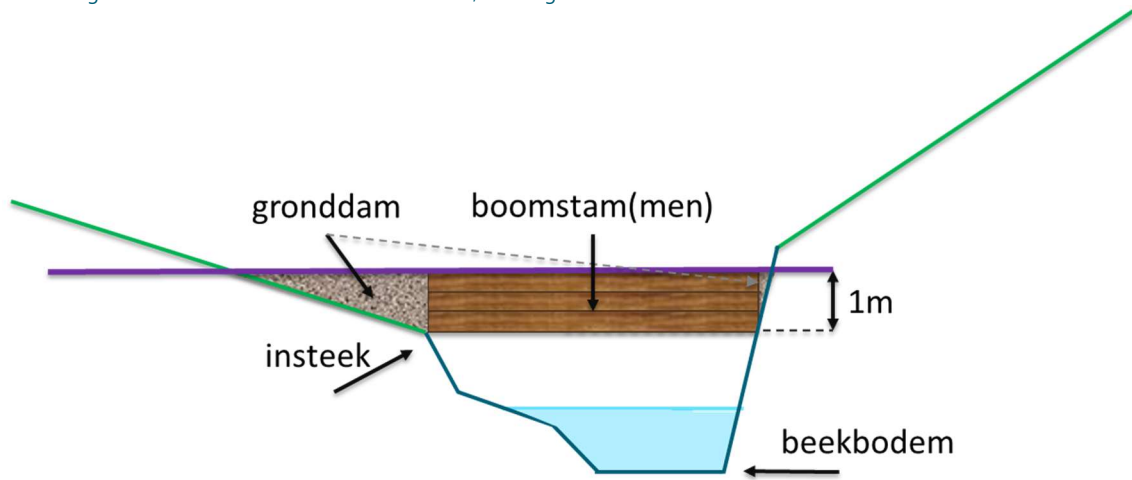
Afbeelding 3.7 Locaties van geselecteerde checkdams die zijn beschouwd in deze modelstudie



Schematisatie

Elke checkdam is in het 1D model opgebouwd uit een stuw in combinatie met een brug (compound structure). Met de stuw is de blokkade door de boomstammen geschematiseerd, met de brug de doorgang onder de boomstammen. In het 2D model is ter plekke van de checkdam nog een hogelijnelement ingetekend, wat de grondnam voorstelt. De opbouw is ter illustratie in Afbeelding 3.8 weergegeven. Om interpolatiefouten en extra complexiteit te voorkomen zijn in overleg met het waterschap alle checkdams verschoven naar het bovenstroomse dwarsprofiel.

De kruinhoogte van de stuw en het hogelijnelement zijn afgeleid op basis van de laagste oever uit het bovenstroomse profiel (insteek). De kruin steekt 1 meter boven deze oever uit. Het profiel van de brug is gelijkgesteld aan het bovenstroomse profiel. Voor de grondnam is per locatie de transect bepaald. Vervolgens zijn de vertices van deze lijnelementen handmatig verschoven voor een logischer verloop in het beekdal en aansluiting op hogere gronden.



De volgende geopackages en layers in de databank voor het model zijn aangepast:

- Kunstwerken:
 - 1D_data/ HyDAMO_2_2_GEU_met_wasmachine_def_aanlevering20230310 - Copy_RHDTV.gpkg;
 - Stuwen: Layers Stuw en Kunstwerkopening;
 - Bruggen: Layer Brug;
- Brugprofielen:
 - 1D_data\04bruggen\01_act\crsdef_huidig.ini.

Daarnaast is er een extra bestand met hogelijnelementen toegevoegd:

- Hogelijnelementen:
 - 2D_data\03_hogelijnelementen\1_act\WST\19_gronddammen.pliz.

RESULTATEN

In dit hoofdstuk zijn de resultaten per maatregel gepresenteerd. Voor elke maatregel is de vervorming van de afvoergolf weergegeven bovenstrooms van Valkenburg aan de hand van een afvoerplot en waterstandsverloop voor het meest maatgevende event. Voor elk event zijn langsdoorsneden gemaakt. Daarnaast is van het meest maatgevende event een inundatieverschilkaart gemaakt. Voor een ondersteunende beschrijving van de (zij)beek wordt verwezen naar de watersysteemanalyse van de Geul [ref. 4].

4.1 Maatregel 17: verondieping beek

In deze paragraaf zijn de resultaten van maatregel 17 beschreven. De grootste veranderingen worden verwacht voor de T2 situatie, omdat dit in de referentiesituatie een bankfull situatie is met niet of nauwelijks inundaties in het beekdal. De T2 is als maatgevend beschouwd uitgaande van de resultaten en conform verwachting.

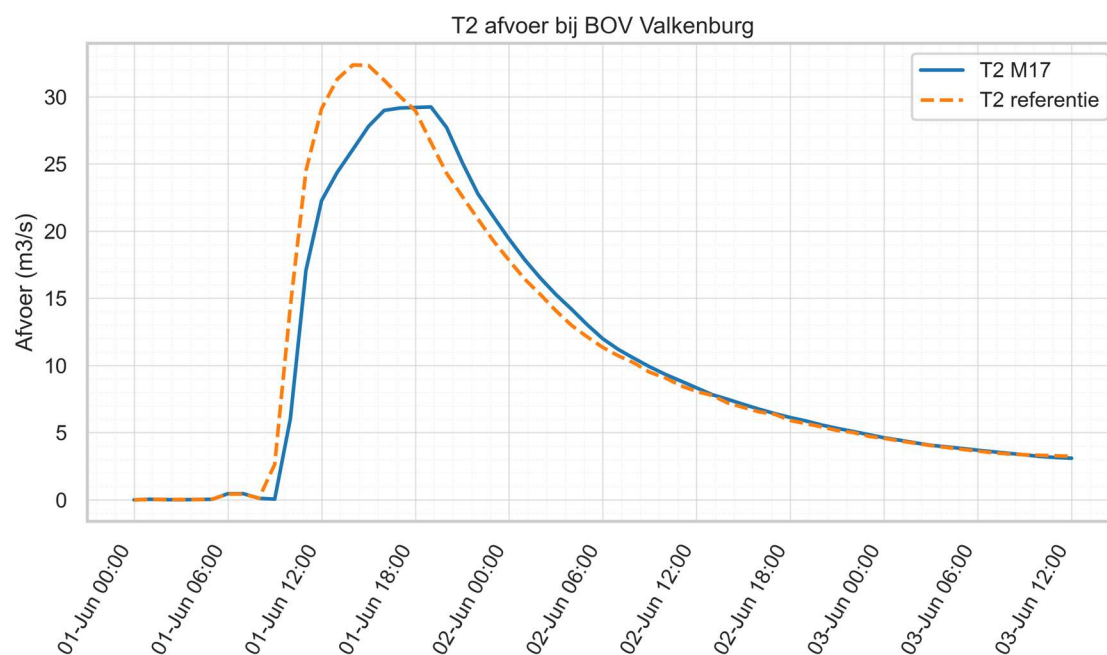
Afvoer

In Afbeelding 4.1 en Afbeelding 4.2 is het verloop van de afvoergolf bovenstrooms van Valkenburg weergegeven voor de referentiesituatie (oranje) en de situatie inclusief verruwing van het beekdal tijdens een T2 event. De verschuiving van de afvoerpiek is conform verwachting. De piek neemt af en is vertraagd. Naar rato is de afname en verschuiving van de afvoerpiek nabij Valkenburg het grootste bij het T2 event. De piekafvoer neemt met circa 5 m³/s af. In bijlage I is het verloop van de afvoergolf bovenstrooms van Valkenburg weergegeven voor de andere events. Het absolute verschil in de piekafvoer is voor elk event aangegeven in Tabel 4.1.

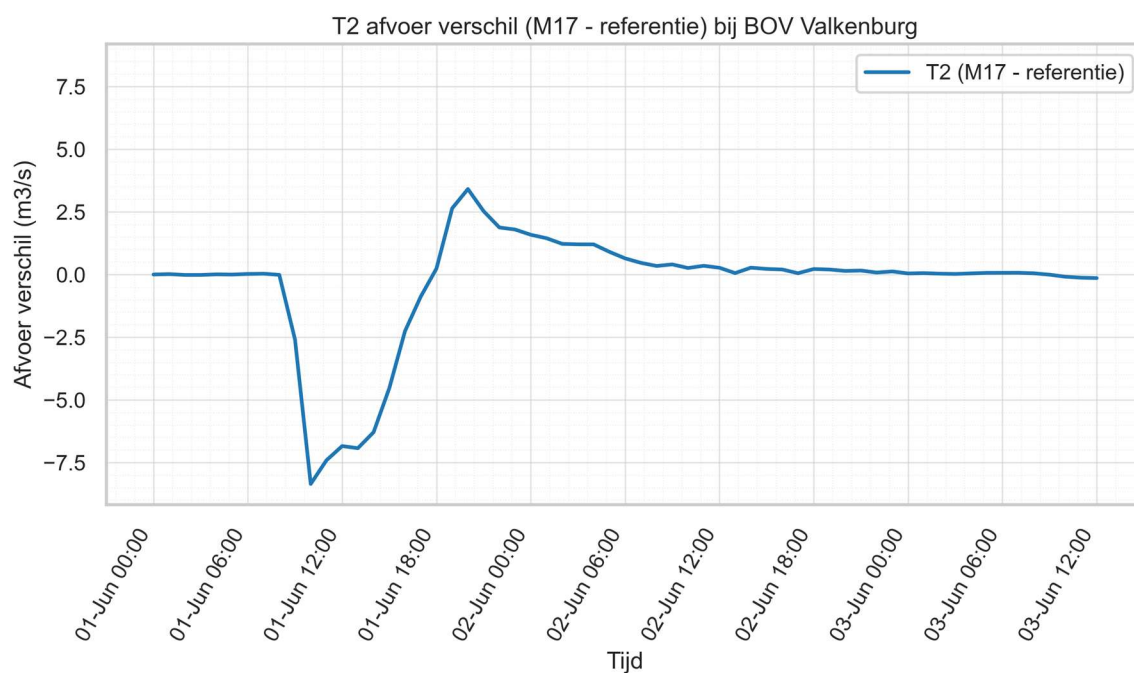
Tabel 4.1 Piekafvoer bovenstrooms Valkenburg voor verschillende events, maatregel 17

Event	Piekafvoer referentie m ³ /s	Piekafvoer maatregel m ³ /s	Vershil maatregel - ref m ³ /s
T2	32,4	29,2	-3,2
T10	53,5	51,0	-2,5
T25	65,1	63,7	-1,4
T100	100,3	98,4	-1,9

Afbeelding 4.1 Afvoeroverloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel 17, event: T2



Afbeelding 4.2 Verschilplot afvoeroverloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel17, event: T2



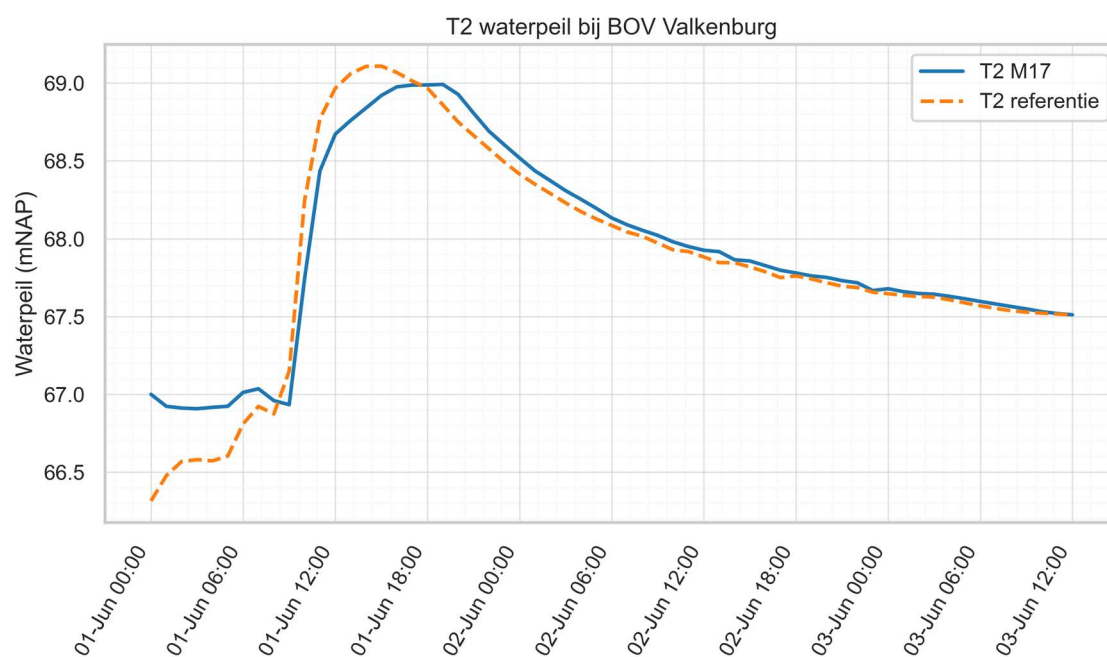
Waterstandsverloop

In Afbeelding 4.3 en Afbeelding 4.4 is het waterstandsverloop en het waterstandsverschil ten opzichte van de referentiesituatie weergegeven bovenstrooms van Valkenburg. Hier is een vergelijkbare verschuiving zichtbaar als de afvoer. De piekwaterstand neemt af met circa 0,1 m. In bijlage II is het waterstandsverloop bovenstrooms van Valkenburg weergegeven voor de andere events. Het absolute verschil in de piekafvoer is voor elk event aangegeven in Tabel 4.2.

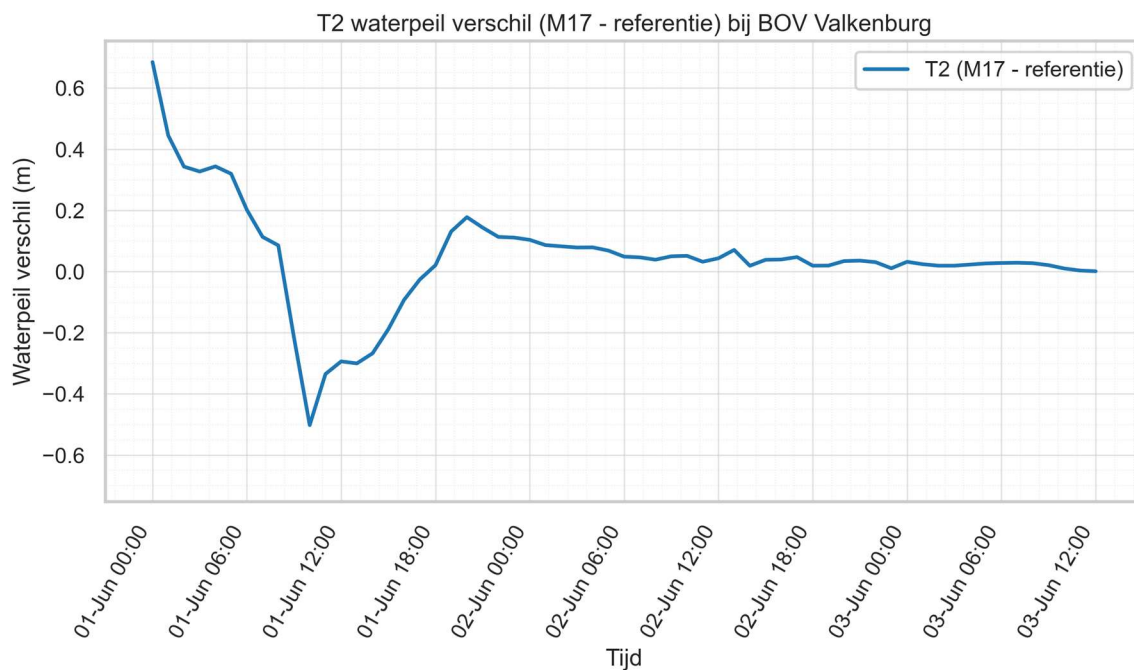
Tabel 4.2 Piekwaterstand bovenstrooms Valkenburg voor verschillende events, maatregel 17.

Event	Piekwaterstand referentie m NAP	Piekwaterstand maatregel m NAP	Vershil maatregel - ref m
T2	69,11	68,99	-0,12
T10	69,85	69,79	-0,06
T25	70,19	70,17	-0,02
T100	70,54	70,54	0,00

Afbeelding 4.3 Waterstandverloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel 17, event: T2



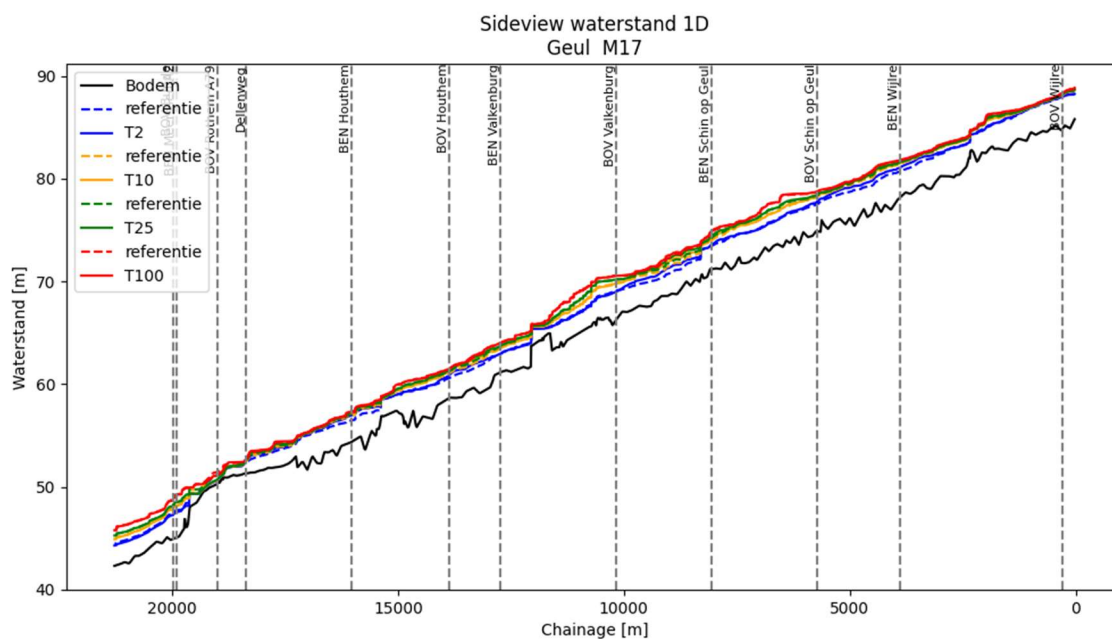
Afbeelding 4.4 Verschilplot waterstandsverloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel 17, event: T2



Langsdoorsnede

In Afbeelding 4.5 is een langsdoorsnede van de maximale waterstand in de Geul weergegeven. De onderlinge waterstandsverschillen zijn lastig te zien, omdat dit samen met het verhang in dit gebied te gedetailleerd is om weer te geven.

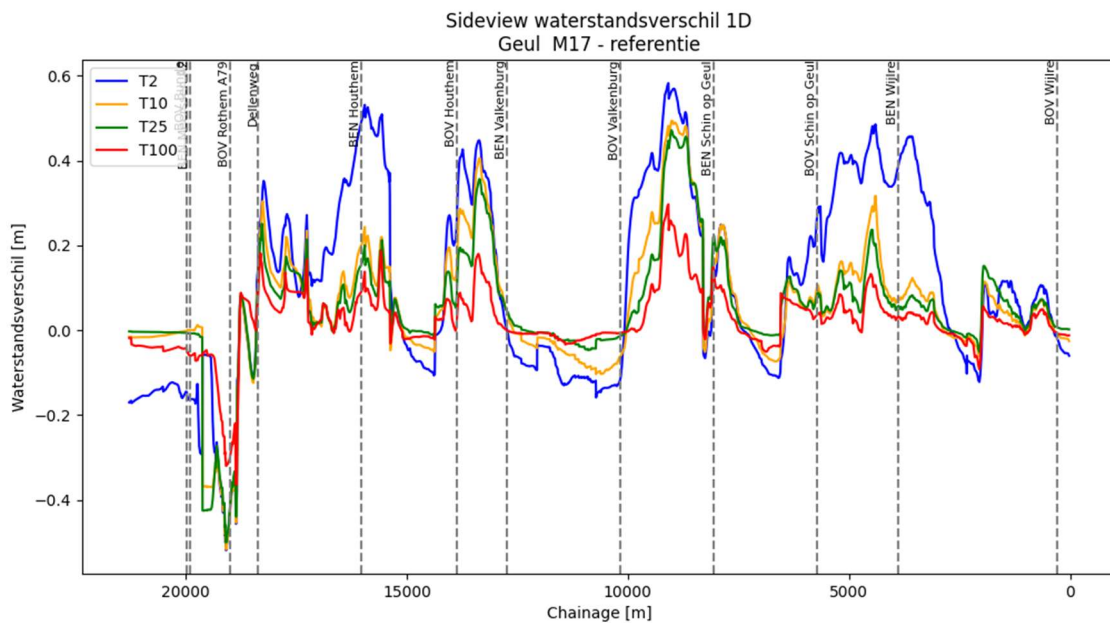
Afbeelding 4.5 Langsdoorsnede van de maximale waterstand in de Geul van Bunde tot en met Wijlre voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood), maatregel 17 en referentie



Daarom zijn hieronder de waterstandsverschillen ten opzichte van de referentie getoond voor de verschillende trajecten (Geul, Eyserbeek, Selzerbeek, Geul BOV en Gulp).

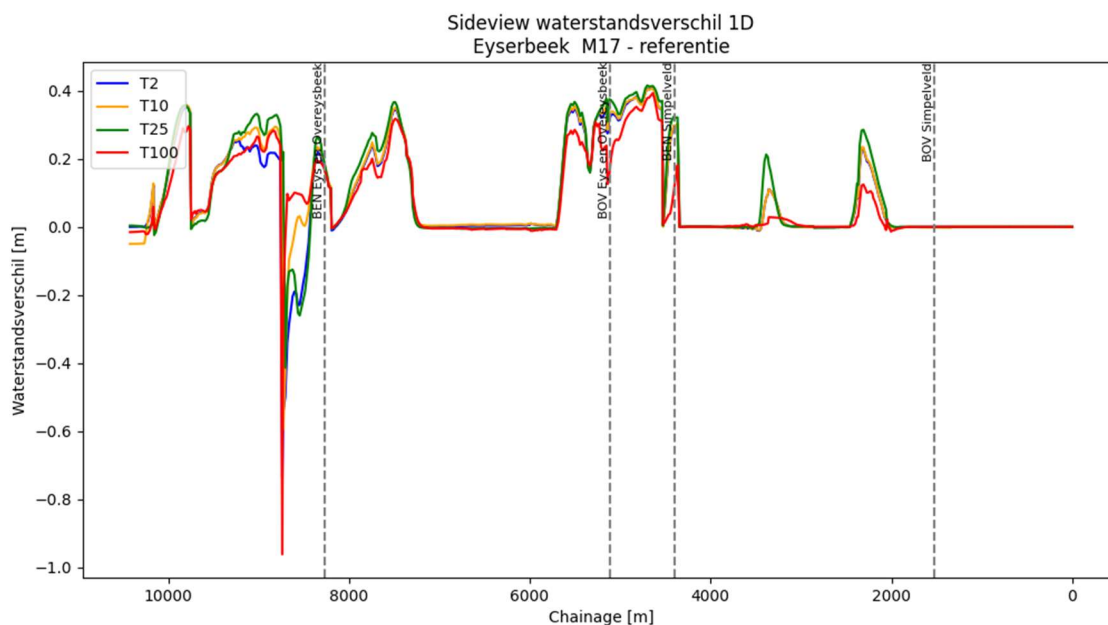
Voor de Geul (Afbeelding 4.6) treden de grootste verschillen op voor het minst extreme event. Dit is conform verwachting. Voor events groter dan T2 treedt de beek al buiten zijn oevers in de referentiesituatie en wordt het beekdal al benut. In de T2 situatie vindt de stijging mogelijk nog deels plaats binnen het beekprofiel. De grootste waterstandstoename (tot circa 60 cm) is zichtbaar op locaties waar de beek is verondiept. Daartussen zijn ook waterstands dalingen zichtbaar (tot circa 10 cm).

Afbeelding 4.6 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 17 en referentie in de Geul van Bunde tot en met Wijlre voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



In de Eyserbeek zijn de minste kunstwerken aangepast. De waterstandverschillen die zichtbaar zijn (Afbeelding 4.7), zijn voornamelijk op locaties waar de beek is verondiept. Het verschil tussen de verschillende events is klein, maar het meeste effect is zichtbaar voor een T25 situatie. Rondom chainage 8700 is een uitschieter naar beneden te zien. Mogelijk wordt deze uitschieter veroorzaakt door een profiel in een zijtak (DP.20210614_02_2) met een zeer lage bodemhoogte. Dit dubieuze profiel is ook al aanwezig in het referentiemodel.

Afbeelding 4.7 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 17 en referentie in de Eyserbeek voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)

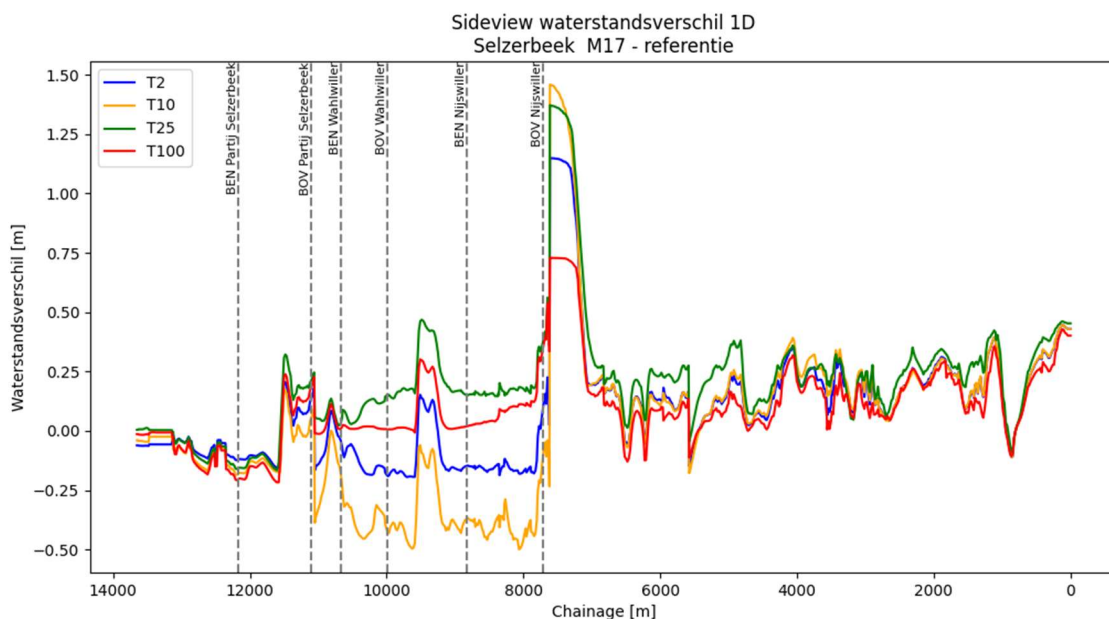


Er is een flinke stijging zichtbaar bovenstrooms van Nijswiller, nabij een aangepaste orifice (S_96185). Ter plekke van de piek in deze waterstandsverschilplot is ook een waterstandssprong te zien in de referentiesommen. Blijkbaar is de afvoercapaciteit door deze orifice beperkt en heeft het een grote invloed op de lokale waterstand (in het model). In de praktijk ligt op deze locatie een gestuurde berging waar een debiet wordt doorgelaten afhankelijk van de waterdruk. Door het verondiepen van de beek en orifice (dus verkleinen diepte) wordt er minder water doorgelaten en werkt de buffer minder effectief.

Benedenstrooms van deze orifice is een waterstandsval te zien.

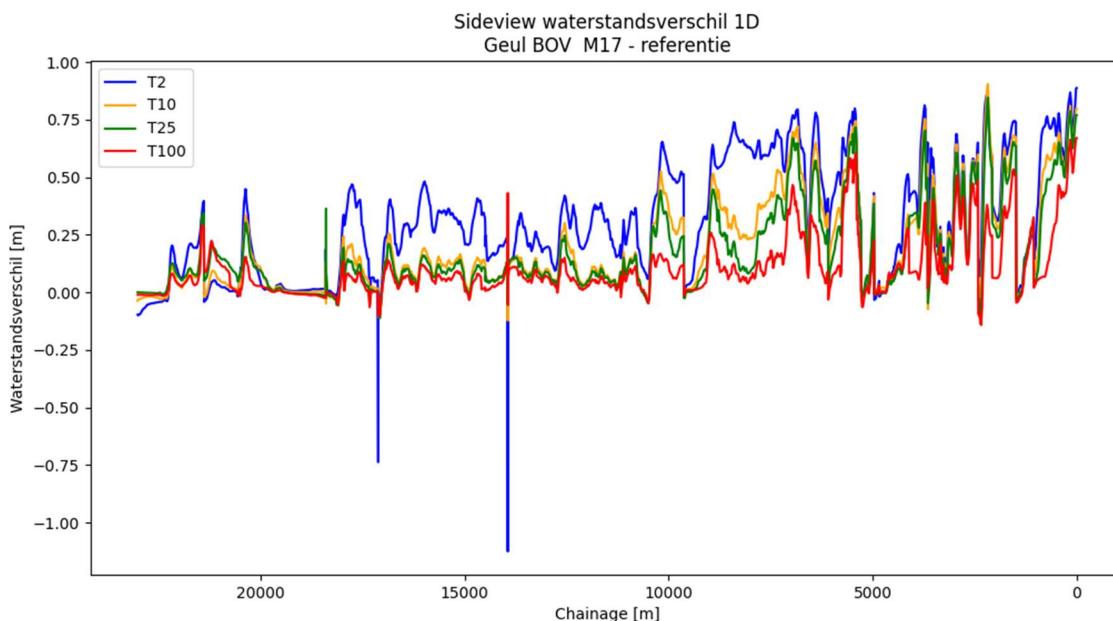
De verondieping van de beek vindt voornamelijk plaats rondom en bovenstrooms van de orifice. In het gehele bovenstroomse tracé is voornamelijk een waterstandsverhoging te zien. De resultaten van de verschillende events liggen vrij dicht bij elkaar. De impact van de maatregel lijkt het grootste voor het T25 event.

Afbeelding 4.8 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 17 en referentie in de Selzerbeek voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



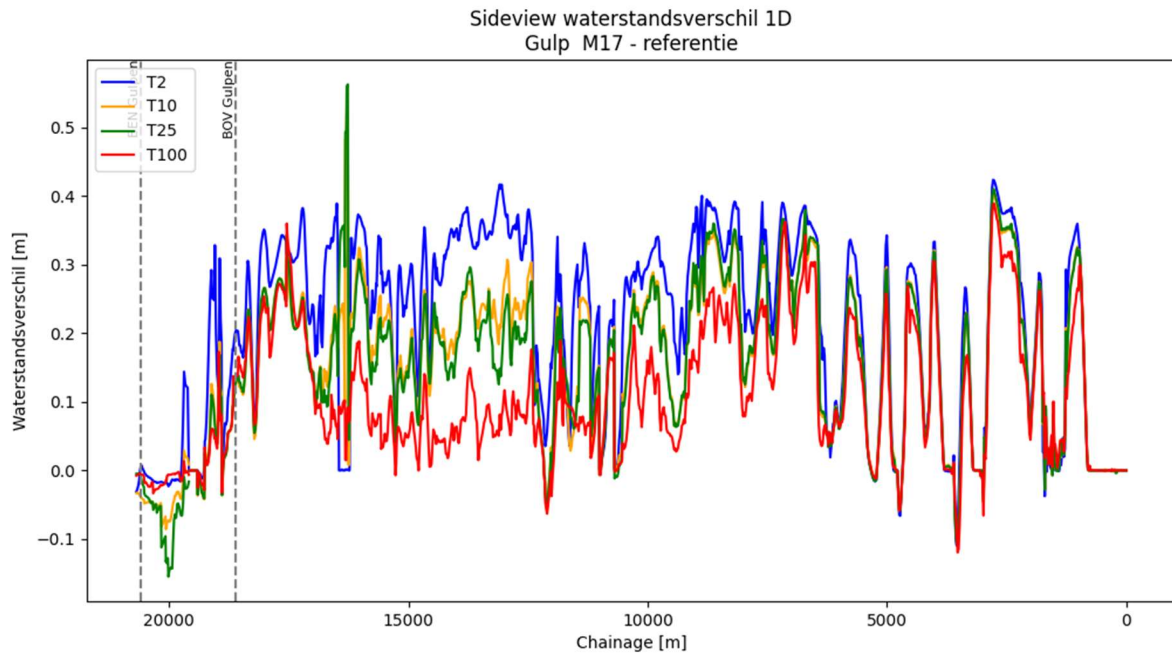
Ook bovenstrooms in de Geul (Afbeelding 4.9) treden de grootste verschillen op bij het minst extreme event. Over het gehele traject worden profielen en kunstwerken aangepast, waardoor er over het hele traject voornamelijk een toename is te zien van de waterstand tot circa 75 cm. Er zijn twee uitschieters te zien. Deze uitschieters liggen bij gestuurde orifices S_96354 en S_96208. Indien het tijdstip waarop de klep verandert, iets wijzigt, dan kan dit lokaal tot een uitschieter leiden.

Afbeelding 4.9 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 17 en referentie in de Geul (bovenstrooms vanaf Wijlre) voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



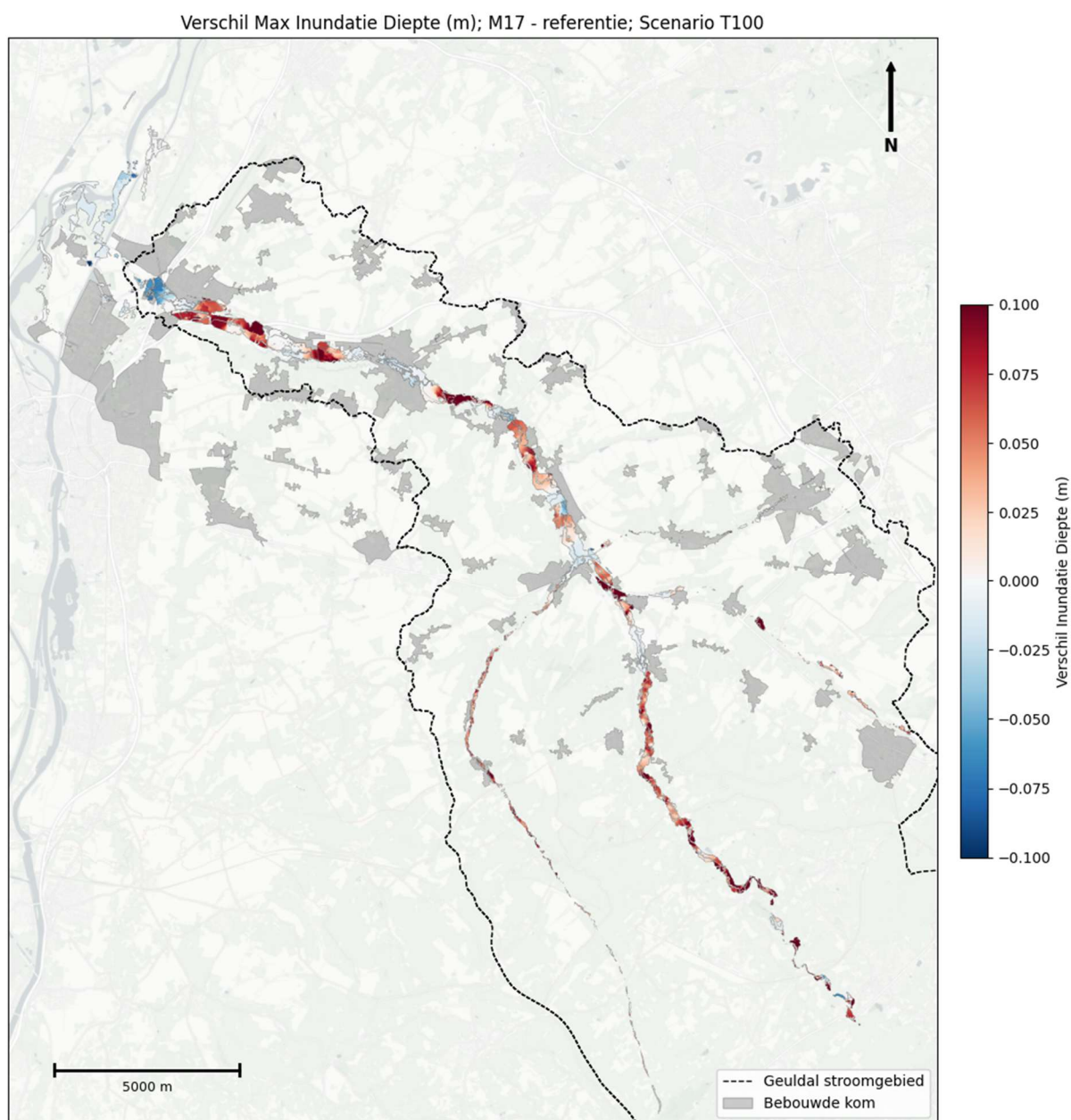
In de Gulp zijn over het algemeen ook de grootste verschillen zichtbaar in de T2 situatie. Over het gehele traject worden profielen en kunstwerken aangepast, waardoor er over het hele traject voornamelijk een toename is te zien van de waterstand tot circa 40 cm.

Afbeelding 4.10 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 17 en referentie in de Gulp voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



Inundatie

In Afbeelding 4.11 en Afbeelding 4.12 zijn de verschillen in inundatie tussen maatregel 17 en de referentiesituatie weergegeven op kaart voor een T2 en T100 situatie. In Afbeelding 4.12 Inundatieverschilkaart, maatregel 17, event: T100



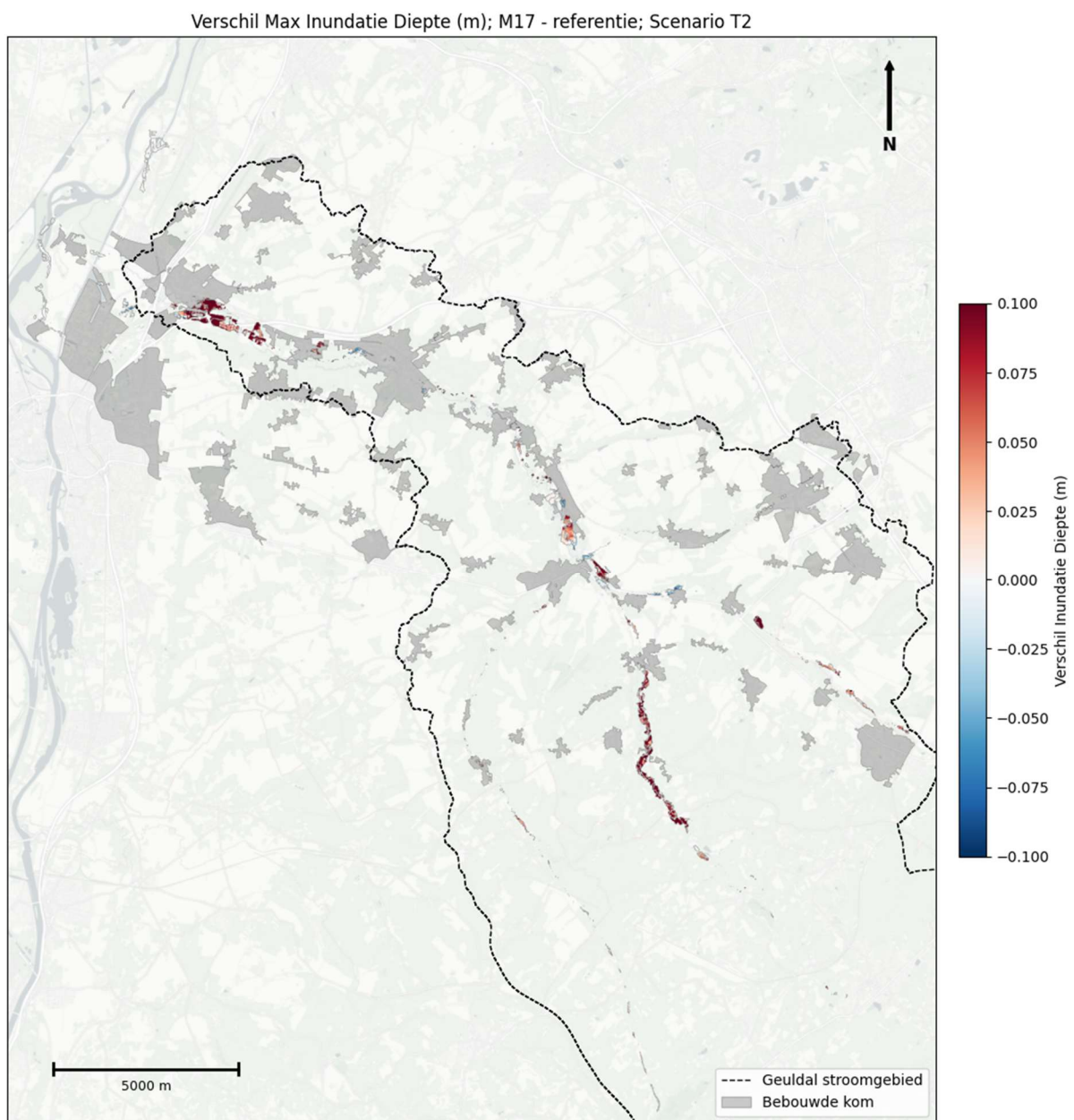
Afbeelding 4.13 en Afbeelding 4.14 is ingezoomd op Meerssen. Afbeeldingen van de overige woonkernen zijn separaat opgeleverd. De interpretatie van de inundatieverschillen behoeft wat extra uitleg voor deze maatregel. Roodachtige kleuren duiden een toename van de waterstand aan en blauwige kleuren een daling. De inundaties (verspreiding) nemen toe voor hogere herhalingstijd. De impact van de maatregel neemt af met hogere herhalingstijd. Dit betekent dat de grootte van de inundatievlekken groter is voor hogere herhalingstijden, maar de toename van de inundatie kleiner en daardoor minder roodkleurig zijn.

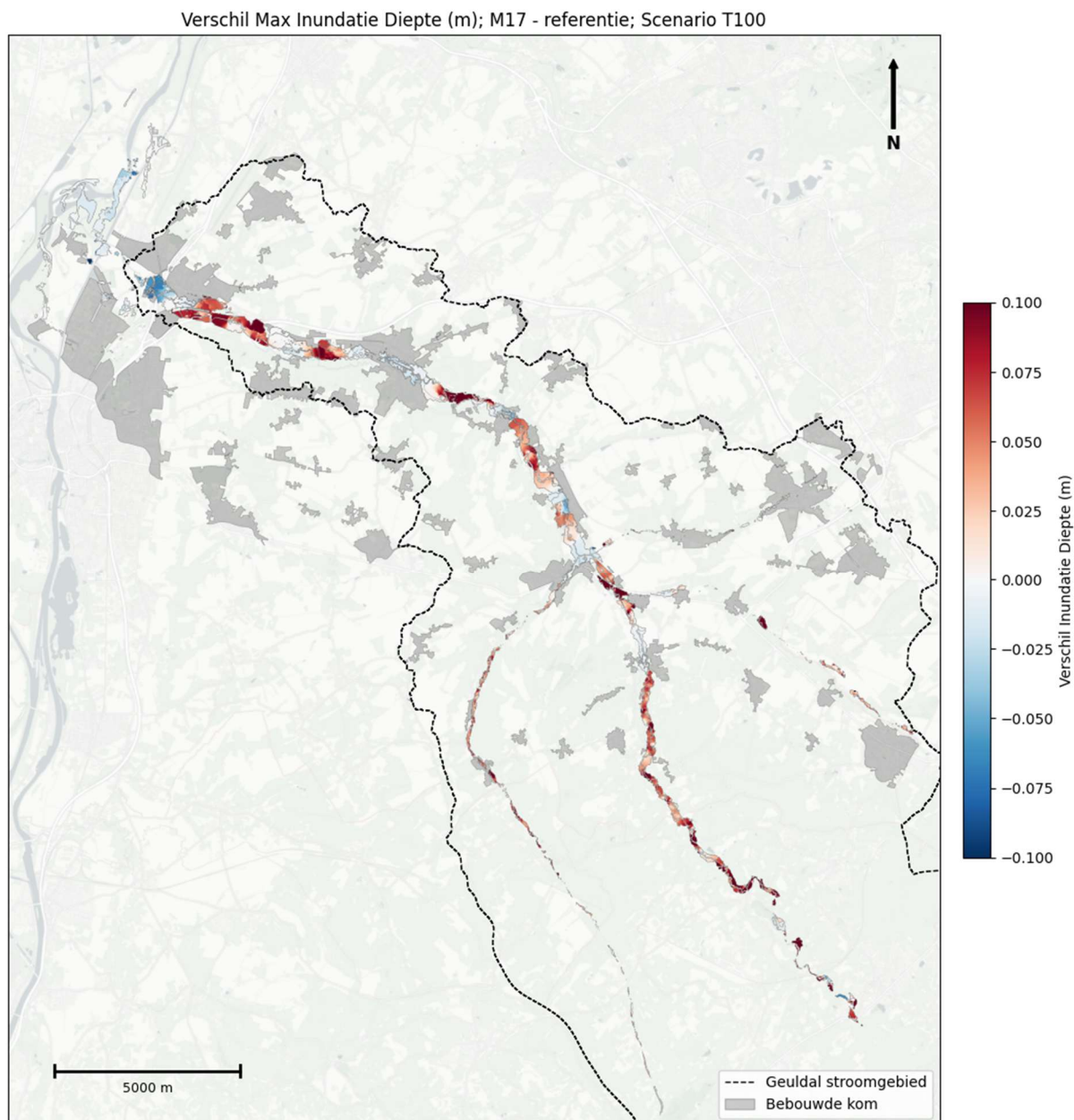
Toename van de waterstand vindt plaats op locaties waar de beek is verondiept. Dalingen zijn zichtbaar benedenstrooms van locaties waar de beekbodem is verhoogd. In de T2 situatie is de maximale toename van de waterstand in het beekdal is tot circa 1 m (bovenstrooms Meerssen, rondom A79). De maximale daling van de waterstand in het beekdal is tot circa 0,15 m (bovenstrooms Partij).

Het resultaat van de T100 situatie illustreert beter het patroon van toenemende waterstanden op locaties van beekverondieping en waterstandsdeling benedenstrooms van deze verondieping.

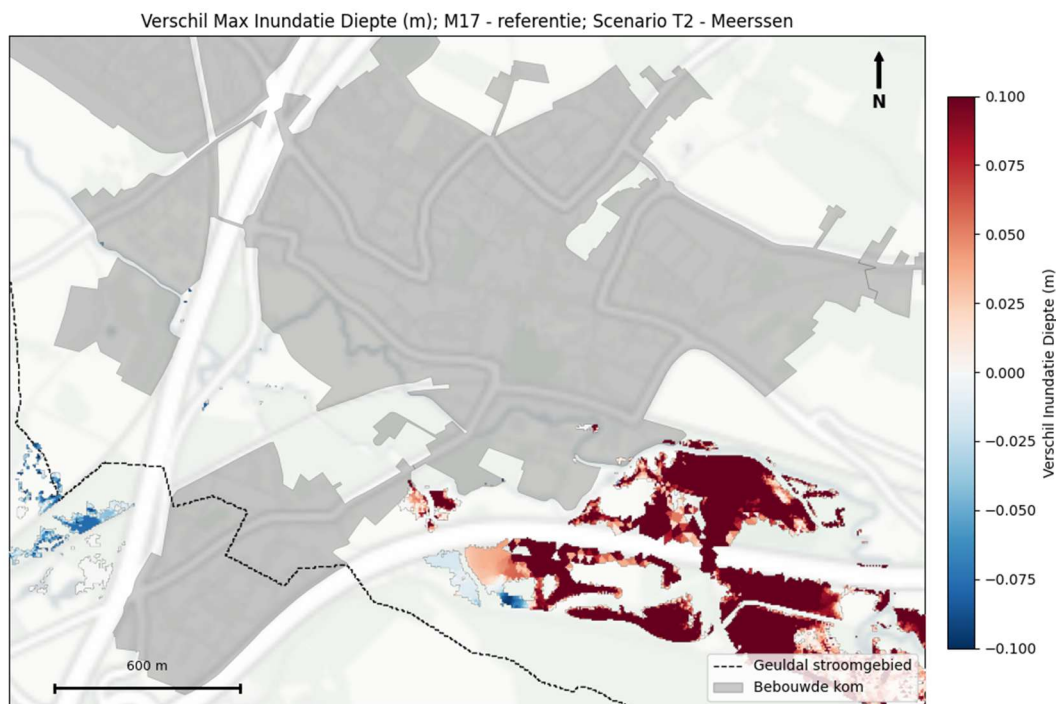
In de Eyserbeek zijn geen verschillen te zien in de inundatiepatronen, omdat de beek vrijwel niet buiten zijn oevers treedt.

Afbeelding 4.11 Inundatieverschilkaart, maatregel 17, event: T2

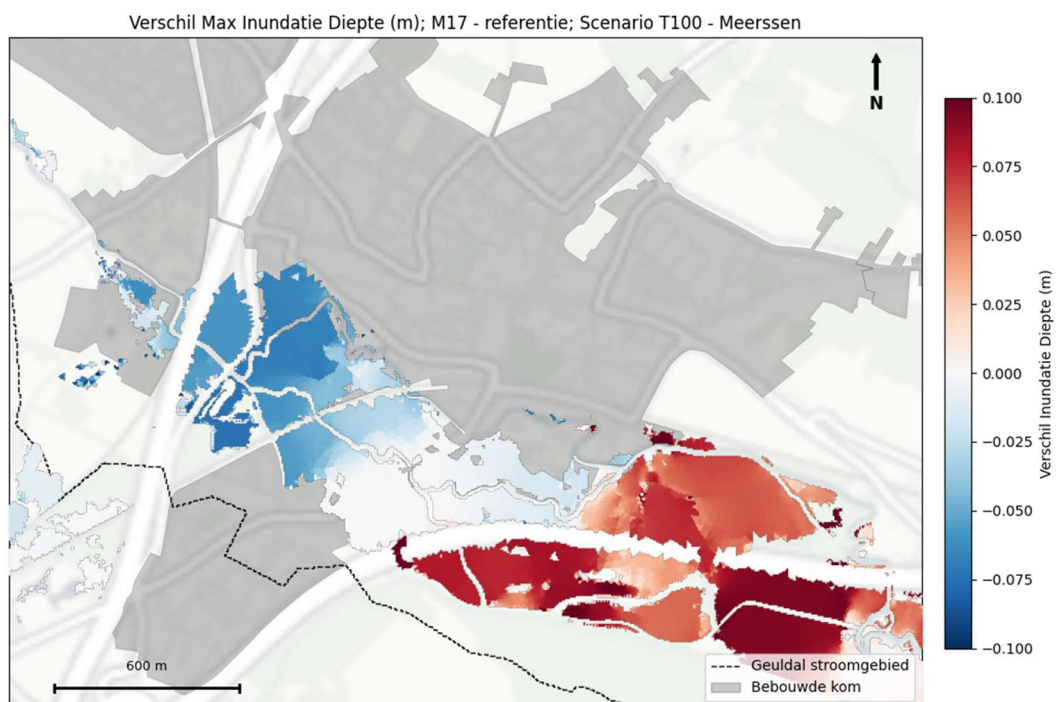




Afbeelding 4.13 Inundatieverschilkaart ingezoomd op Meerssen, maatregel 17, event: T2



Afbeelding 4.14 Inundatieverschilkaart ingezoomd op Meerssen, maatregel 17, event: T100.



Conclusies

Deze maatregel heeft over het algemeen meer impact bij minder extreme events. De grootste waterstandsverhogingen en -dalingen zijn over het algemeen zichtbaar voor de T2 situatie. Op veel locaties vallen de veranderingen dan binnen het beekprofiel. Er is benedenstrooms bij Valkenburg een duidelijke verlaging van de afvoerpiek ($-3,2 \text{ m}^3/\text{s}$ voor T2) en vertraging van de afvoergolf zichtbaar. Dit is conform verwachting. De berging in het beekprofiel is minder.

Bij de hoofdbeek is een duidelijk patroon zichtbaar, waarbij de waterstanden toenemen op locaties waar de beek is verondiept. Benedenstrooms hiervan is een kleine waterstandsdeling waar te nemen. De waterstanden in het beekprofiel lopen op tot circa 1 m, de waterstanden in het beekdal zelf nemen maximaal met 0,7 m toe. Lokaal zijn er ook waterstandsdelingen tot 0,15 m zichtbaar. Over het algemeen lijkt de negatieve impact groter dan de positieve impact. De minste effecten zijn zichtbaar in de Eyerbeek, hier zijn de minste aanpassingen voorzien en blijft de beek zo goed als binnen zijn oevers.

Bij hogere herhalingstijden zijn de effecten qua inundatiedieptes minder extreem, maar strekken zich uit over een groter oppervlak in het beekdal, omdat er in absolute zin meer inundatie optreedt.

De waterstandsverhogingen treden voornamelijk op in gebieden met weinig gebouwen, maar breiden zich in enkele gevallen minimaal uit in bebouwd gebied, bijvoorbeeld rondom enkele woningen in het zuiden van Meerssen, camping't Geuldal, Oud-Lemiers. Voor hogere herhalingstijden ook rondom enkele woningen in het zuidwesten van Partij en enkele woningen langs de oevers van de Gulp tussen Slenaken en Gulpen, Waterstandsdelingen zijn zichtbaar in voornamelijk Meerssen, Valkenburg, het beekdal bij Wijlre en ten noorden van Gulpen. De waterstandsverhogingen treden over het algemeen altijd op locaties waar in de referentiesituatie ook al inundaties optreden, de uitbreiding is zeer beperkt.

4.2 Maatregel 18: verruwing beekdal

In deze paragraaf zijn de resultaten van maatregel 18 beschreven. De grootste veranderingen worden verwacht voor het meest extreme event omdat hier uitgebreidere inundaties in het beekdal plaatsvinden. De T100 situatie is als maatgevend beschouwd uitgaande van de resultaten, dit is ook conform verwachting.

4.2.1 Manning $0,07 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$

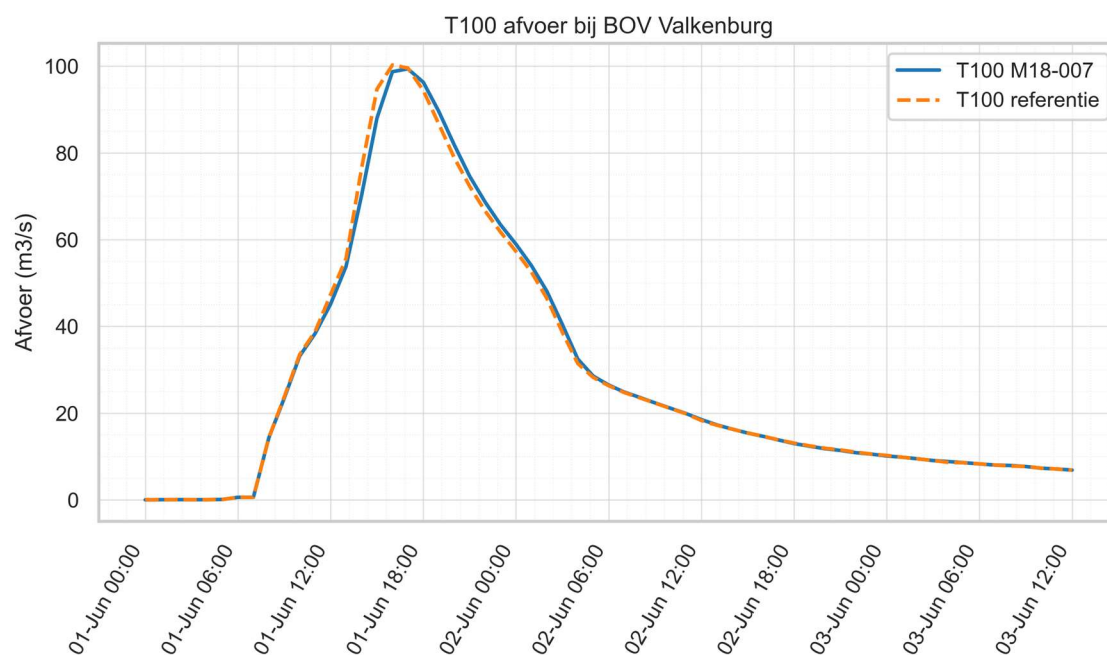
Afvoer

In Afbeelding 4.15 en Afbeelding 4.16 is het verloop van de afvoergolf bovenstrooms van Valkenburg weergegeven voor de referentiesituatie (oranje) en de situatie inclusief verruwing van het beekdal tijdens een T100 event. De maximale afvoerpiek nabij Valkenburg neemt beperkt af, met circa $1 \text{ m}^3/\text{s}$. De verschuivingen van de afvoerpiek zijn wel in de richting die verwacht kan worden. In bijlage I is het verloop van de afvoergolf bovenstrooms van Valkenburg weergegeven voor de andere events. Het absolute verschil in de piekafvoer is voor elk event aangegeven in Tabel 4.3.

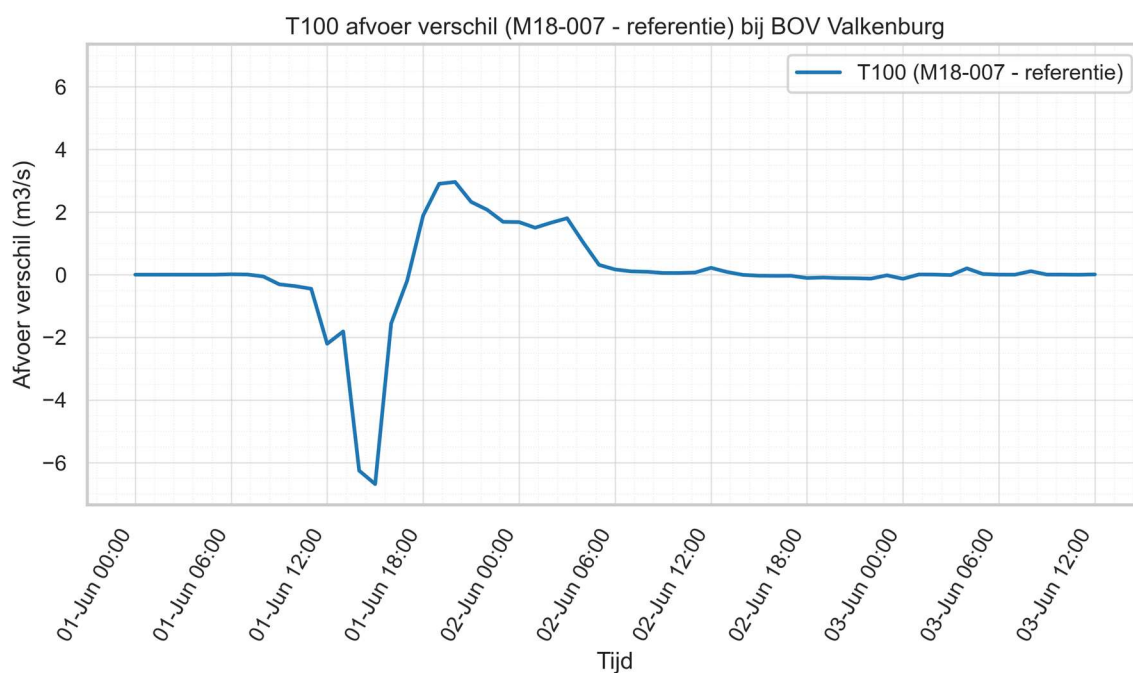
Tabel 4.3 Piekafvoer bovenstrooms Valkenburg voor verschillende events, maatregel 18 (ruwheid: $0,07 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$).

Event	Piekafvoer referentie m^3/s	Piekafvoer maatregel m^3/s	Vershil maatregel - ref m^3/s
T2	32,4	32,3	-0,1
T10	53,5	53,3	-0,2
T25	65,1	64,5	-0,6
T100	100,3	99,4	-0,9

Afbeelding 4.15 Afvoer verloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel 18 (ruwheid: $0,07 \text{ s/m}^{1/3}$), event: T100



Afbeelding 4.16 Verschilplot afvoer verloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel 18 (ruwheid: $0,07 \text{ s/m}^{1/3}$), event: T100



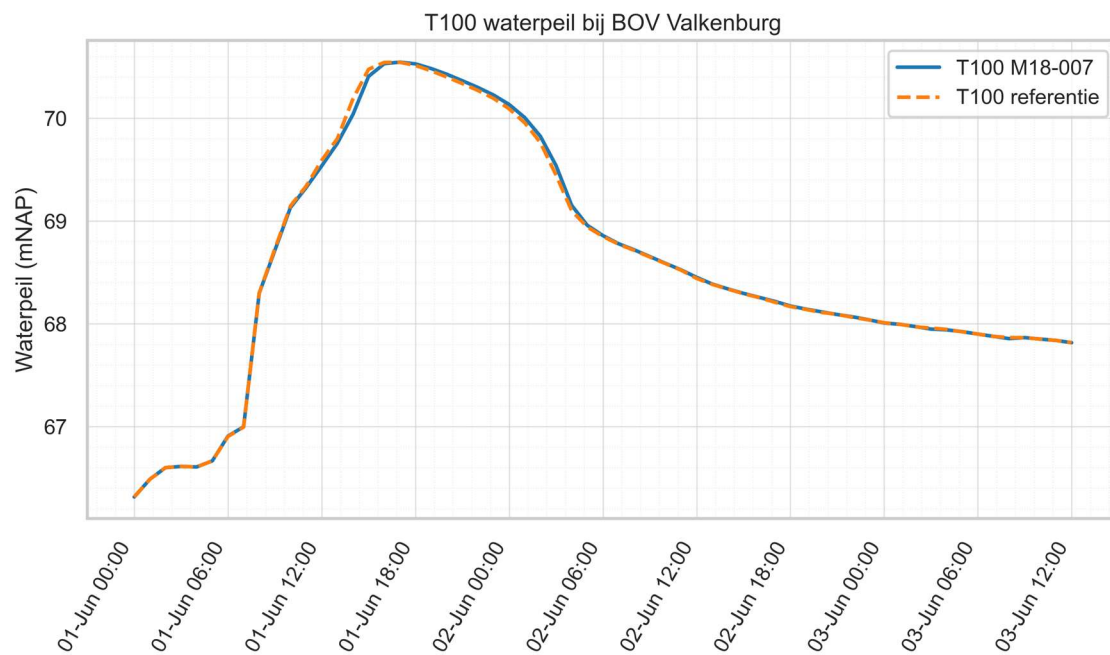
Waterstandsverloop

In Afbeelding 4.17 en Afbeelding 4.18 is het waterstandsverloop en het waterstandsverschil ten opzichte van de referentiesituatie weergegeven bovenstrooms van Valkenburg. Hier is een vergelijkbare verschuiving zichtbaar als de afvoer. In bijlage II is het verloop van de afvoergolf bovenstrooms van Valkenburg weergegeven voor de andere events. Het absolute verschil in de piekafvoer is voor elk event aangegeven in Tabel 4.4.

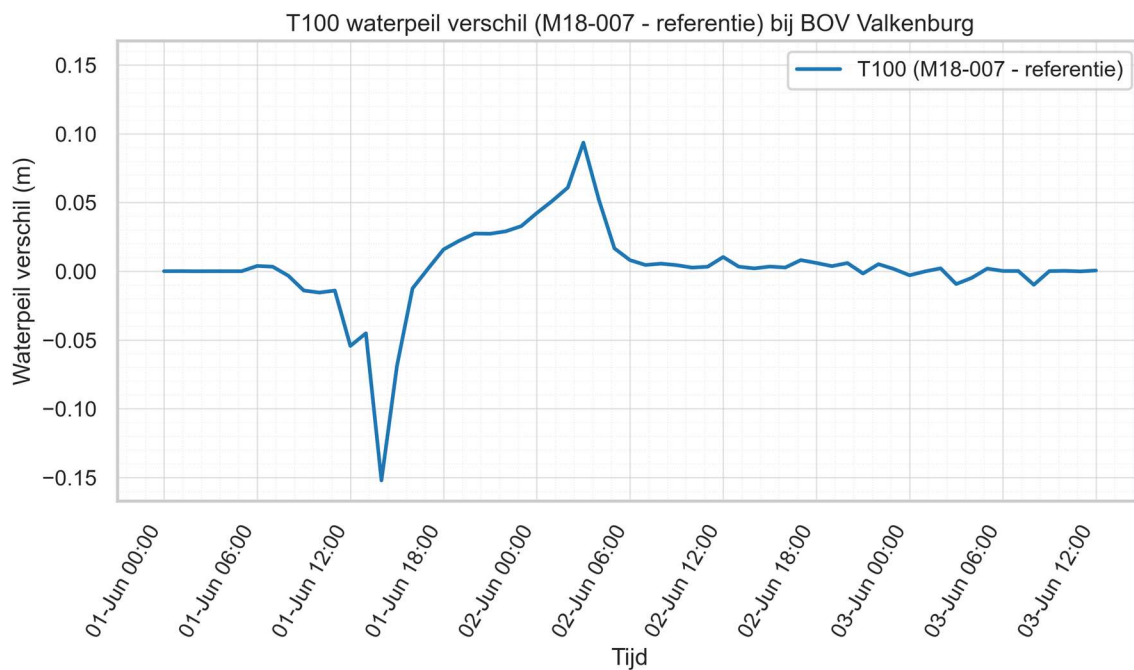
Tabel 4.4 Piekwaterstand bovenstrooms Valkenburg voor verschillende events, maatregel 18 (ruwheid: $0,07 \text{ s/m}^{1/3}$).

Event	Piekwaterstand referentie m NAP	Piekwaterstand maatregel m NAP	Vershil maatregel - ref m
T2	69,11	69,11	0
T10	69,85	69,83	-0,02
T25	70,19	70,18	-0,01
T100	70,54	70,54	0

Afbeelding 4.17 Waterstandverloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel 18 (ruwheid: $0,07 \text{ s/m}^{1/3}$), event: T100



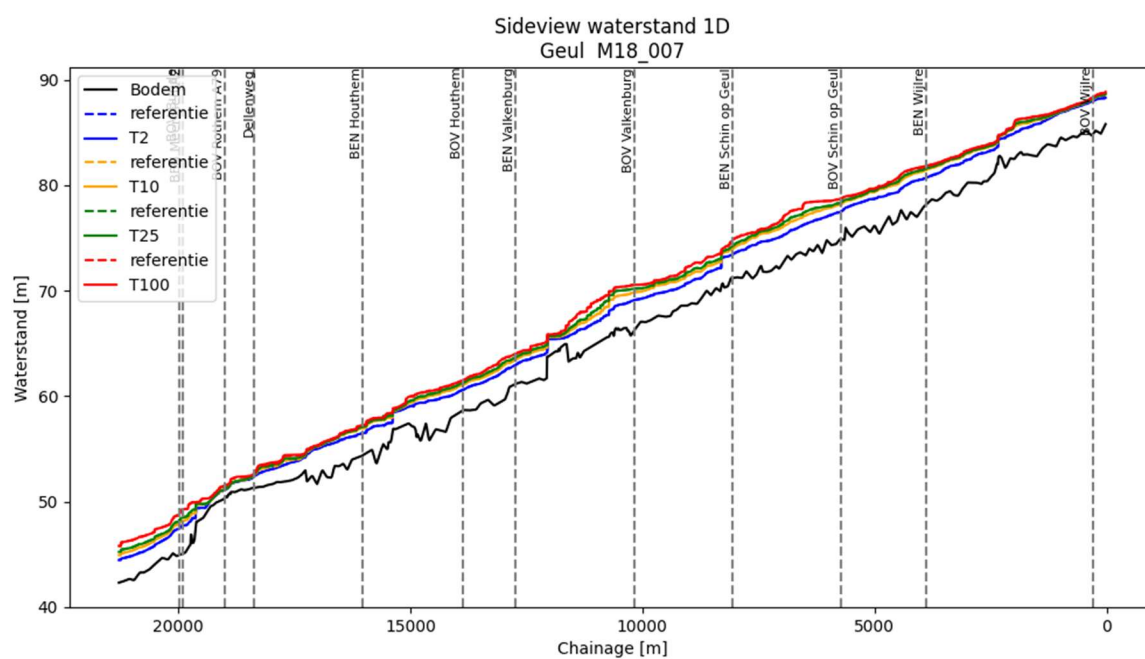
Afbeelding 4.18 Verschilplot waterstandsverloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel 18 (ruwheid: $0,07 \text{ s/m}^{1/3}$), event: T100



Langsdoorsnede

In Afbeelding 4.19 is een langsdoorsnede van de maximale waterstand in de Geul weergegeven. De onderlinge waterstandsverschillen zijn lastig te zien, omdat dit samen met het verhang in dit gebied te gedetailleerd is om weer te geven.

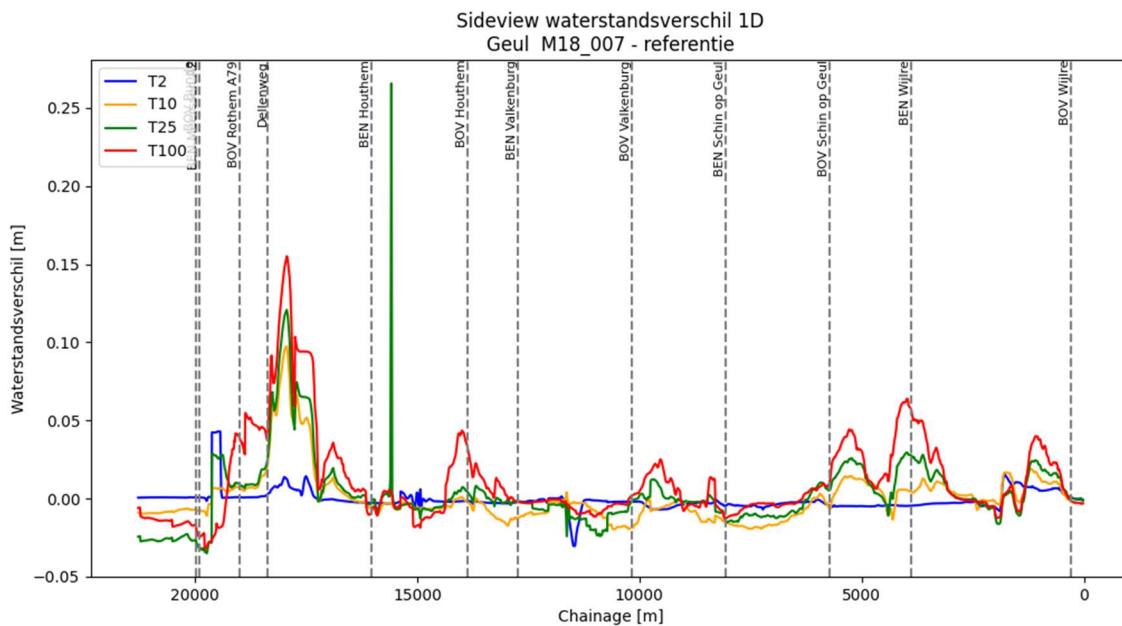
Afbeelding 4.19 Langsdoorsnede van de maximale waterstand in de Geul van Bunde tot en met Wijlre voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood), maatregel 18 (ruwheid: $0,07 \text{ s/m}^{1/3}$) en referentie



Daarom zijn hieronder de waterstandsverschillen ten opzichte van de referentie getoond voor de verschillende trajecten (Geul, Eyserbeek, Selzerbeek, Geul BOV en Gulp).

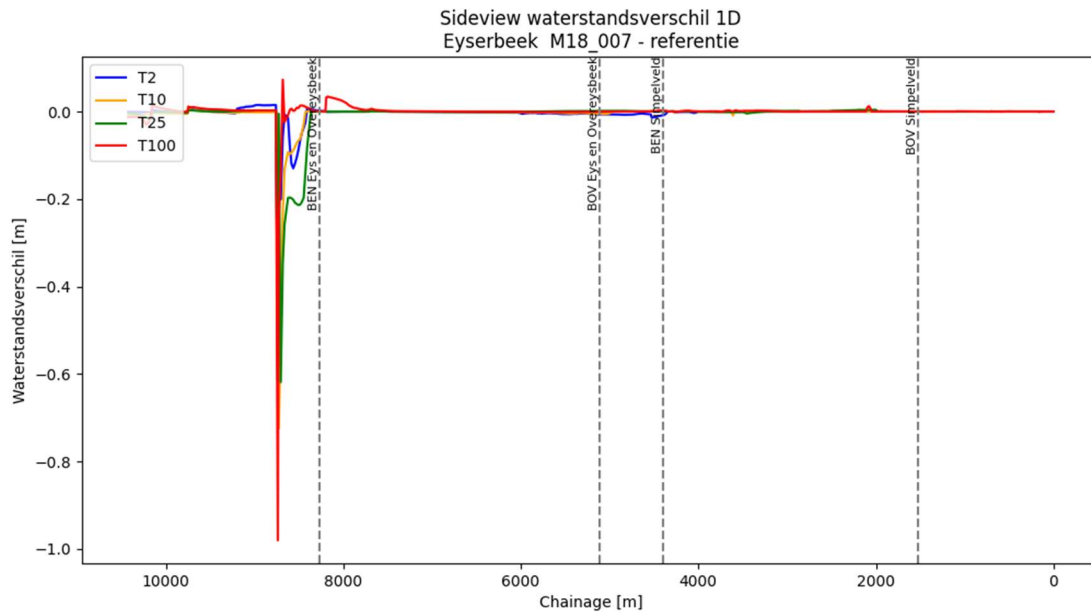
In de Geul (Afbeelding 4.20) zijn weinig verandering zichtbaar voor het T2 event. Het effect wordt groter naarmate de herhalingsjijd toeneemt. Dit is conform verwachting. De verruwing is toegepast in het beekdal. Voor de T2 situatie treedt de beek niet of nauwelijks buiten zijn oevers en heeft de maatregel geen effect. Bij de hogere herhalingsjiden neemt de inundatie toe en daarmee ook de impact van de maatregel. De maximale stijging van de waterstand is circa 0,15 m tussen de Dellenweg (Geulke) en A79. Benedenstrooms van beekdalverruwingen zijn kleine waterstands dalingen zichtbaar van maximaal enkele centimeters.

Afbeelding 4.20 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 18 (ruwheid: $0,07 \text{ s/m}^{1/3}$) en referentie in de Geul van Bunde tot en met Wijlre voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



In de Eyserbeek (Afbeelding 4.21) zijn nauwelijks verschillen zichtbaar ten opzichte van de referentiesituatie. In de Eyserbeek zijn ook de minste aanpassingen voorzien. Daarnaast treden er in de referentiesituatie rondom de Eyserbeek weinig inundaties op (ook in de T100 situatie), waardoor de maatregel weinig impact heeft.

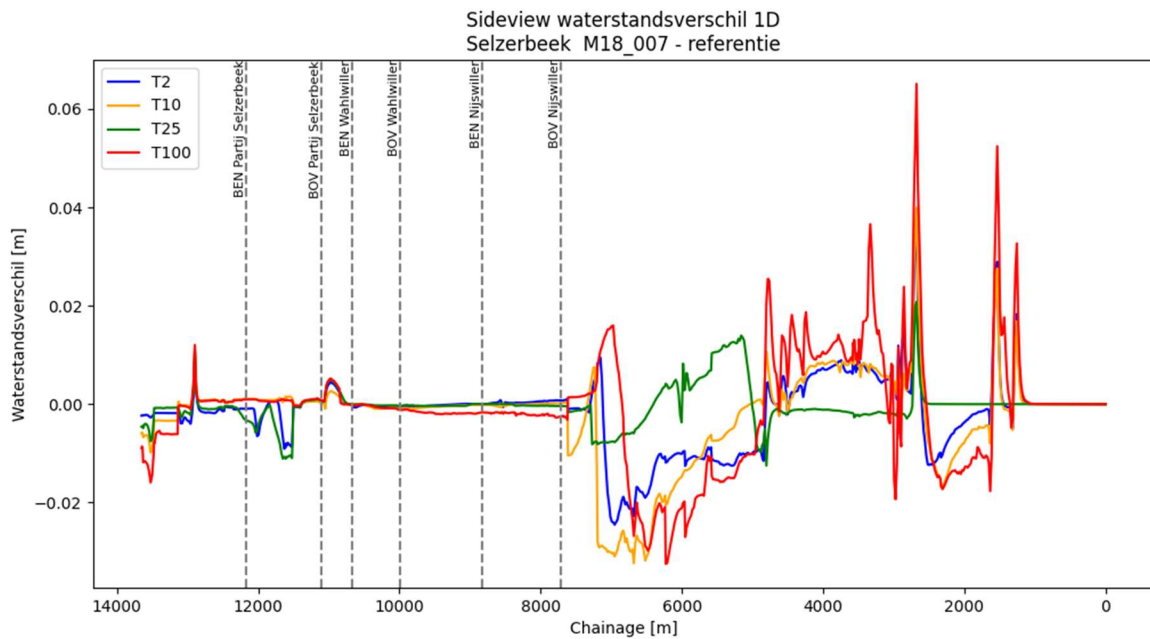
Afbeelding 4.21 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 18 (ruwheid: $0,07 \text{ s/m}^{1/3}$) en referentie in de Eyserbeek voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



Ook bij de Selzerbeek (Afbeelding 4.22) is de impact van de maatregel beperkt, omdat de inundaties rondom de beek enigszins beperkt zijn. Met name in het bovenstroomse gedeelte waar de beek net buiten zijn oever treedt, zijn ook verschillen te observeren door toedoen van de verruwing van het beekdal (tot maximaal 6 cm). Bovenstrooms van Nijswiller is er verruwing beoogd op een lang tracé door het beekdal. Helemaal bovenstrooms wordt hierdoor een toename van de waterstand veroorzaakt. Net bovenstrooms van Nijswiller is ondanks de verruwing een waterstandsdeling zichtbaar, omdat de afvoergolf al verder bovenstrooms is vertraagd.

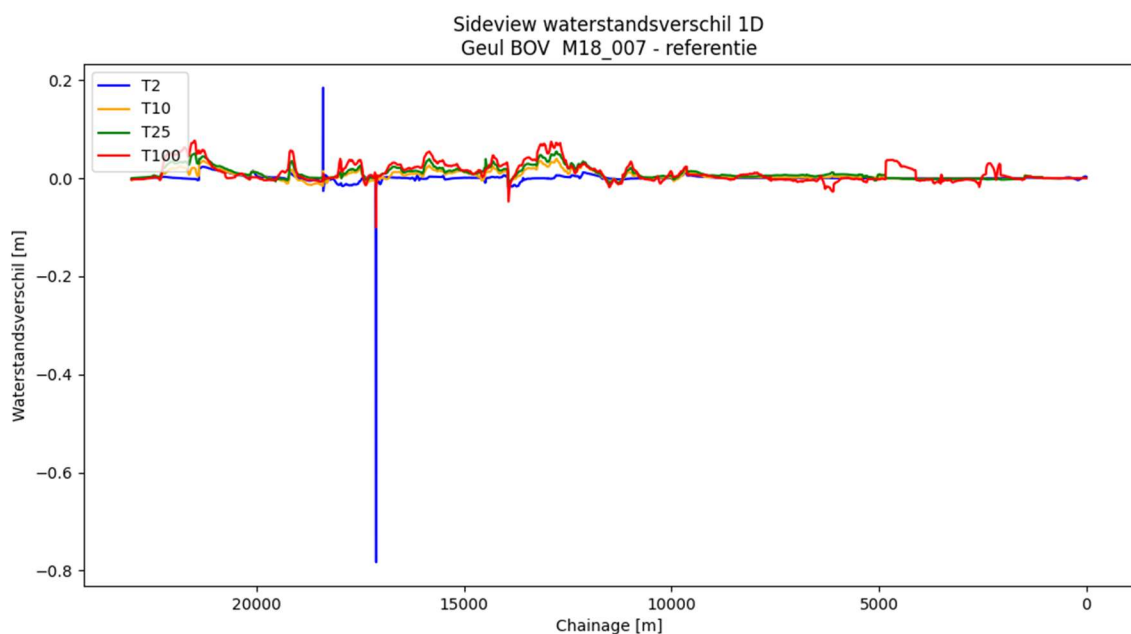
Wat opvalt is dat op de locatie van de waterstandsdeling van events T2, T10 en T100, een waterstandsverhoging op treedt in het T25 scenario. Dit is mogelijk een effect van de vorm van de bui (2 pieken in T25 event). Bovenstrooms is de afvoergolf nog minder vervormd door het beekdal.

Afbeelding 4.22 Langsdoornede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 18 (ruwheid: $0,07 \text{ s/m}^{1/3}$) en referentie in de Selzerbeek voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



Het beekdal langs de Geul (BOV) wordt op veel locaties verruwd. Vooral in de benedenstroomse helft van de beek wordt er verruwd over vrijwel de gehele breedte van het beekdal. In de benedenstroomse helft zijn dan ook de grootste stijgingen zichtbaar (zie Afbeelding 4.23), tot circa 10 cm. Bij grotere herhalingstijden is het effect van de maatregel groter.

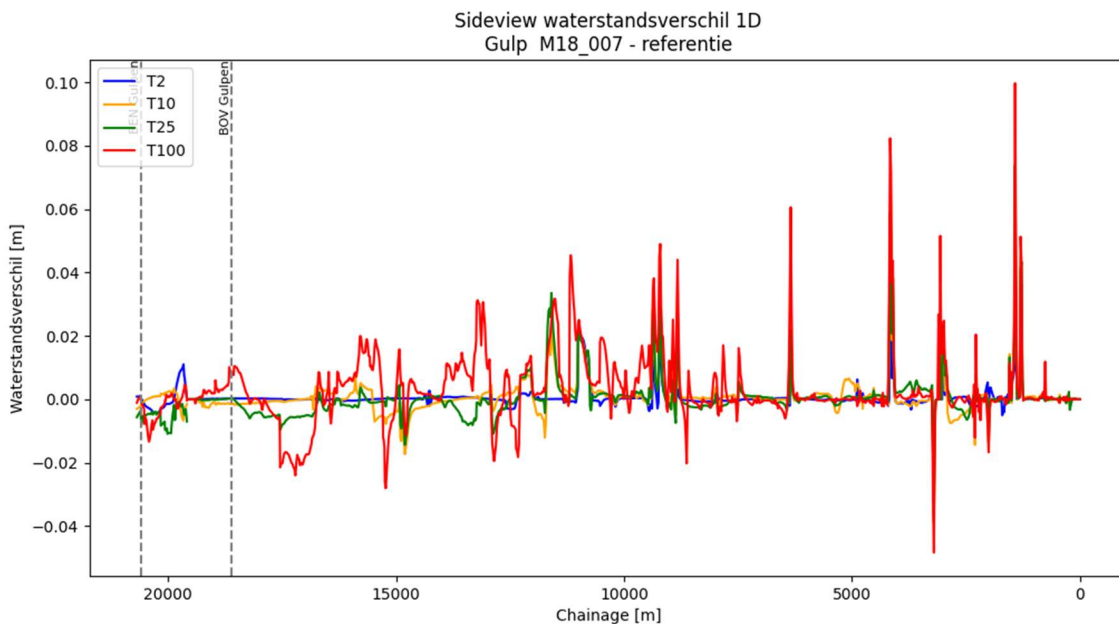
Afbeelding 4.23 Langsdoornede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 18 (ruwheid: $0,07 \text{ s/m}^{1/3}$) en referentie in de Geul (bovenstrooms vanaf Wijlre) voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



Vrijwel over het gehele tracé wordt de Gulp verruwd. Net bovenstrooms van Gulpen wordt de verruwing over de gehele breedte van het beekdal toegepast. Verder bovenstrooms blijft dit beperkt tot de gebieden direct langs de beek.

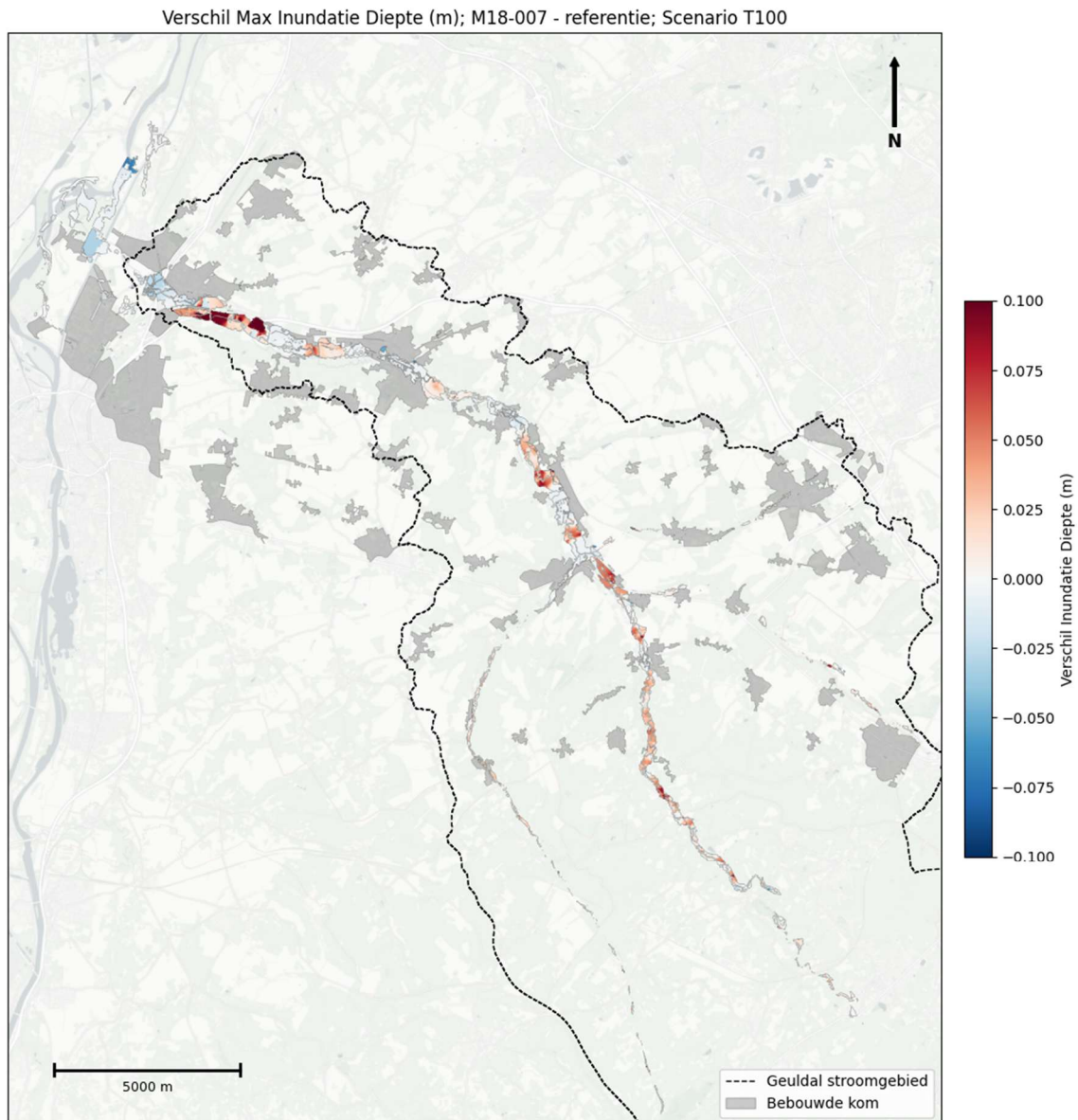
Bij de Gulp (Afbeelding 4.24) is er voor het T2 event bijna geen verandering zichtbaar, omdat de Gulp bij het T2 event nauwelijks buiten zijn oevers treedt. De impact neemt toe bij hogere herhalingstijden. De maximale waterstandstijging is circa 10 cm.

Afbeelding 4.24 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 18 (ruwheid: $0,07 \text{ s/m}^{1/3}$) en referentie in de Gulp voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



Inundatie

In Afbeelding 4.25 is de inundatieverschilkaart tussen de maatregel en referentie situatie weergegeven. Te zien is dat de waterstand toeneemt ter plekke van verhoogde ruwheid. Het effect dempt bovenstrooms vrij snel uit. Mogelijk komt dit door het verhang in het gebied. Net benedenstrooms van de verhoogde ruwheid is soms een (kleine) waterstandsverlaging op te merken. Dit komt doordat de afvoergolf door de verhoogde ruwheid wordt vertraagd, waardoor de piekafvoer iets afneemt. Aangezien het beekdal wordt verruwd in gebieden zonder bebouwing, zijn de waterstandsverhogingen ook voornamelijk buiten bebouwd gebied. Hier en daar werkt de waterstandsverhoging iets verder door bovenstrooms, ook in bebouwd gebied.



Conclusies

De verlaging van de benedenstroomse piekafvoer en vertraging van de afvoergolf is zeer beperkt (maximaal $-0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ nabij Valkenburg). De grootste effecten zijn zichtbaar voor het meest extreme event (T100) waarbij de meeste inundaties optreden. De waterstand neemt toe ter plekke van verhoogde ruwheid. Het effect dempt bovenstrooms vrij snel uit. Soms is er net benedenstrooms van de verhoogde ruwheid een (kleine) waterstandsverlaging op te merken. Dit effect is het duidelijkst aanwezig benedenstrooms bij Meerssen. Netto lijkt er meer negatieve impact door toedoen van de maatregel.

Conform verwachting zijn de effecten voor het T2 event beperkt, omdat de beek niet of nauwelijks buiten zijn oevers treedt. In de Eyserbeek is vrijwel geen effect zichtbaar, omdat rondom de Eyserbeek vrijwel geen inundaties optreden. De inundatieverhogingen zijn vrijwel altijd op locaties waar in de referentiesituatie ook al inundaties optreden, de uitbreiding is zeer beperkt.

4.2.2 Manning $0,1 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$

De resultaten zijn vergelijkbaar met de resultaten van de variant met een ruwheid van $0,07 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$, wel zijn de resultaten meer uitgesproken, dus de verschillen ten opzichte van de referentiesituatie zijn groter. De onderbouwing bij de afbeeldingen is vergelijkbaar met de paragraaf hierboven en daarom niet apart toegevoegd.

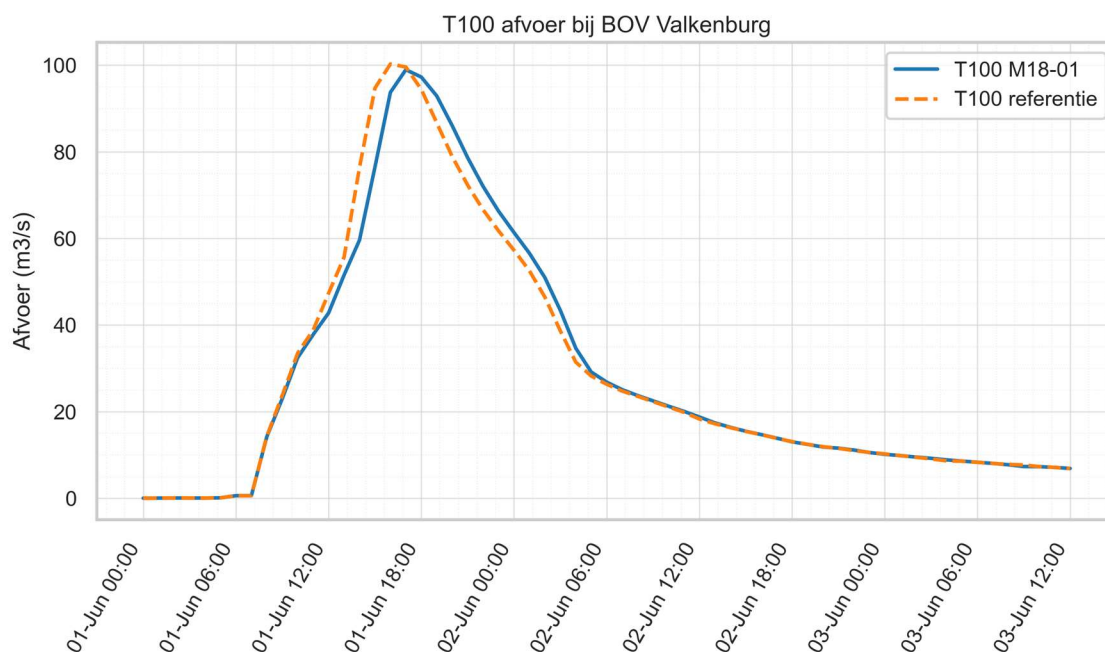
Afvoer

In Afbeelding 4.26 en Afbeelding 4.27 is het verloop van de afvoergolf bovenstrooms van Valkenburg weergegeven. De afvoerpiek daalt met enkele m^3/s . De richting van deze verschuiving is typisch wat verwacht wordt bij vertraging van de afvoergolf. In bijlage I is het verloop van de afvoergolf bovenstrooms van Valkenburg weergegeven voor de andere events. Het absolute verschil in de piekafvoer is voor elk event aangegeven in Tabel 4.5.

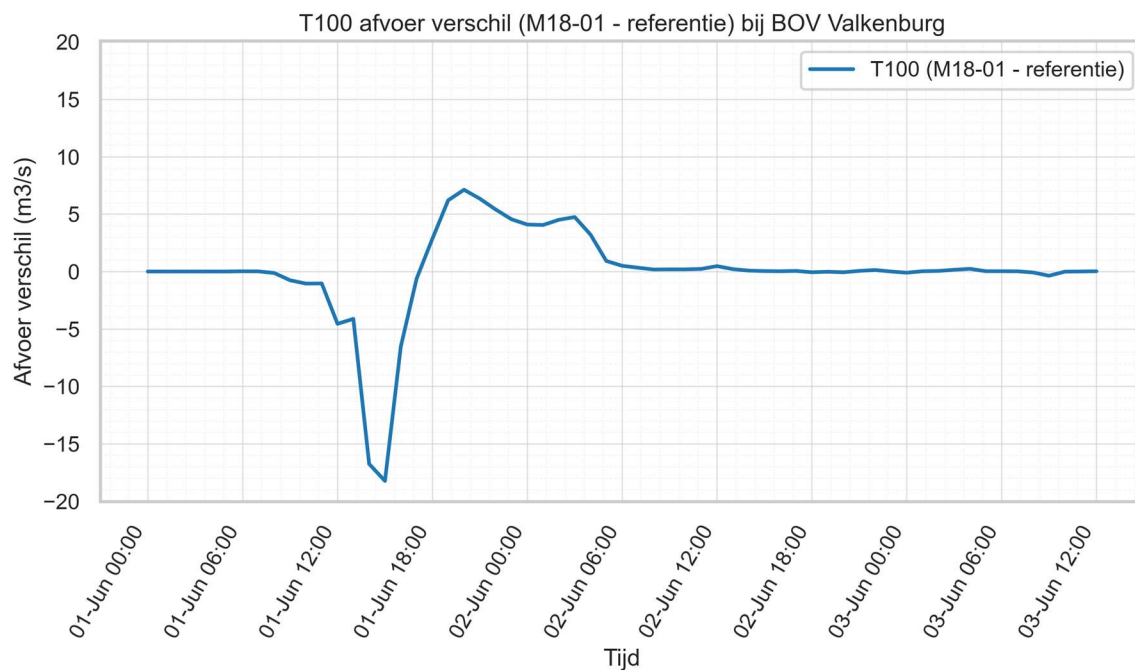
Tabel 4.5 Piekafvoer bovenstrooms Valkenburg voor verschillende events, maatregel 18 (ruwheid: $0,1 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$).

Event	Piekafvoer referentie m^3/s	Piekafvoer maatregel m^3/s	Vershil maatregel - ref m^3/s
T2	32,4	32,2	-0,2
T10	53,5	52,5	-1,0
T25	65,1	63,9	-1,2
T100	100,3	99,0	-1,3

Afbeelding 4.26 Afvoerverloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel 18 (ruwheid: $0,1 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$), event: T100



Afbeelding 4.27 Verschilplot afvoerterloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel 18 (ruwheid: 0,1 s/m^{1/3}), event: T100



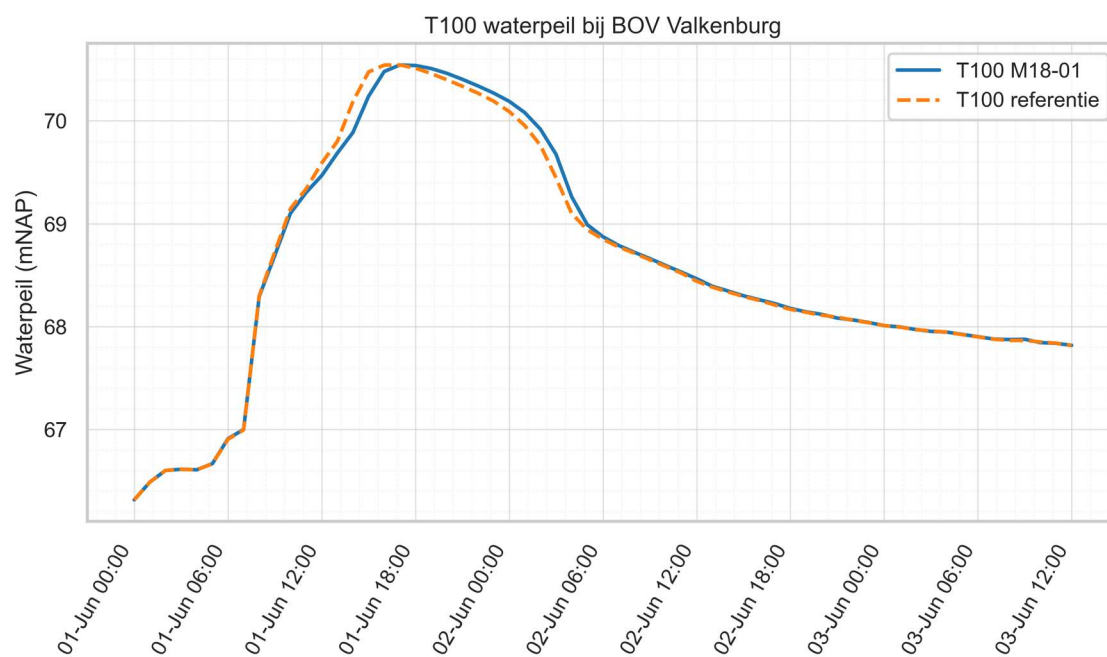
Waterstandsverloop

In bijlage II is het verloop van de afvoergolf bovenstrooms van Valkenburg weergegeven voor de andere events. Het absolute verschil in de piekafvoer is voor elk event aangegeven in Tabel 4.6.

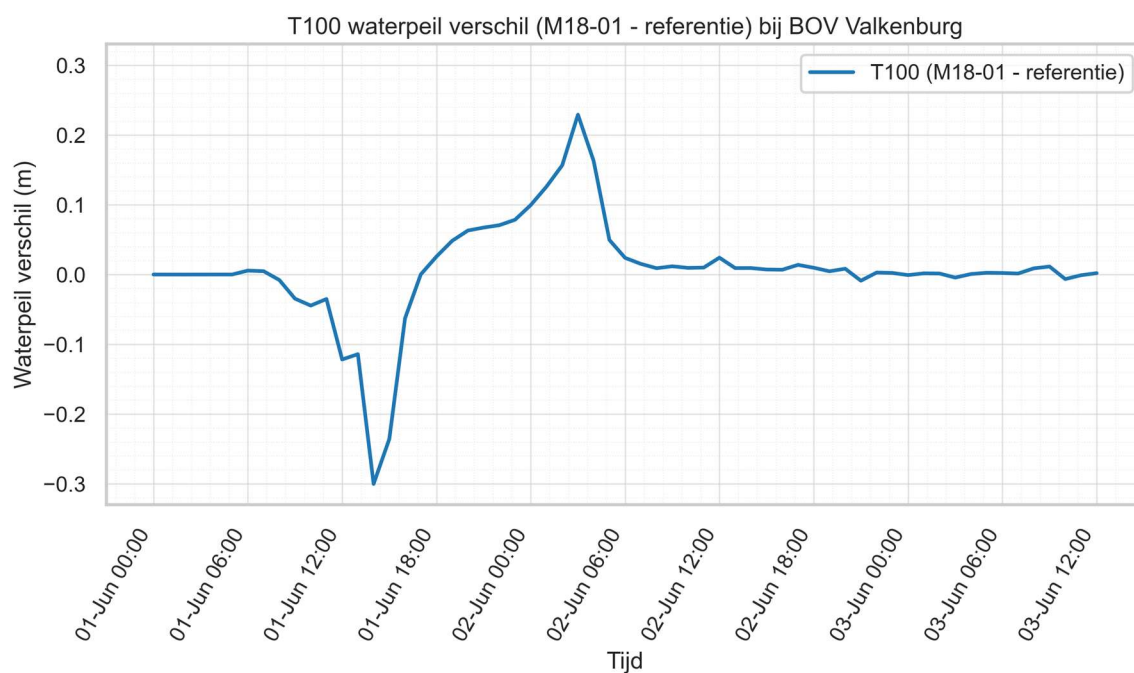
Tabel 4.6 Piekwaterstand bovenstrooms Valkenburg voor verschillende events, maatregel 18 (ruwheid: 0,1 s/m^{1/3}).

Event	Piekwaterstand referentie m NAP	Piekwaterstand maatregel m NAP	Verskil maatregel - ref m
T2	69,11	69,10	-0,01
T10	69,85	69,83	-0,02
T25	70,19	70,17	-0,02
T100	70,54	70,54	0

Afbeelding 4.28 Waterstandverloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel 18 (ruwheid: $0,1 \text{ s/m}^{1/3}$), event: T100

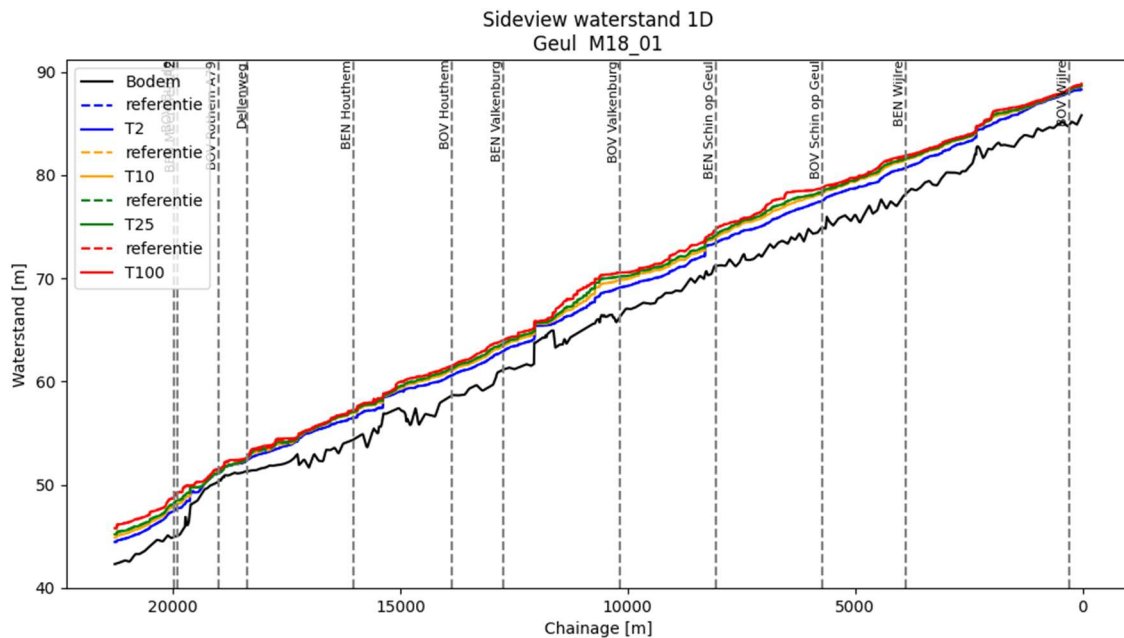


Afbeelding 4.29 Verschilplot waterstandsverloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel 18 (ruwheid: $0,1 \text{ s/m}^{1/3}$), event: T100

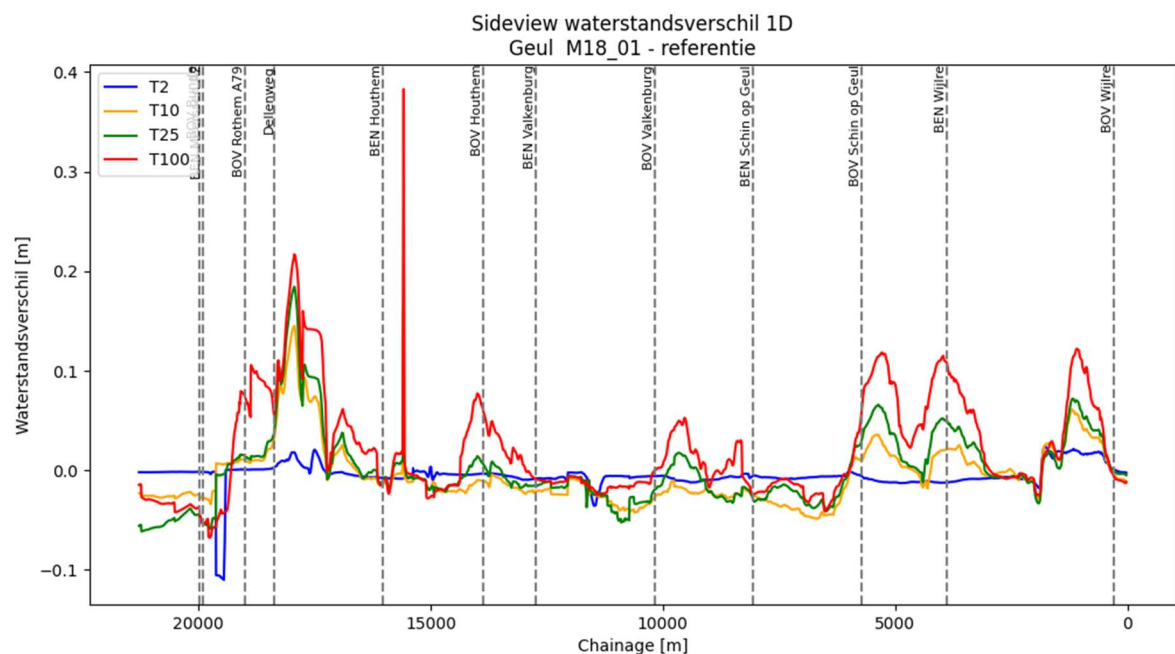


Langsdoorsnede

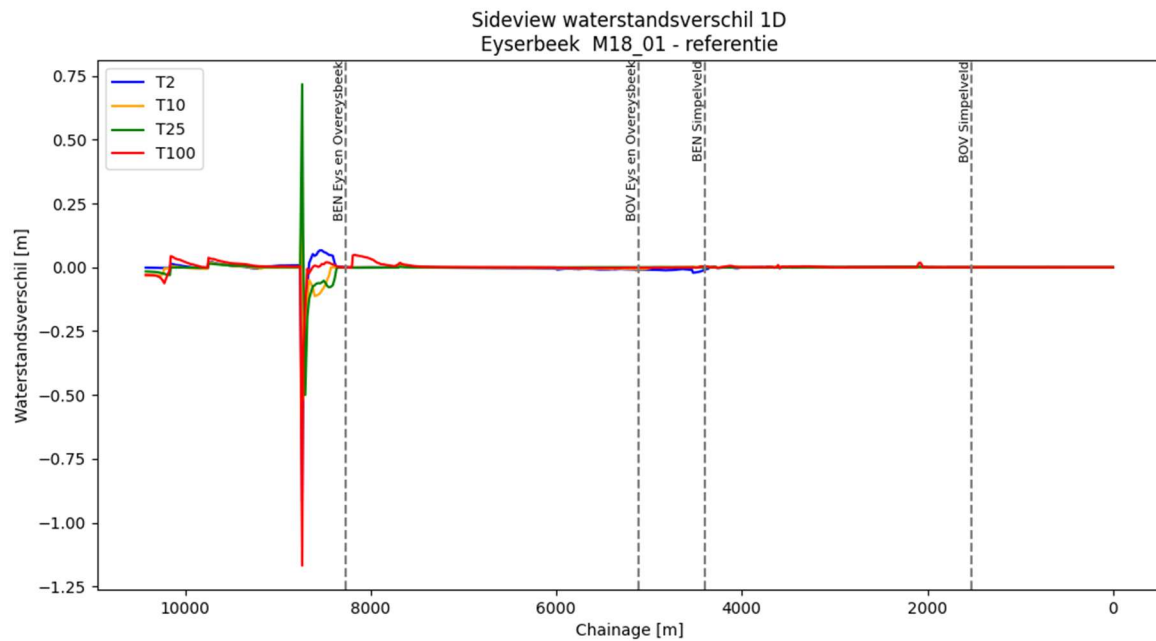
Afbeelding 4.30 Langsdoorsnede van de maximale waterstand in de Geul van Bunde tot en met Wijlre voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood), maatregel 18 (ruwheid: $0,1 \text{ s/m}^{1/3}$) en referentie



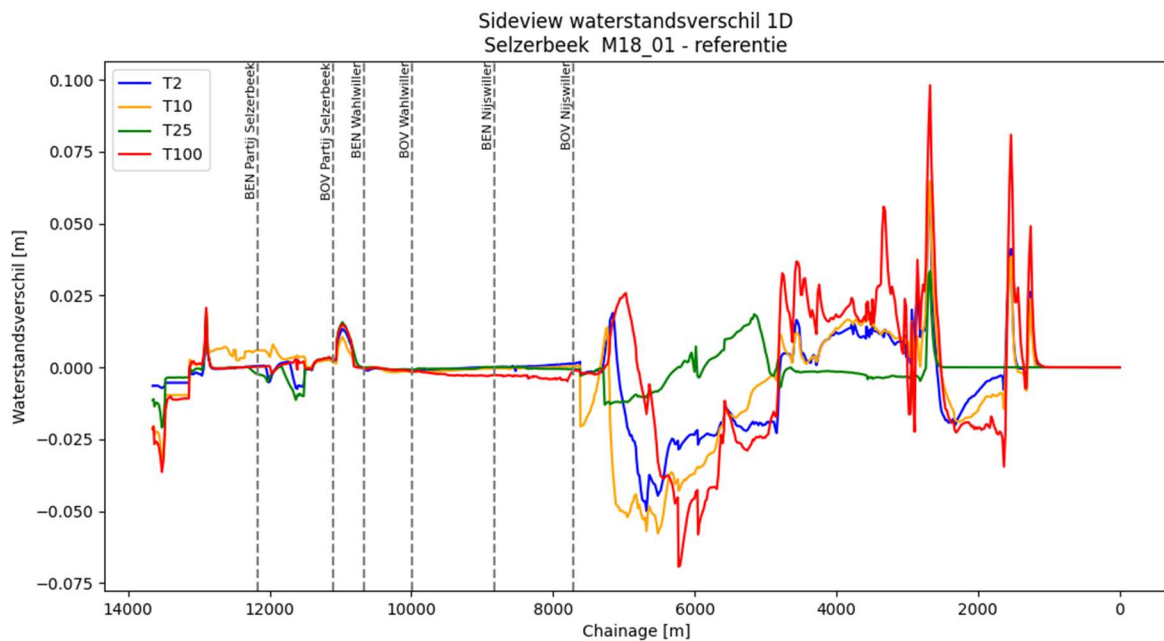
Afbeelding 4.31 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 18 (ruwheid: $0,1 \text{ s/m}^{1/3}$) en referentie in de Geul van Bunde tot en met Wijlre voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



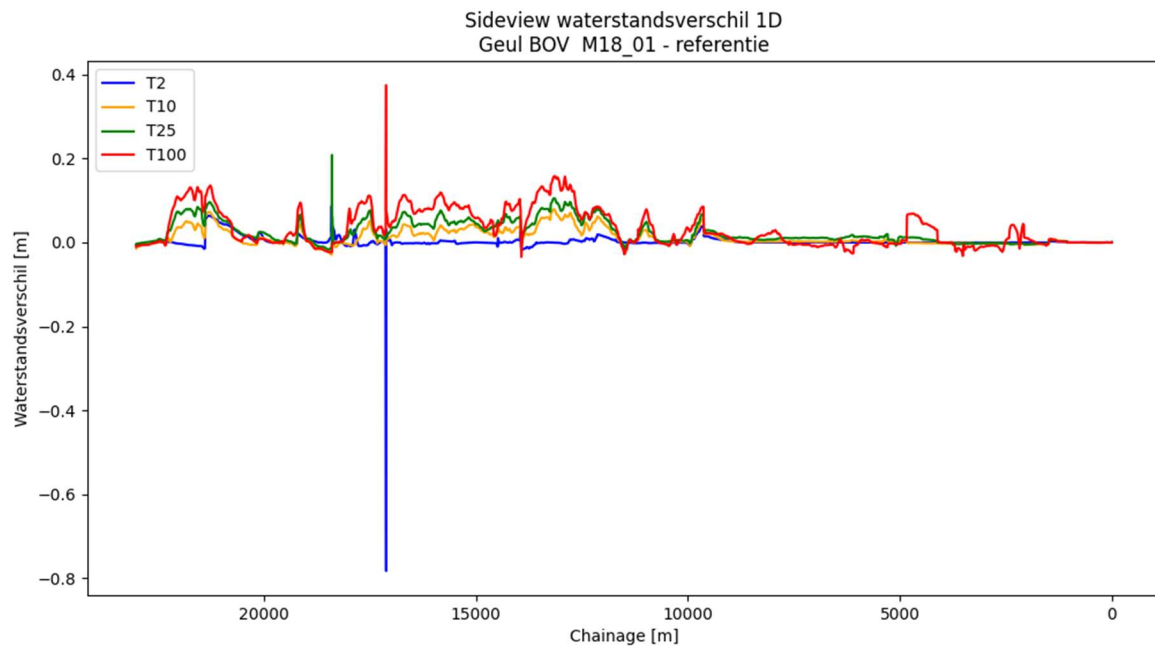
Afbeelding 4.32 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 18 (ruwheid: $0,1 \text{ s/m}^{1/3}$) en referentie in de Eyserbeek voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



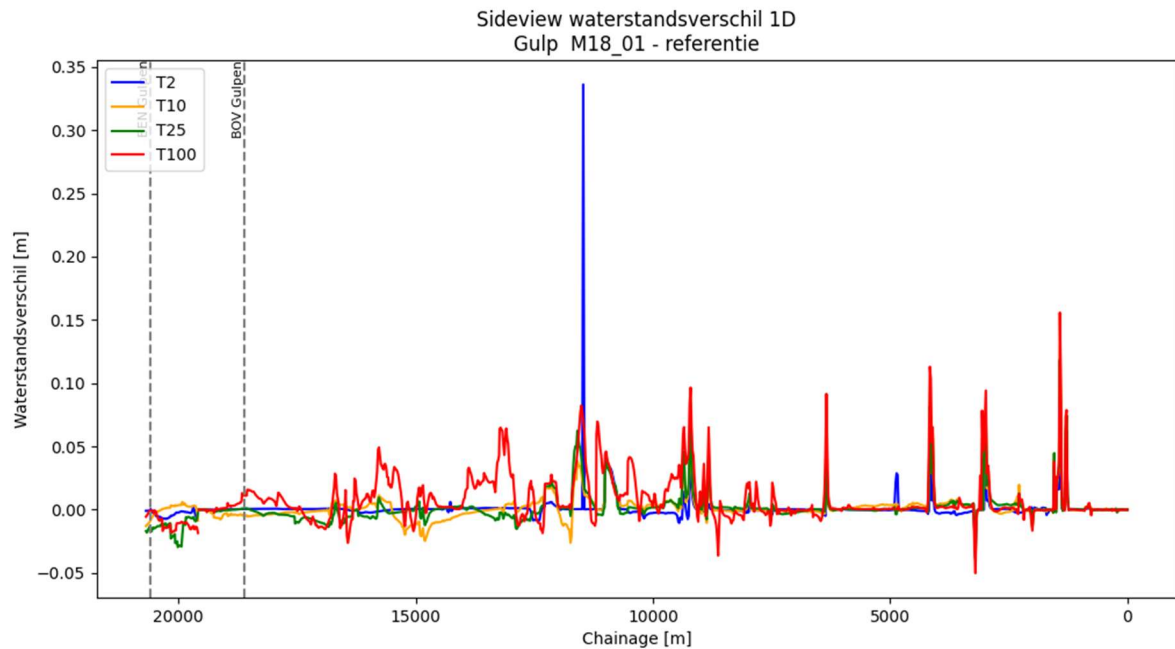
Afbeelding 4.33 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 18 (ruwheid: $0,1 \text{ s/m}^{1/3}$) en referentie in de Selzerbeek voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



Afbeelding 4.34 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 18 (ruwheid: $0,1 \text{ s/m}^{1/3}$) en referentie in de Geul (bovenstrooms vanaf Wijlre) voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



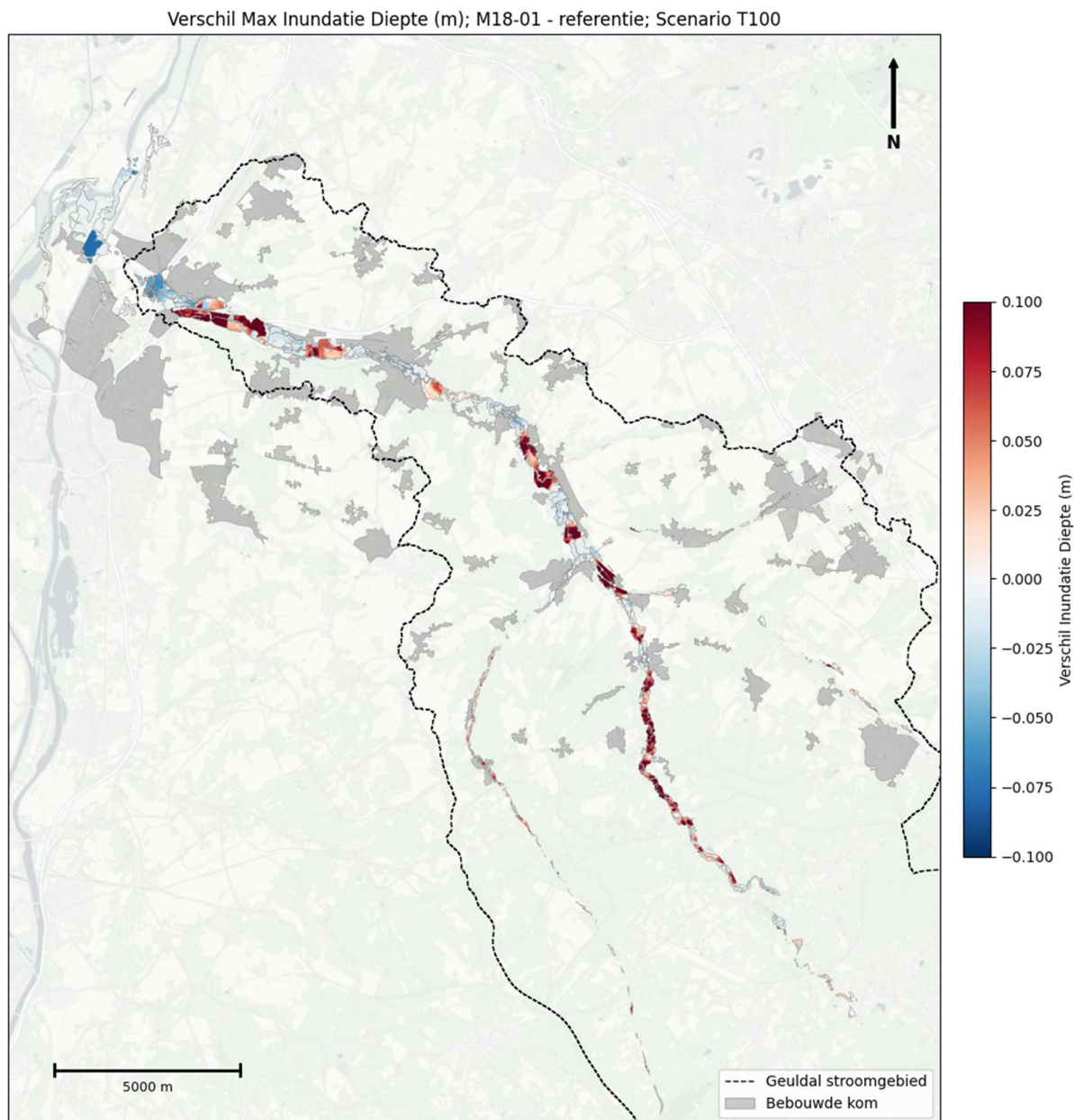
Afbeelding 4.35 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 18 (ruwheid: $0,1 \text{ s/m}^{1/3}$) en referentie in de Gulp voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



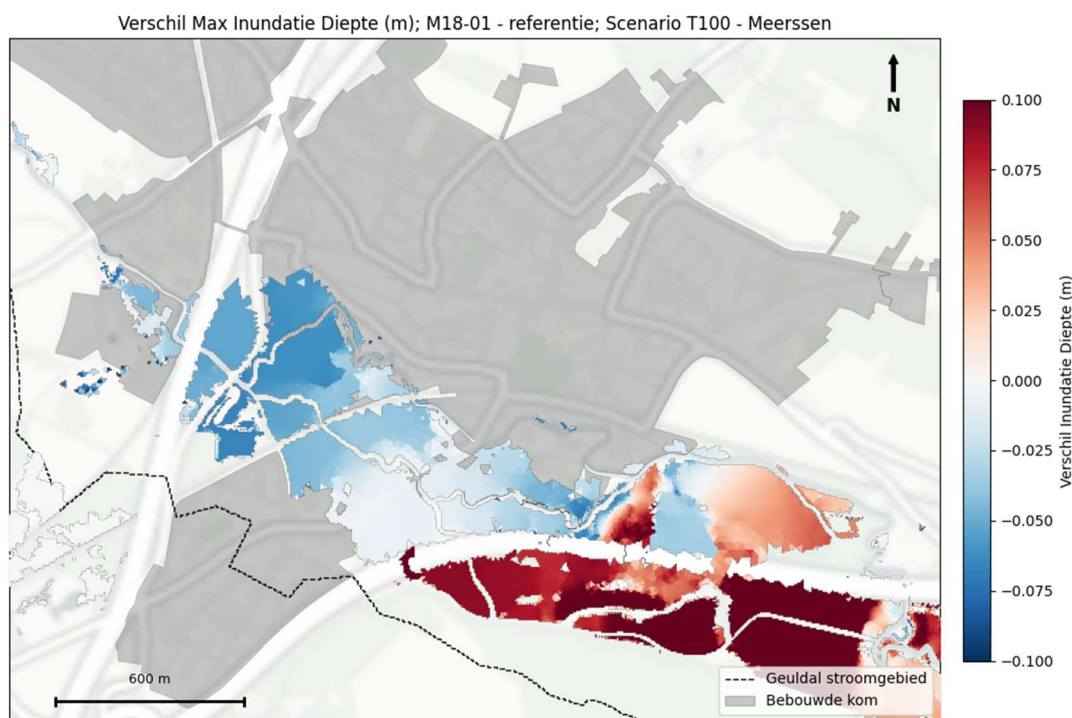
Inundatie

In Afbeelding 4.36 is de inundatieverschilkaart tussen de maatregel en referentie situatie weergegeven. In Afbeelding 4.37 is ingezoomd op Meerssen.

Afbeelding 4.36 Inundatieverschilkaart, maatregel 18 (ruwheid: $0,1 \text{ s/m}^{1/3}$), event: T100



Afbeelding 4.37 Inundatieverschilkaart ingezoomd op Meerssen, maatregel 18 (ruwheid: $0,1 \text{ s/m}^{1/3}$), event: T100.



Conclusie

De verlaging van de benedenstroomse piekafvoer en vertraging van de afvoergolf is zichtbaar, maar beperkt (maximaal $-1,3 \text{ m}^3/\text{s}$). De grootste effecten zijn zichtbaar voor het meest extreme event (T100) waarbij de meeste inundaties optreden. De waterstand neemt toe ter plekke van verhoogde ruwheid. Het effect dempt bovenstrooms vrij snel uit. Soms is er net benedenstrooms van de verhoogde ruwheid een (kleine) waterstandsverlaging op te merken. Dit effect is het duidelijkst aanwezig benedenstrooms bij Meerssen. Netto lijkt er meer negatieve impact door toedoen van de maatregel.

Conform verwachting zijn de effecten voor het T2 event beperkt, omdat de beek niet of nauwelijks buiten zijn oevers treedt. In de Eyserbeek is vrijwel geen effect zichtbaar, omdat rondom de Eyserbeek vrijwel geen inundaties optreden. De ruwheden wordt voornamelijk verhoogd in gebieden zonder bebouwing. De waterstandsverhogingen zijn daarom ook voornamelijk in gebied zonder bebouwing. Ook zijn de inundatieverhogingen vrijwel altijd op locaties waar in de referentiesituatie ook al inundaties optreden, de uitbreiding is zeer beperkt.

4.3 Maatregel 19: Checkdams

In deze paragraaf zijn de resultaten van maatregel 19 beschreven. Verwacht wordt dat er niet of nauwelijks veranderingen optreden voor het T2 event, omdat deze situatie onder de checkdams doorstroomt. De grootste veranderingen worden verwacht voor de T100 situatie. De T100 is als maatgevend beschouwd.

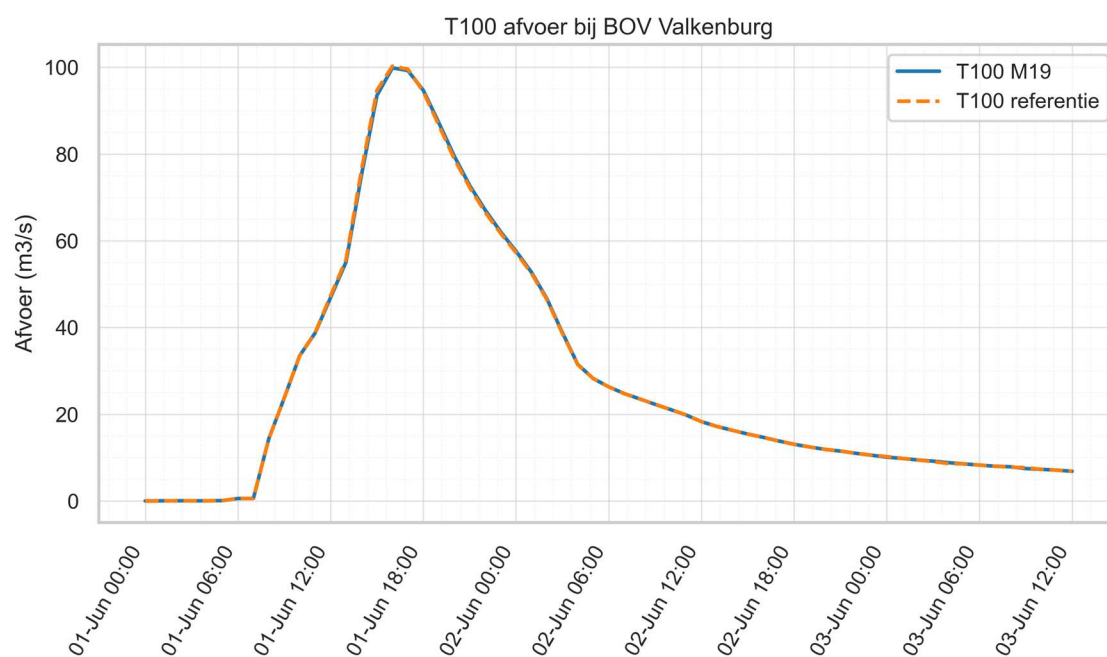
Afvoer

In Afbeelding 4.38 en Afbeelding 4.39 is het verloop van de afvoergolf bovenstrooms van Valkenburg weergegeven voor de referentiesituatie (oranje) en de situatie inclusief verruwing van het beekdal tijdens een T100 event. De maximale afvoerpiek is vrijwel niet veranderd. In bijlage I is het verloop van de afvoergolf bovenstrooms van Valkenburg weergegeven voor de andere events. Het absolute verschil in de piekafvoer is voor elk event aangegeven in Tabel 4.7.

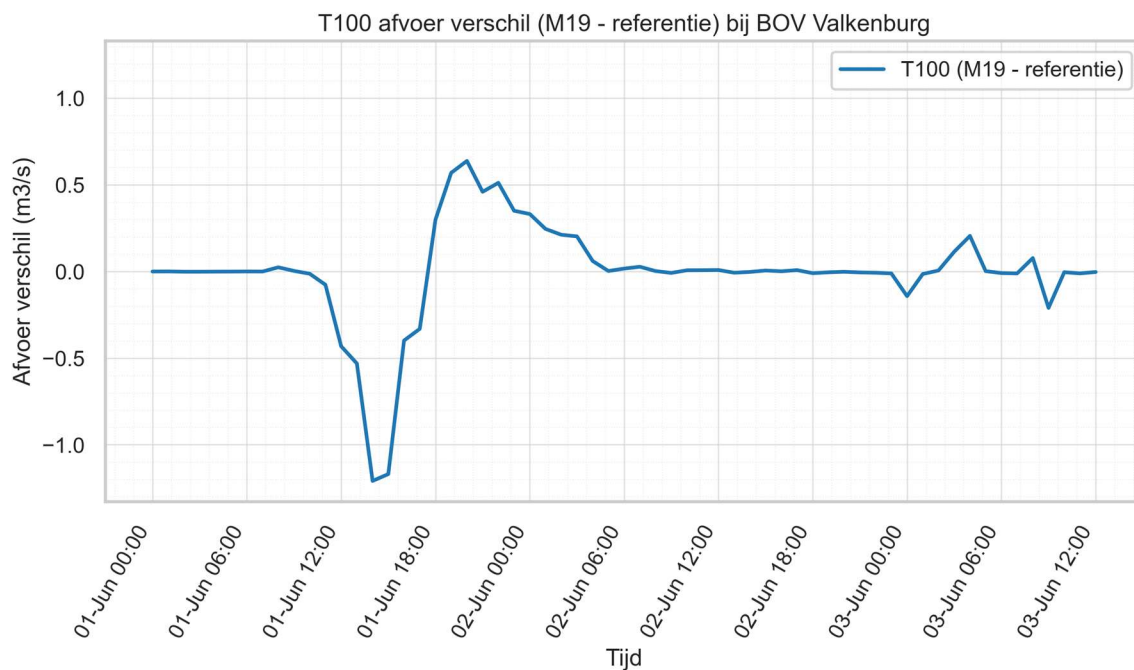
Tabel 4.7 Piekafvoer bovenstrooms Valkenburg voor verschillende events, maatregel 19.

Event	Piekafvoer referentie m ³ /s	Piekafvoer maatregel m ³ /s	Vershil maatregel - ref m ³ /s
T2	32,4	32,4	0
T10	53,5	53,6	0,1
T25	65,1	65,0	-0,1
T100	100,3	99,9	-0,4

Afbeelding 4.38 Afvoeroverloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel 19, event: T100



Afbeelding 4.39 Verschilplot afvoerterloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel 19, event: T100



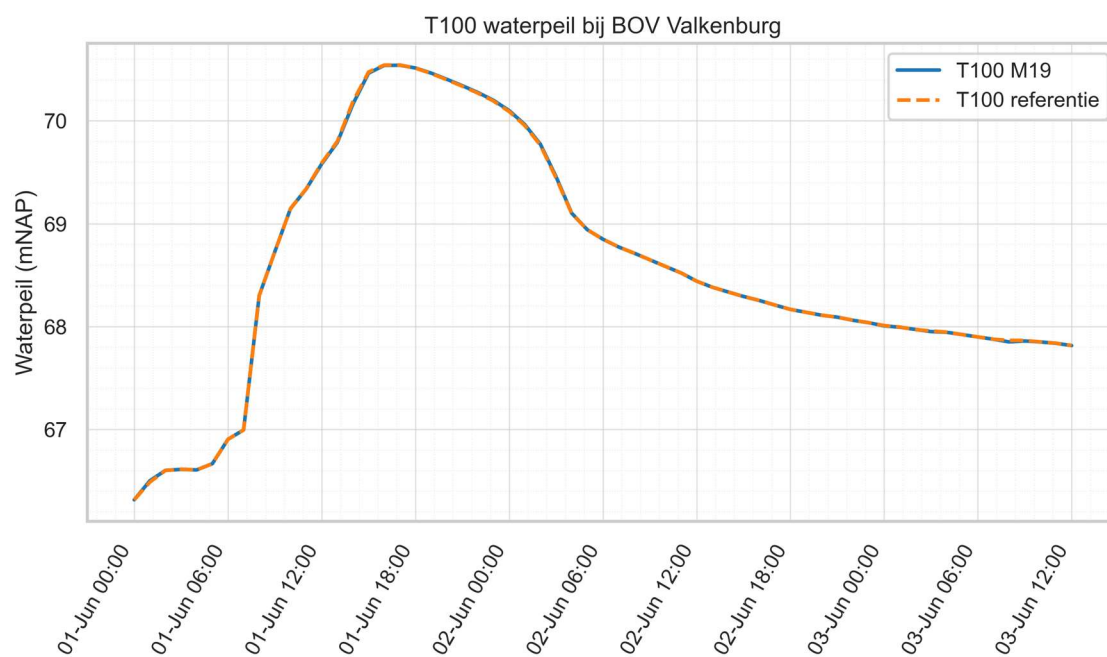
Waterstandsverloop

Hetzelfde geldt voor het waterstandsverloop in Afbeelding 4.40 en Afbeelding 4.41. In bijlage II is het verloop van de afvoergolf bovenstrooms van Valkenburg weergegeven voor de andere events. Het absolute verschil in de piekafvoer is voor elk event aangegeven in Tabel 4.8.

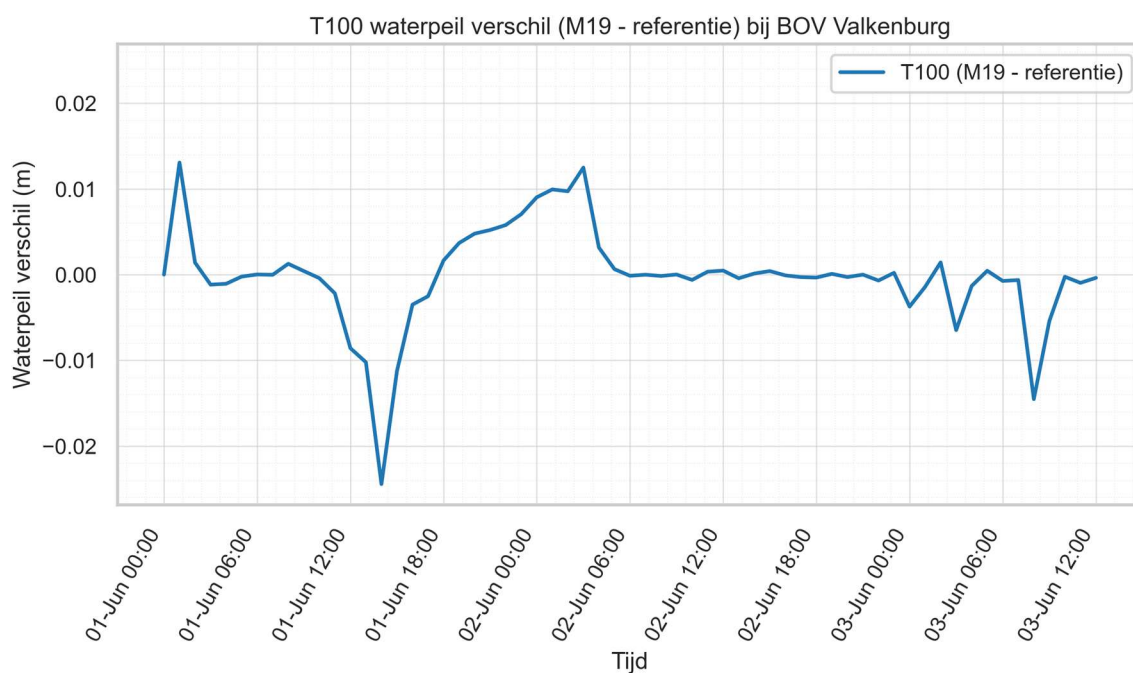
Tabel 4.8 Piekwaterstand bovenstrooms Valkenburg voor verschillende events, maatregel 19

Event	Piekwaterstand referentie m NAP	Piekwaterstand maatregel m NAP	Verskil maatregel - ref m
T2	69,11	69,11	0
T10	69,85	69,86	0,01
T25	70,19	70,18	-0,01
T100	70,54	70,54	0

Afbeelding 4.40 Waterstandverloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel 19, event: T100



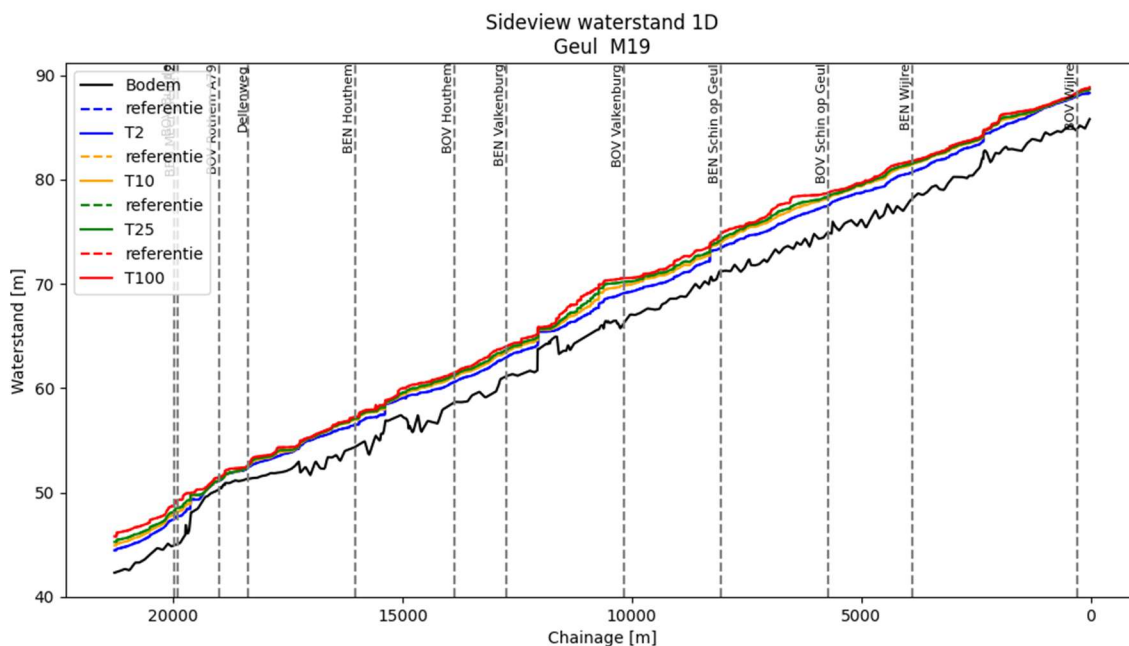
Afbeelding 4.41 Verschilplot waterstandsverloop bovenstrooms van Valkenburg, maatregel 19, event: T100



Langsdoorsnede

In Afbeelding 4.42 is een langsdoorsnede van de maximale waterstand in de Geul weergegeven. De onderlinge waterstandsverschillen zijn lastig te zien, omdat dit samen met het verhang in dit gebied te gedetailleerd is om weer te geven.

Afbeelding 4.42 Langsdoorsnede van de maximale waterstand in de Geul van Bunde tot en met Wijlre voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood), maatregel 19 en referentie



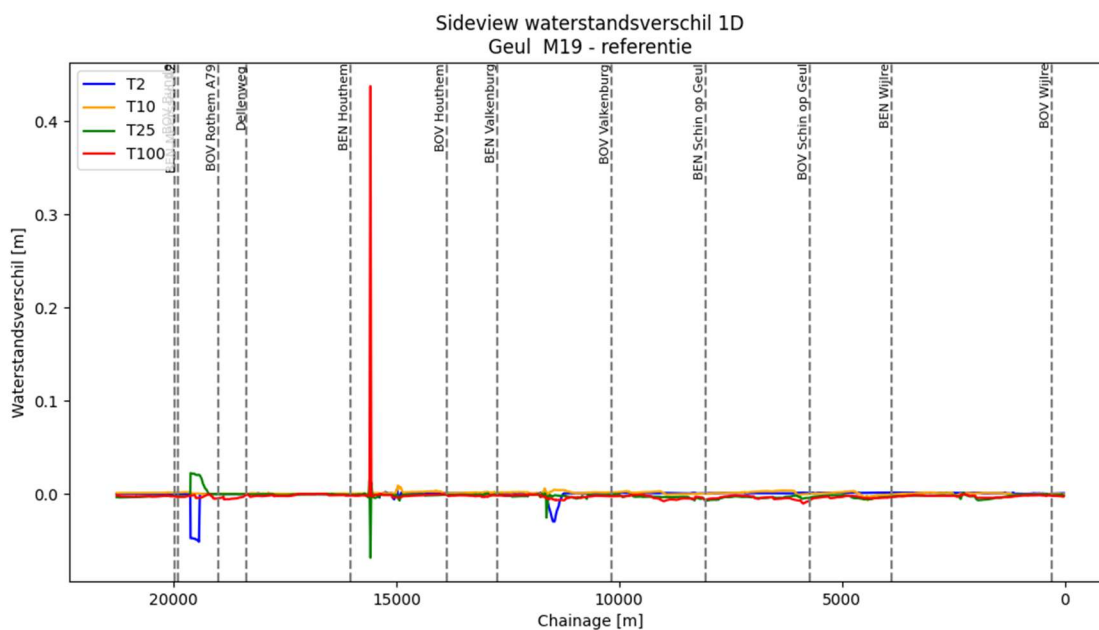
Daarom zijn hieronder de waterstandsverschillen ten opzichte van de referentie getoond voor de verschillende trajecten (Geul, Eyserbeek, Selzerbeek, Geul BOV en Gulp).

Merk op dat voor deze maatregel niet overal een directe vergelijking kan worden gemaakt tussen de 1D rekenpunten van de referentiesituatie en maatregel. Door het toevoegen van kunstwerken in het 1D model zijn de 1D rekenpunten opnieuw gegenereerd en mogelijk minimaal verschoven. Om de vergelijking te kunnen maken wordt het resultaat van een rekenpunt in het maatregelmodel vergeleken met het resultaat op een rekenpunt in het referentiemodel met de dichtstbijzijnde chainage. Hierdoor kan in de langsdoorsneden een verschuiving worden geïntroduceerd die ten onrechte kan worden toegekend aan de checkdam. Door lokaal in te zoomen op het 2D resultaat is gecontroleerd of de checkdam een (plausibel) effect heeft. Ook in 2D kan met betrekking tot dit nog steeds een kleine onnauwkeurigheid worden geïntroduceerd, omdat de 1D2D koppeling ook iets verschuift door het introduceren/verschuiven van 1D rekenpunten.

Daarnaast introduceren de checkdams in enkele gevallen een kleine instabiliteit te introduceren. De oorzaak hiervan is nog niet gevonden. De instabiliteiten zijn dermate klein dat het beperkt van invloed is op de 2D resultaten. De resultaten worden betrouwbaar geacht. Het is besproken met Deltares.

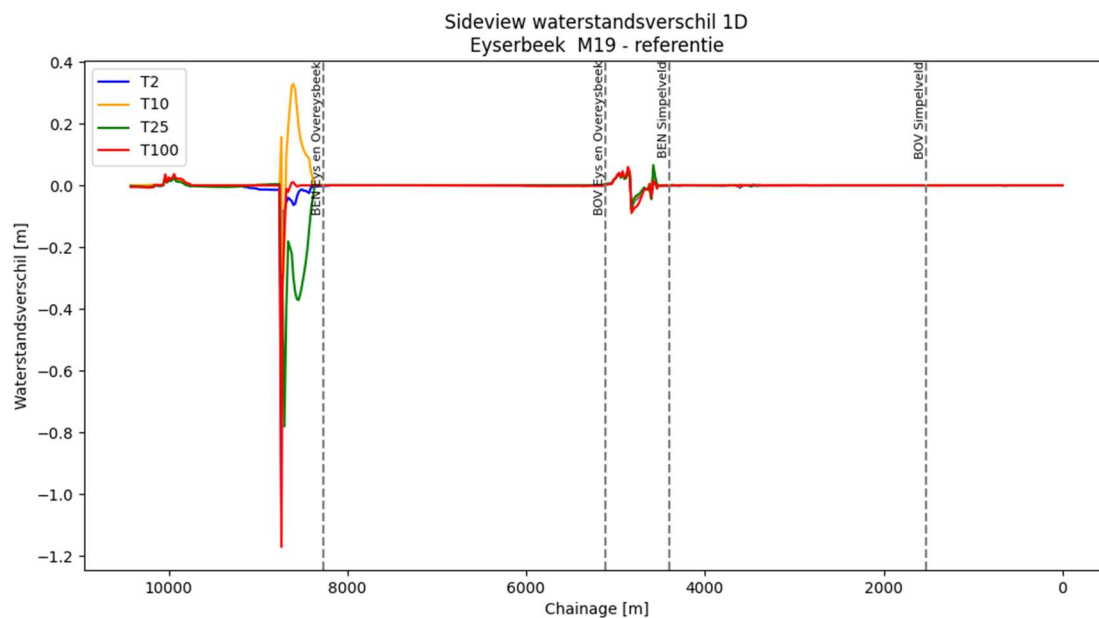
In Afbeelding 4.43 zijn de waterstandsverschillen ten opzichte van de referentiesituatie weergegeven voor de Geul benedenstrooms van Wijlre. Er zijn in dit traject geen checkdams geplaatst in de Geul. Er zijn nauwelijks veranderingen zichtbaar, ook niet door vertraging van de afvoergolf bovenstrooms.

Afbeelding 4.43 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 19 en referentie in de Geul van Bunde tot en met Wijlre voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



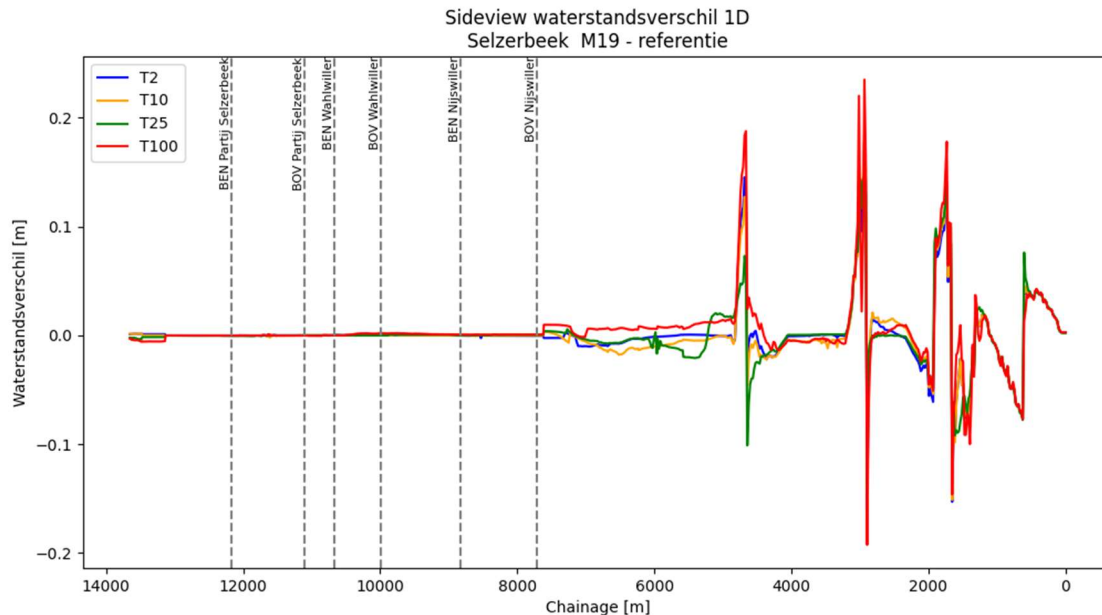
De resultaten van de Eyserbeek zijn weergegeven in Afbeelding 4.44. De Eyserbeek treedt niet buiten zijn oevers. De checkdams hebben geen effect.

Afbeelding 4.44 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 19 en referentie in de Eyserbeek voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



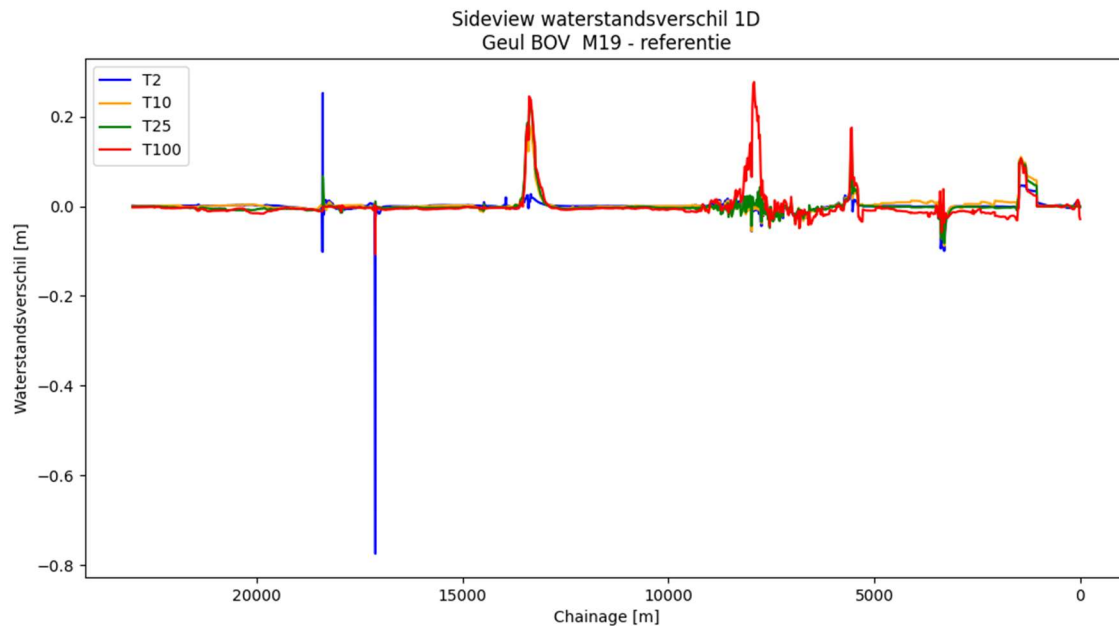
In de Selzerbeek heeft de checkdam ter hoogte van chainage 5000 een duidelijk effect (zie Afbeelding 4.45). Bovenstrooms wordt er water vastgehouden, waardoor de waterstand toeneemt en benedenstrooms van de checkdam is een kleine waterstandsval zichtbaar. Verder bovenstrooms lijken er nog twee checkdams te zijn die een klein effect hebben.

Afbeelding 4.45 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 19 en referentie in de Selzerbeek voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



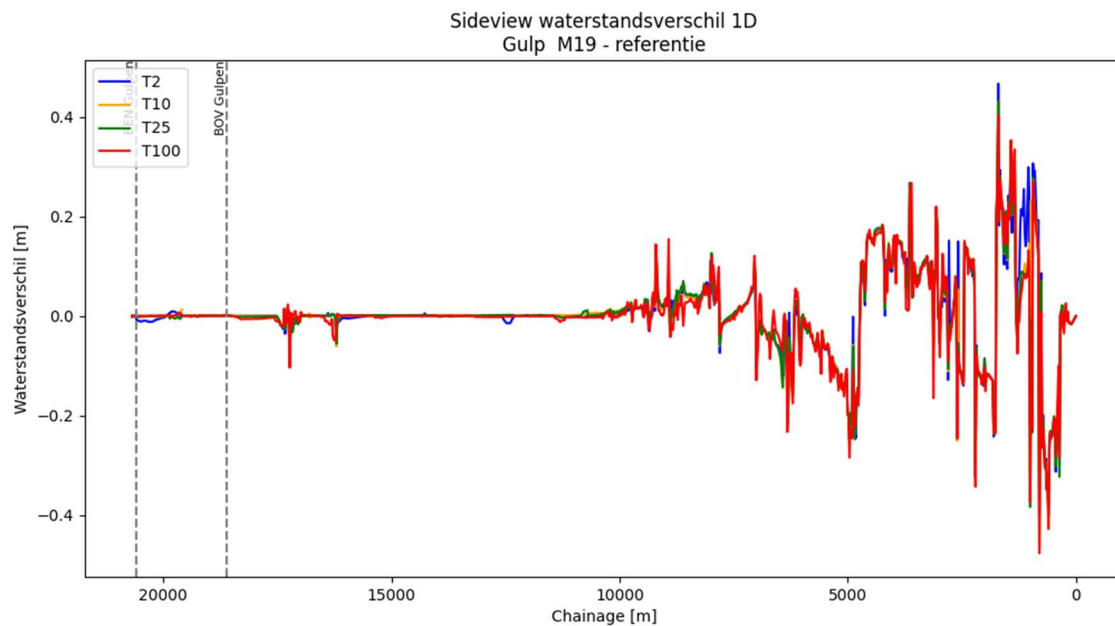
In Afbeelding 4.46 is de impact van checkdams in de Geul weergegeven. Kijkend naar het 2D zijn er drie checkdams die impact hebben op de waterstand (chainage 14000, 8000 en 1000 of anders gezegd nabij Hoeve Vernelsberg, Boerderij van Boffereth en Moresnet). Bovenstrooms van de checkdam neemt de waterstand toe en direct benedenstrooms neemt de waterstand af. De impact neemt toe met hogere herhalings tijden. De kruin van de checkdam wordt niet bereikt.

Afbeelding 4.46 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 19 en referentie in de Geul (bovenstrooms vanaf Wijlre) voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



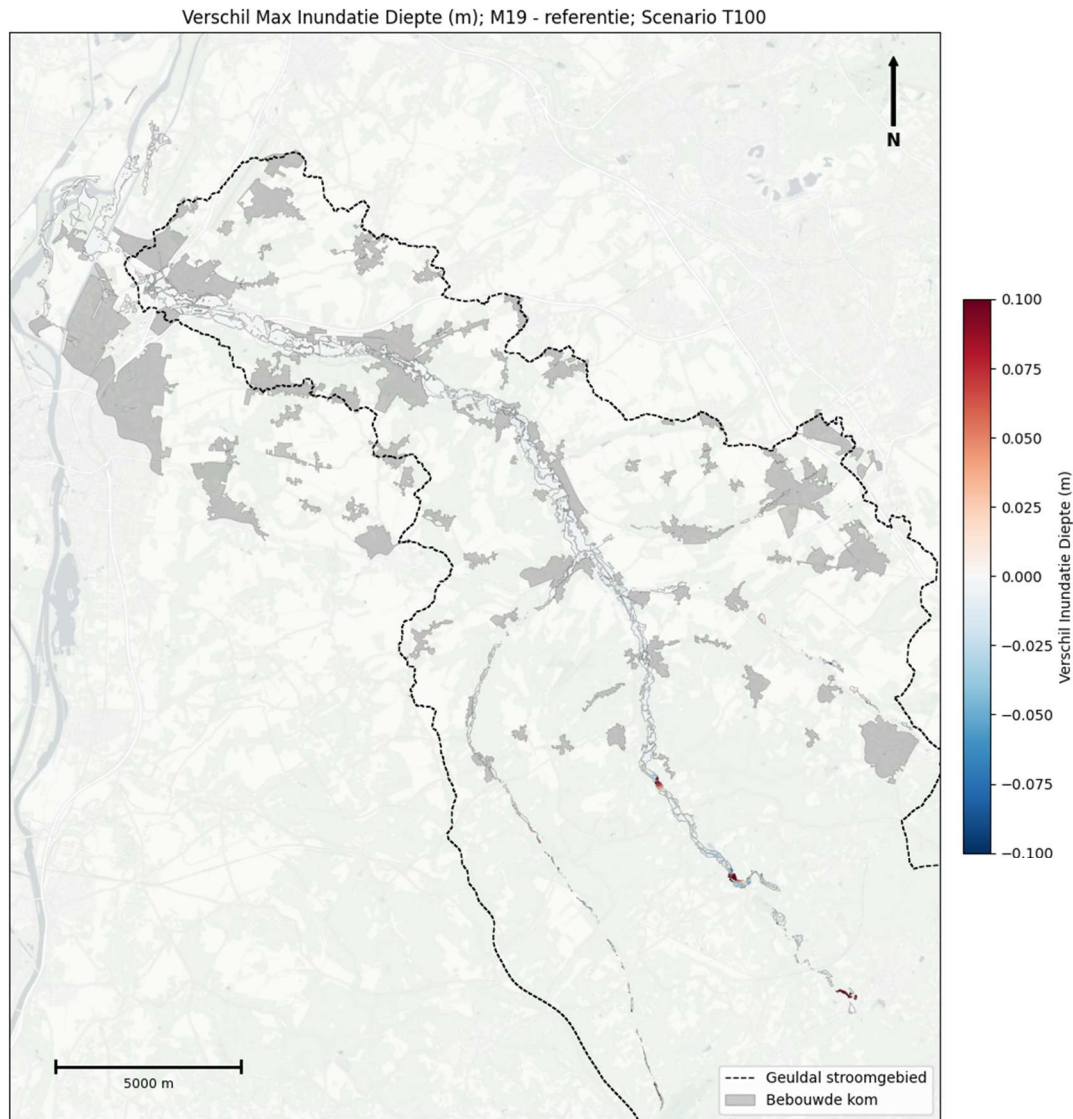
Kijkend naar het ingezoomde 2D resultaat, lijkt er helemaal bovenstrooms in de Gulp een checkdam effect te hebben op het resultaat. Er wordt water vastgehouden. Bovenstrooms van de checkdam lopen de waterstanden iets op en direct benedenstrooms neemt de waterstand iets af. Dit is niet goed terug te zien in de langsdoorsnede van zie Afbeelding 4.47. Er lijkt met deze checkdam ook een kleine instabiliteit te worden geïntroduceerd. Het is lastig inschatten of de kleine veranderingen benedenstrooms van deze checkdam komen door de afgenomen afvoer, verschuiving van rekenpunten en/of kleine instabiliteit. Het effect op de waterstand in het beekdal is niet zo significant als de checkdams in de Geul.

Afbeelding 4.47 Langsdoorsnede van het verschil in maximale waterstand tussen maatregel 19 en referentie in de Gulp voor verschillende events (T2: blauw, T10: geel, T25: groen en T100: rood)



Inundatie

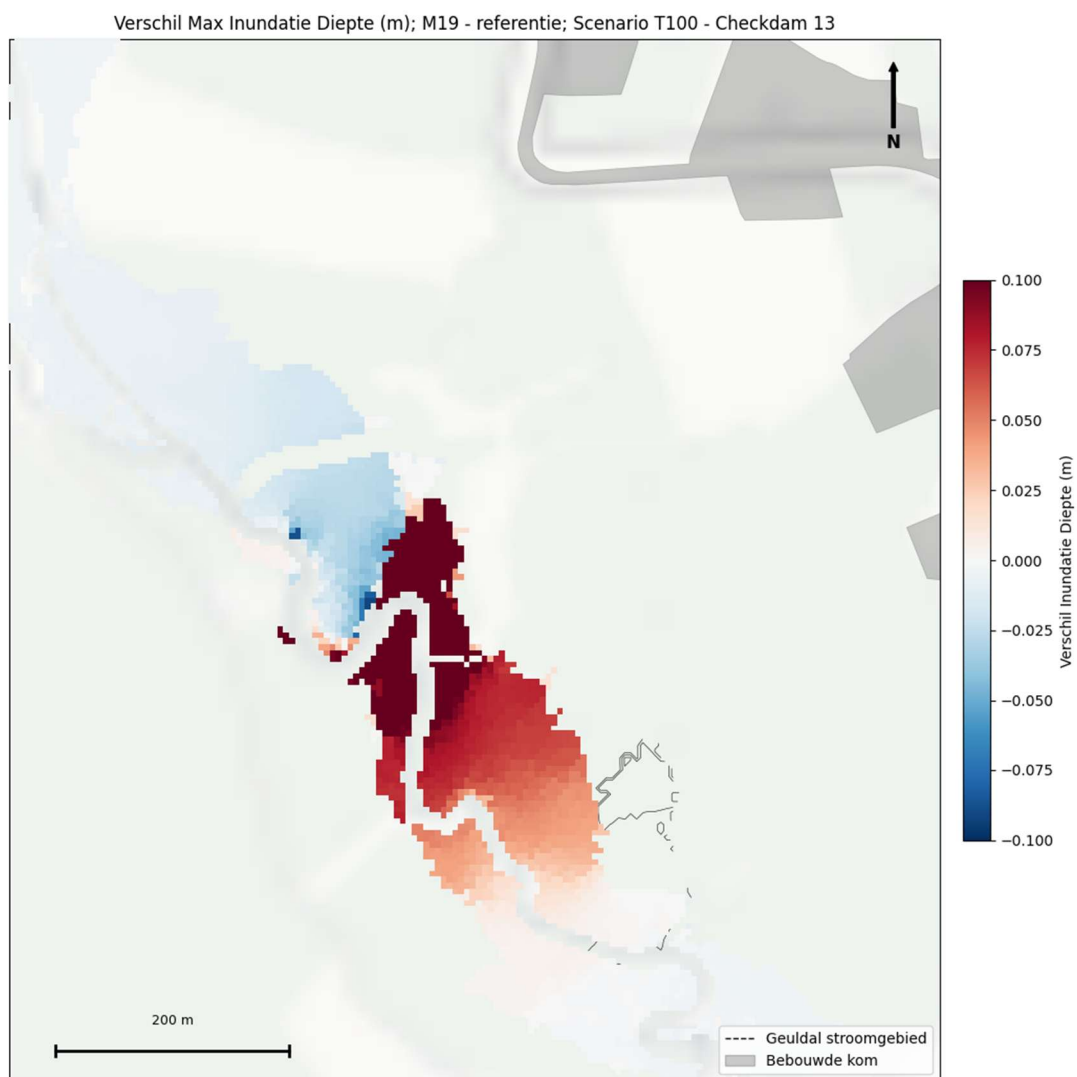
In Afbeelding 4.48 is de inundatieverschilkaart tussen de maatregel en referentie situatie weergegeven. Bovenstrooms in de Geul zijn op enkele locaties duidelijke waterstandsverhogingen zichtbaar ter plekke van enkele checkdams. De waterstandsverhogingen direct bovenstrooms van deze checkdams is maximaal zo'n 0,55 m. Ingezoomd op de kaart zijn er in de Gulp en Selzerbeek nog een checkdam met een beperkt effect. Bij de overige checkdams stroomt de beek onder de checkdam door.



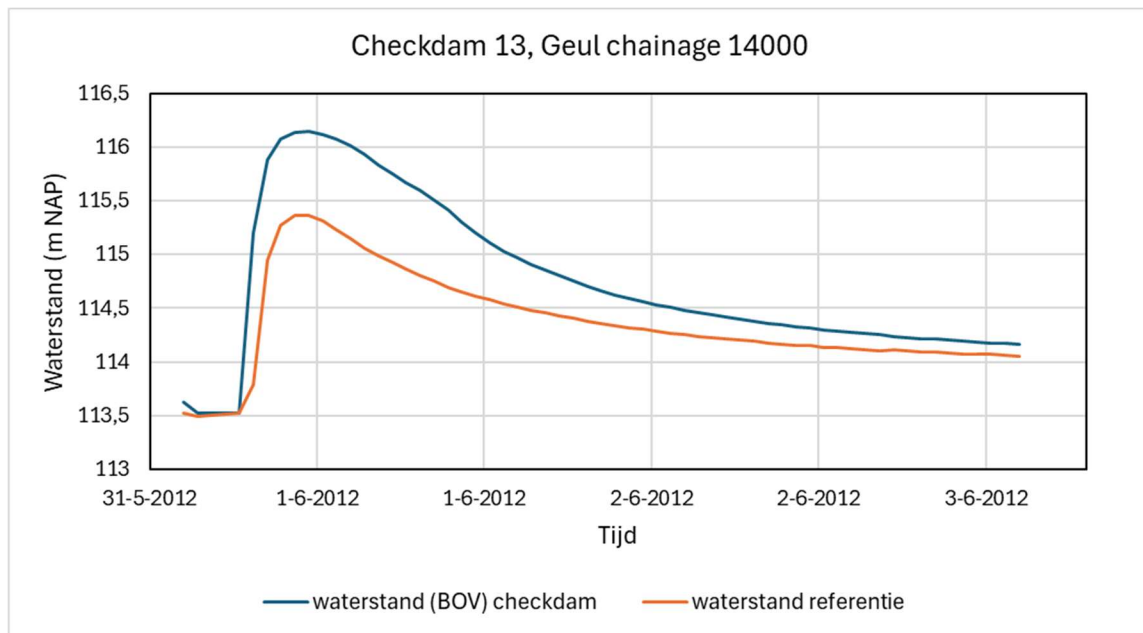
Lokaal effect checkdam

In Afbeelding 4.49 is ingezoomd op een effectieve checkdam. Het water wordt vastgehouden bovenstrooms van de checkdam, de ligging van de gronddam is duidelijk zichtbaar door de scherpe rand tussen blauw en donkerrood. In Afbeelding 4.50 is het verloop van de waterstand bovenstrooms van betreffende checkdam weergegeven. Te zien is dat de waterstand met circa 0,8 m toeneemt. Geen enkele checkdam overstroomt.

Afbeelding 4.49 Inundatieverschilkaart ingezoomd op checkdam 13, zodat het lokale effect zichtbaar is



Afbeelding 4.50 Waterstandsverloop nabij checkdam 13



Conclusies

Er is vrijwel geen effect te zien op de benedenstroomse afvoergolf (maximaal $-0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Valkenburg). De checkdams hebben alleen invloed op locaties waarbij in de referentiesituatie al een inundatie optreedt. Op het moment dat de beek binnen zijn oevers blijft heeft de checkdam geen functie, omdat de beek dan onder de constructie doorstroomt. Ook bij deze maatregel geldt dat de lokale waterstandsverhogingen groter zijn dan de waterstandsdalingen. De waterstandsverhogingen treden niet op in bebouwd gebied. Het zou interessant zijn om te onderzoeken wat het benedenstroomse effect is bij een hogere dichtheid aan effectieve checkdams in combinatie met checkdams in de droogdalen. Bij de enkele effectieve checkdams die nu aanwezig zijn in het model is lokaal een duidelijk effect zichtbaar zowel boven- als benedenstrooms.

5

CONCLUSIE

5.1 Algemene conclusie

De effecten van de maatregelen zijn afhankelijk van de afvoergolf. De piek en duur van de afvoergolf en de vorm van het beekdal (smal met diep ingesneden beek of breed met ondiepe beek) hebben invloed op het inundatiepatroon. Per maatregel is een ander event (herhalingstijd) maatgevend.

Door de locaties van de maatregelen en de invloedsfeer is de invloed op de bebouwde kernen beperkt gebleken. Het netto-effect van de maatregelen op de inundaties blijkt voornamelijk negatief (toename inundaties). Deze toename vindt vooral plaats buiten de woonkernen. Het algemene beeld is dat het effect van de maatregelen in de juiste richting is. Dus piekafvoer neemt af en de afvoergolf vertraagt, al is dit voor veel maatregelen beperkt. Het positieve effect op de waterstanden is nog kleiner. De piekafvoeren en -waterstanden zijn samengevat in Tabel 5.1 en Tabel 5.2.

De meest effectieve maatregel voor verlaging van de afvoerpiek en afvlakking van de afvoergolf lijkt verondieping van de beek. Wel gaat dit op veel locaties gepaard met waterstandsverhogingen, omdat de afvoercapaciteit van de beek wordt verkleind en de berging in het beekdal meer wordt benut. Deze maatregel is verhoudingsgewijs effectiever bij lagere herhalingstijden.

Verruwing van het beekdal zorgt voor een beperkte verlaging van de afvoerpiek en afvlakking van de afvoergolf. Ook deze maatregel gaat gepaard met waterstandsverhogingen op veel locaties in het beekdal. De maatregel heeft een groter effect bij hogere herhalingstijden, omdat het beekdal dan meer wordt benut.

De minst effectieve maatregel voor het afvlakken van de afvoergolf in deze studie is het aanbrengen van checkdams. Mogelijk heeft dit te maken met het beperkt aantal checkdams dat is overgebleven na analyse van de haalbaarheid. Hierdoor zijn veel locaties van checkdams afgevallen. De toepassing van checkdams (inclusief onderdoorgang) is alleen effectief op het moment dat het beekdal al inundeert. De maatregel lijkt effectiever bij hogere herhalingstijden.

Tabel 5.1 Overzicht piekafvoeren van alle maatregelen en events bovenstrooms van Valkenburg. In donkergroen de maatregel-event met het grootste effect. In lichtgroen de maatregel waarbij het meeste effect optreedt. In blauw het event waarbij het grootste effect optreedt per maatregel. Tussen haakjes is het verschil t.o.v. referentie weergegeven

Event	Referentie m ³ /s	Maatregel 17 m ³ /s	Maatregel 18 0,07 s/m ^{1/3} m ³ /s	Maatregel 18 0,1 s/m ^{1/3} m ³ /s	Maatregel 19 m ³ /s
T2	32,4	29,2 (-3,2)	32,3 (-0,1)	32,2 (-0,2)	32,4 (-0,0)
T10	53,5	51,0 (-2,5)	53,3 (-0,2)	52,5 (-1,0)	53,6 (+0,1)
T25	65,1	63,7 (-1,4)	64,5 (-0,6)	63,9 (-1,2)	65,0 (-0,1)
T100	100,3	98,4 (-1,9)	99,4 (-0,9)	99,0 (-1,3)	99,9 (-0,4)

Tabel 5.2 Overzicht piekwaterstanden van alle maatregelen en events bovenstrooms van Valkenburg. In donkergroen de maatregel-event met het grootste effect. In lichtgroen de maatregel waarbij het meeste effect optreedt. In blauw het event waarbij het grootste effect optreedt per maatregel. Tussen haakjes is het verschil t.o.v. referentie weergegeven

Event	Referentie m NAP	Maatregel 17 m NAP	Maatregel 18 0,07 s/m ^{1/3} m NAP	Maatregel 18 0,1 s/m ^{1/3} m NAP	Maatregel 19 m NAP
T2	69,11	68,99 (-0,12)	69,11 (-0,00)	69,10 (-0,01)	69,11 (-0,00)
T10	69,85	69,79 (-0,06)	69,83 (-0,02)	69,83 (-0,02)	69,86 (+0,01)
T25	70,19	70,17 (-0,02)	70,18 (-0,01)	70,17 (-0,02)	70,18 (-0,01)
T100	70,54	70,54 (-0,00)	70,54 (-0,00)	70,54 (-0,00)	70,54 (-0,00)

5.2 Aanbevelingen

De toepassing van checkdams moet verder worden uitgedacht. Gedurende deze studie zijn veel locaties van de oorspronkelijke kanskaart afgevallen, doordat locaties buiten het modelgebied vallen of op onlogische locaties in de beek liggen. Normaliter worden met een dergelijke maatregel veel dammetjes in de beek geplaatst zodat er sprake is van een cumulatief effect benedenstrooms. Nu is het aantal te beperkt en is er alleen hoogstens een lokaal effect zichtbaar. Bovendien stroomt bij de overgebleven locaties ook bij hogere herhalingsstijden de beek vaak onder de constructie door, waarmee de effectiviteit van een checkdam wegvalt. Dit kan worden voorkomen door de checkdam te combineren met een stuw in de beek.

REFERENTIES

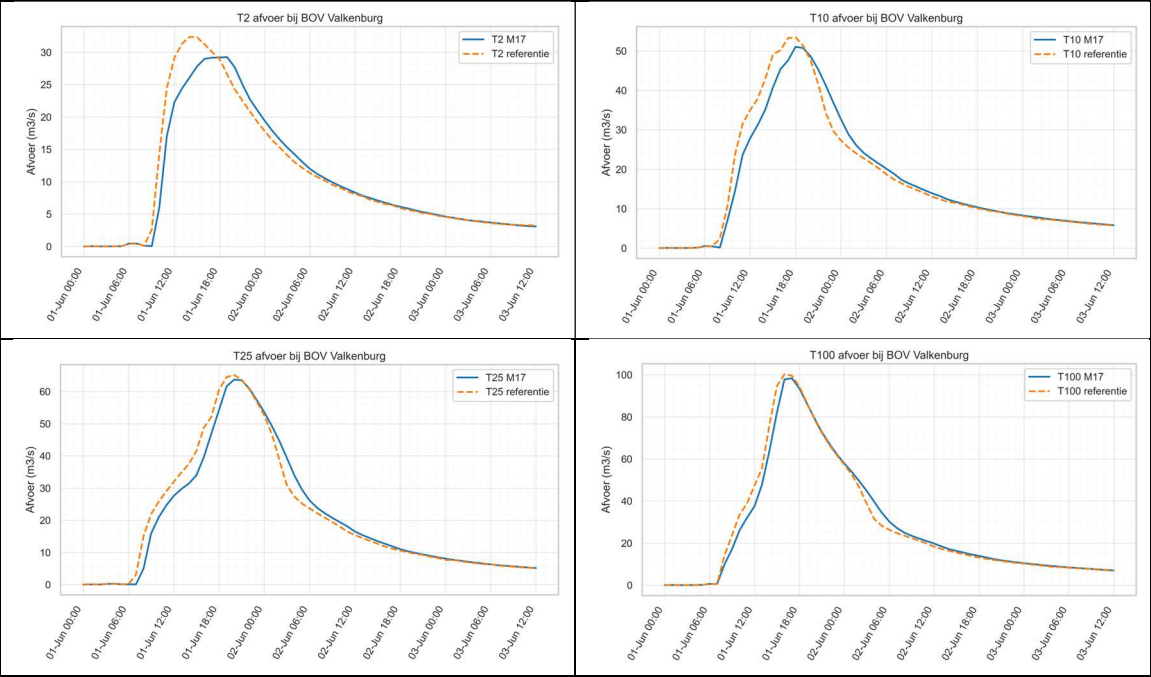
- 1 Bureau Stroming (2025). Kansenkaarten Nature-based Solutions Geuldal. Kleinschalige maatregelen op grote Schaal implementeren: de theoretische haalbaarheid op basis van landschap, hydrologie en planologie. 28 november 2025.
- 2 Document: NOK doorrekenen dalbodemmaatregelen: beschrijving maatregelen (2026) WRL.
- 3 Eindrapport: Vergroten afvoercapaciteit Geul (2025), HKV PR5470.10.
- 4 Watersysteemanalyse Geul (2024). Haskoning, BJ5167-RHD-XX-XX-RP-X-0001. 15 april 2024.
- 5 <https://natuurfkennis.nl/beheertypen>

Bijlage(n)

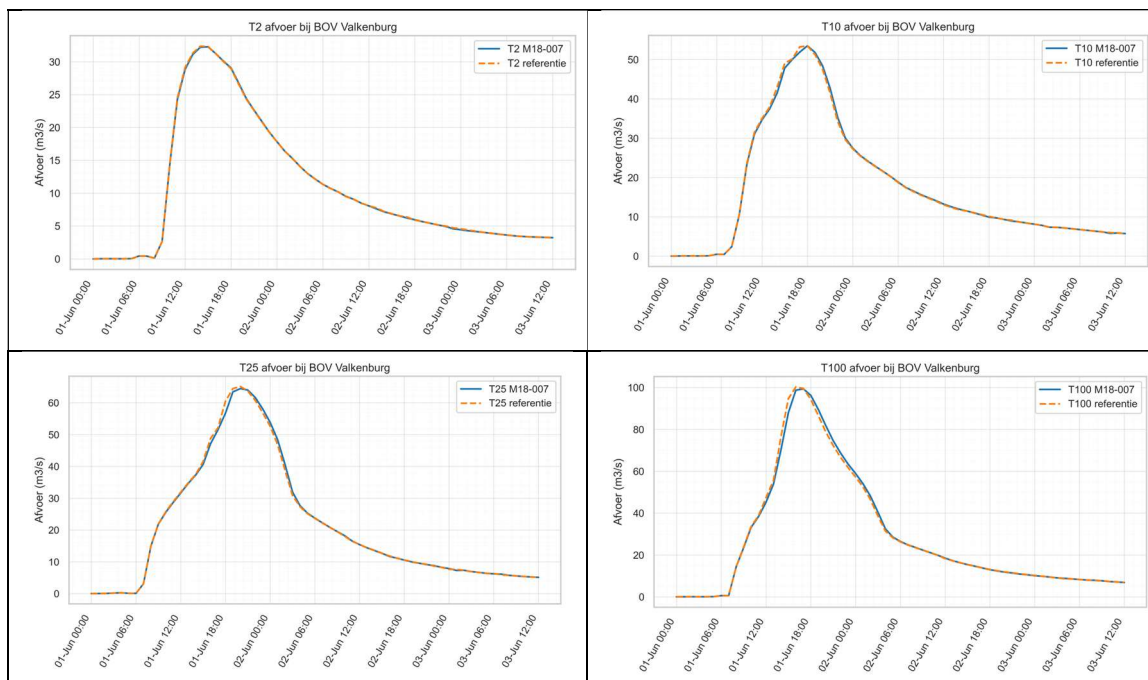


BIJLAGE: AFVOERGOLF BOVENSTROOMS VALKENBURG VOOR VERSCHILLENDE SCENARIO'S EN EVENTS

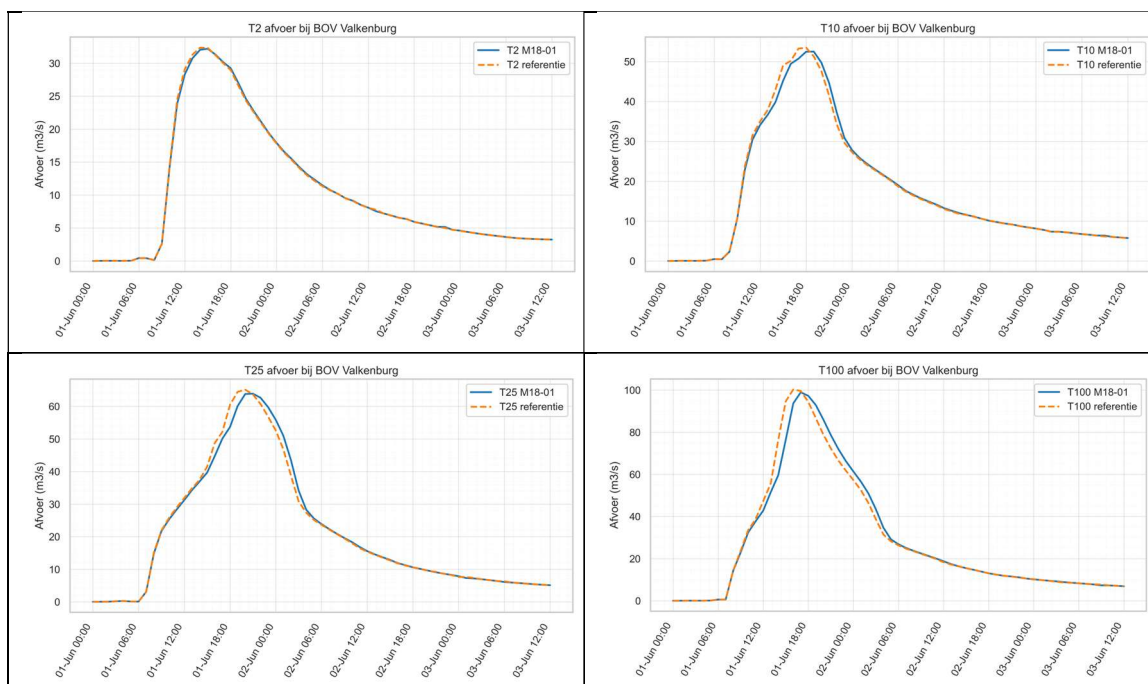
I.1 Maatregel 17



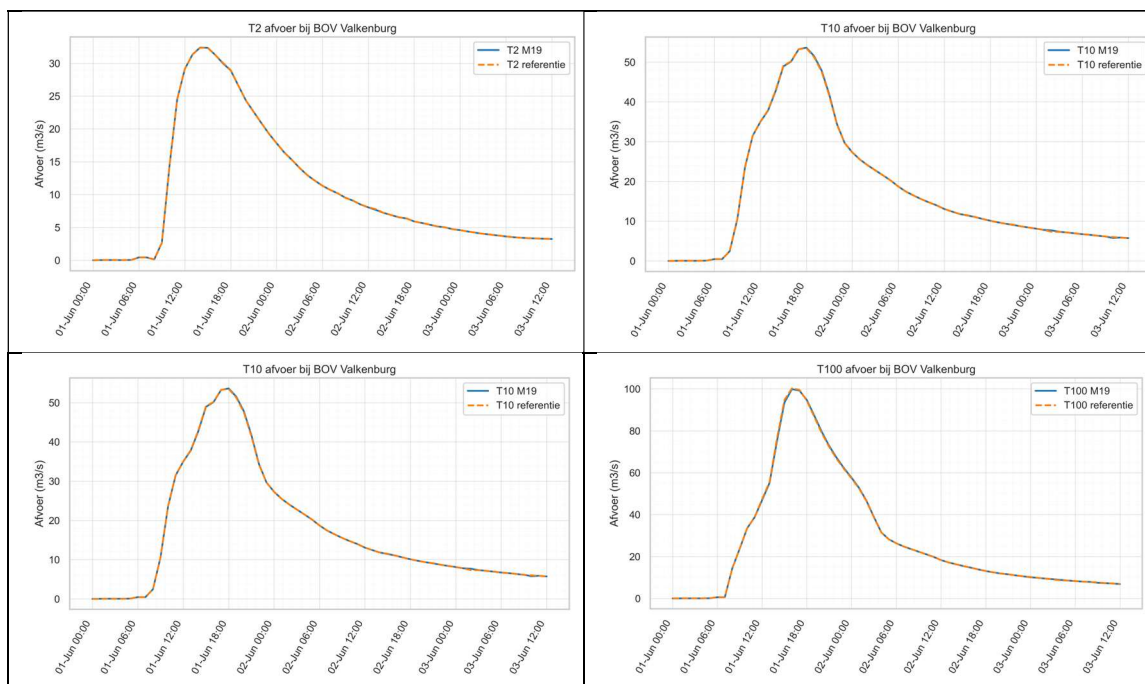
I.2 Maatregel 18: $0,07 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$



I.3 Maatregel 18: $0,1 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$



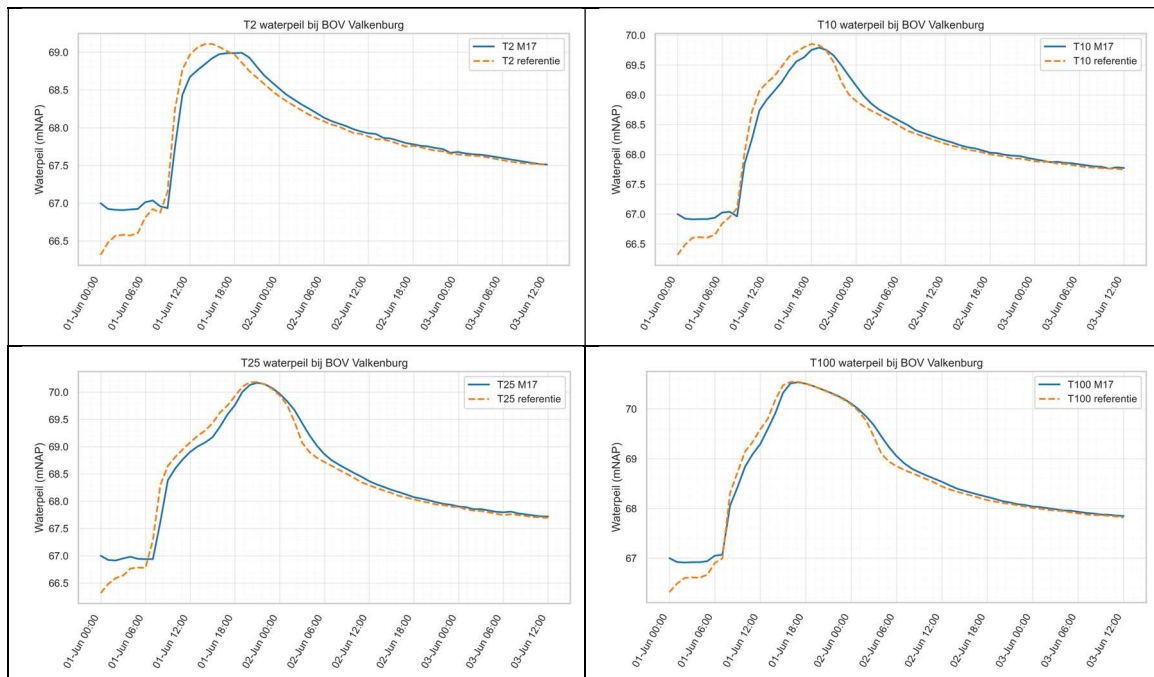
I.4 Maatregel 19



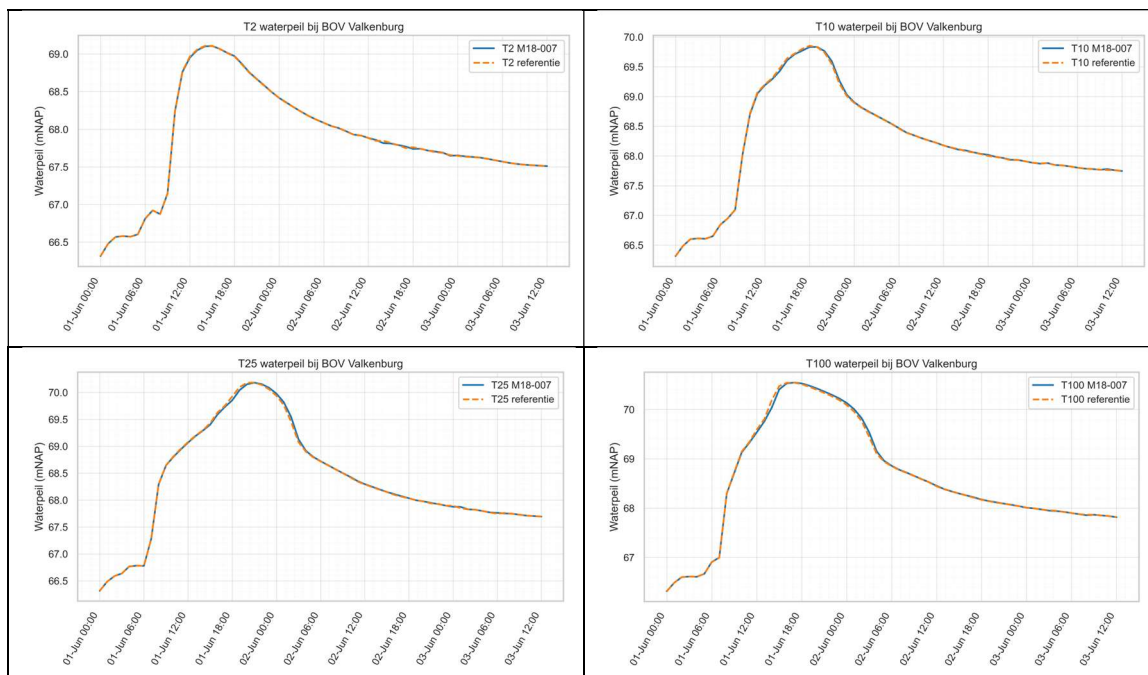


BIJLAGE: WATERSTANDSVERLOOP BOVENSTROOMS VALKENBURG VOOR VERSCHILLENDE SCENARIO'S EN EVENTS

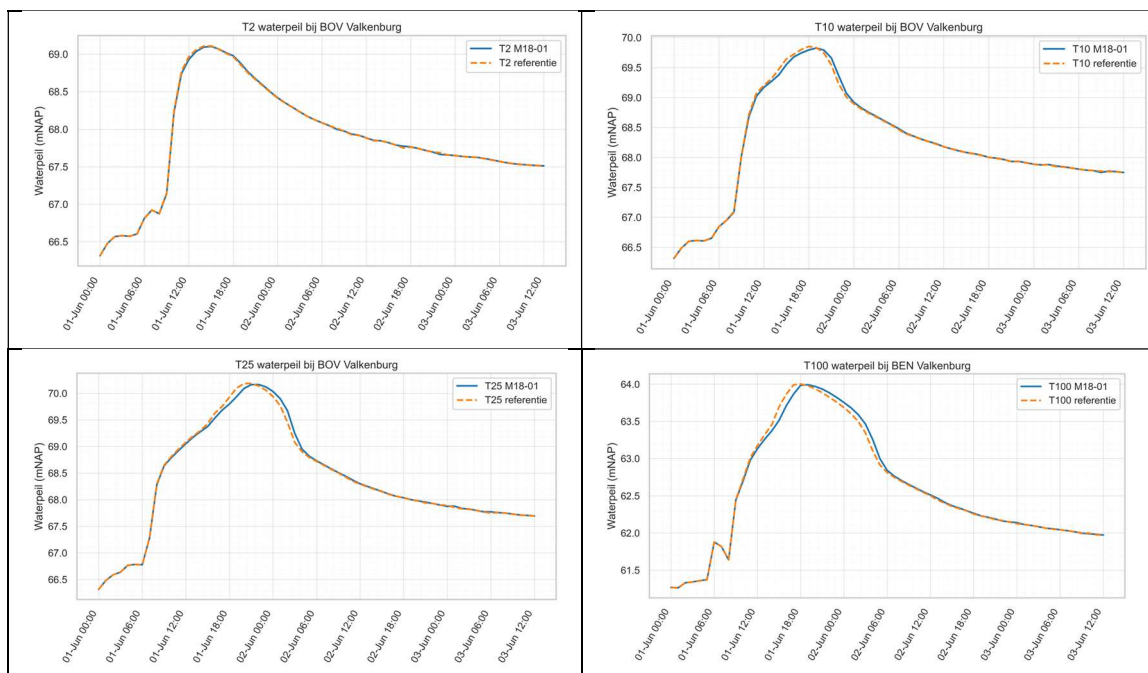
II.1 Maatregel 17



II.2 Maatregel 18: $0,07 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$



II.3 Maatregel 18: $0,1 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$



II.4 Maatregel 19

