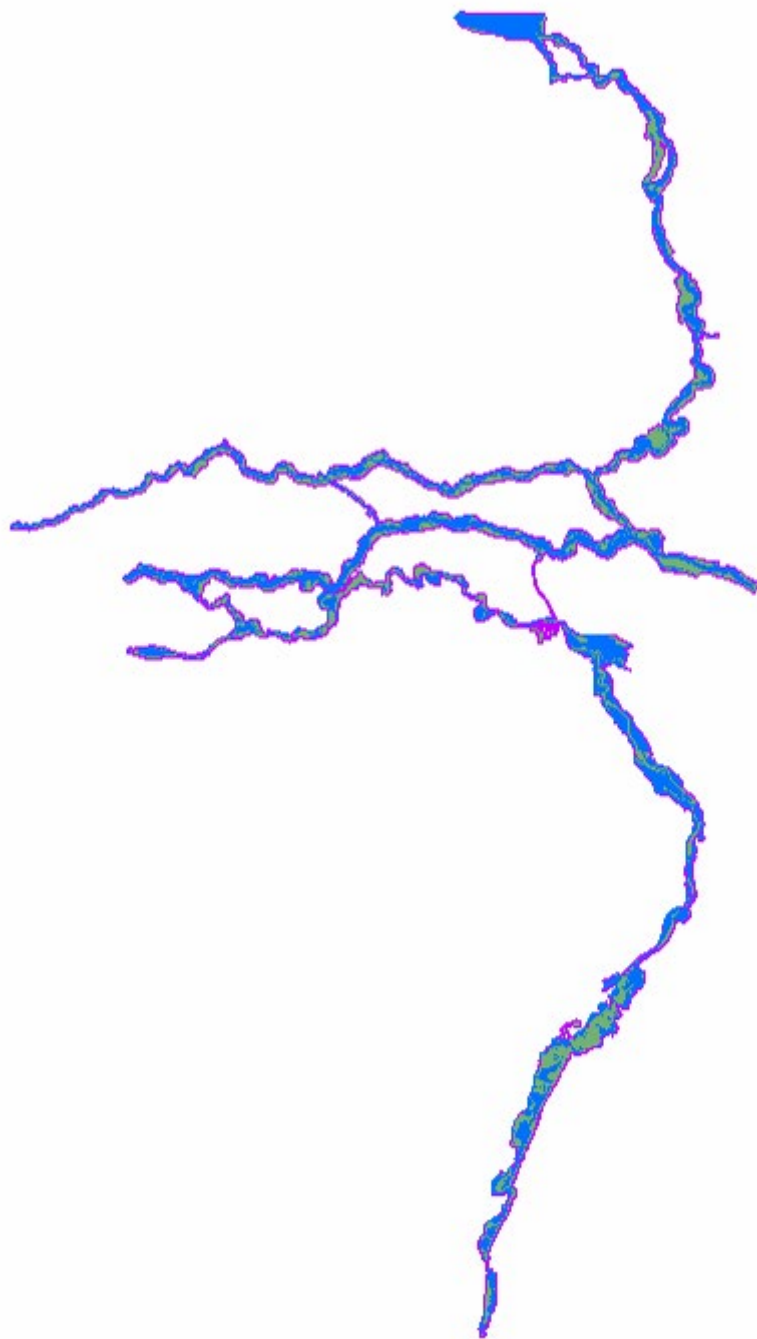


Infiltratie 6G D-Hydro

Gevoeligheidsanalyse Maas en Rijntakken



Opdrachtgever:	Stichting Deltares
Referentie opdrachtgever:	11209233-003-ZWS-0012
Referentie opdrachtnemer:	P0040.27
Versie:	Definitief (versie 1.0)
Datum:	23 december 2024

Colofon

Datum 23 december 2024
Status Definitief (versie 1.0)
Project P0040.27

	Naam	Paraaf	Datum
Auteurs	drs. R.C. Agtersloot		
Reviewers	dr. E.C. van der Deijl, W. de Lange, L. Suryawinata, D. Beijer		
Vrijgave	drs. J. Boon		

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
1.1	Achtergrond	3
1.2	Doel en aanpak	3
1.3	Leeswijzer	4
1.4	Projectteam	4
2	Te beoordelen aspecten infiltratie	5
2.1	Bouw van de infiltratiepolygoon	5
2.2	Varianten infiltratiepolygonen voor de Maas	7
2.3	Varianten infiltratiepolygonen voor de Rijntakken.....	8
2.4	Infiltratiesnelheid	8
3	Uitgangspunten simulaties Maas en Rijntakken	9
3.1	Uitgangspunten Maas.....	9
3.1.1	<i>Software en schematisatie</i>	9
3.1.2	<i>Hoogwater februari 2002</i>	9
3.2	Uitgangspunten Rijn	9
3.2.1	<i>Software en schematisatie</i>	9
3.2.2	<i>Hoogwater januari 2018</i>	10
3.3	Uitgevoerde simulaties	10
3.4	Resultaten	11
3.4.1	<i>Effecten op maximale (piek)waterstanden en afvoeren</i>	11
3.4.2	<i>Infiltratie zichtbaar in de tijdreeksen</i>	11
3.4.3	<i>Infiltratie zichtbaar in geïnundeerd oppervlak</i>	12
3.4.4	<i>Infiltratie zichtbaar in 2D-figuren</i>	12
4	Gevoeligheidsanalyse infiltratie Maas	15
4.1	Resultaten	15
4.1.1	<i>Effecten op maximale (piek)waterstanden</i>	15
4.1.2	<i>Effecten in de tijdreeksen van waterstanden, variatie in infiltratiesnelheid</i>	19
4.1.3	<i>Infiltratie zichtbaar in geïnundeerd oppervlak, variatie in infiltratiepolygoon en -snelheid</i> 21	
4.2	Samenvatting resultaten Maas.....	23
5	Gevoeligheidsanalyse infiltratie Rijntakken	25
5.1	Resultaten	25
5.1.1	<i>Effecten op maximale (piek)waterstanden</i>	25
5.1.2	<i>Infiltratie zichtbaar in de tijdreeksen</i>	31
5.1.3	<i>Infiltratie zichtbaar in geïnundeerd oppervlak</i>	35
5.2	Samenvatting resultaten Rijntakken.....	37
6	Conclusies en aanbevelingen	39
6.1	Conclusies.....	39
6.2	Aanbevelingen.....	40
7	Referenties	41

Bijlagen

Bijlage 1 [Python-script voor geautomatiseerd aanmaken infiltratiepolygonen](#)

Bijlage 2 [Presentatie van Deltares over script voor infiltratiepolygonen](#)

Figuren

Figuur 2-1 Van links naar rechts stappen 1), 2) en 3) uit het script voor geautomatiseerd aanmaken van een infiltratiepolygoon.....	6
Figuur 2-2 Resultaat van infiltratiepolygoon selectie op basis van waterdiepte (stap 5b).....	7
Figuur 3-1 Hoogwater februari 2002 en de vier geselecteerde perioden voor bepaling maximale waterstanden.....	9
Figuur 3-2 Korte afvoerreeks Dornick, hoogwater januari 2018 met twee intervallen.....	10
Figuur 3-3 Tijdreeksen (verschil in) waterstanden op de Maas bij rkm 90, drie varianten van infiltratiesnelheid (infiltratiepolygoon V4).....	12
Figuur 3-4 Tijdreeksen (verschil in) waterstanden op de Waal bij rkm 900, drie varianten van infiltratiesnelheid (infiltratiepolygoon V4).....	12
Figuur 3-5 Maas, geïnundeerd gebied aan eind simulatie, 12 dagen na laatste hoogwater piek.....	13
Figuur 3-6 Rijntakken, geïnundeerd gebied aan eind simulatie, 20 dagen na laatste hoogwater piek.....	14
Figuur 4-1 Waterstandseffecten langs de Maas tijdens de eerste piek.....	18
Figuur 4-2 Tijdreeksen van waterstandseffecten langs de Maas tijdens de eerste twee pieken, locatie rkm 140.....	19
Figuur 4-3 Tijdreeksen van waterstandseffecten langs de Maas tijdens de eerste twee pieken, locatie rkm 190.....	20
Figuur 4-4 Tijdreeksen van geïnundeerd oppervlak van de Maas.....	21
Figuur 5-1 Waterstandseffecten langs de Rijntakken tijdens de eerste piek, infiltratiepolygoon V0 ($h_{min} = 0,001$ m).....	27
Figuur 5-2 Waterstandseffecten langs de Rijntakken tijdens de eerste piek, infiltratiepolygoon V4 ($h_{min} = 0,001$ m).....	28
Figuur 5-3 Waterstandseffecten langs de Rijntakken tijdens de eerste piek, infiltratiepolygoon V4a ($h_{min} = 0,5$ m).....	29
Figuur 5-4 Waterstandseffecten langs de Rijntakken tijdens de eerste piek, infiltratiepolygoon V4b ($h_{min} = 1,0$ m).....	30
Figuur 5-5 Waterstandseffecten langs de Rijntakken met infiltratiepolygoon V0 ($h_{min} = 0,001$ m), drie locaties en drie infiltratiesnelheden.....	31
Figuur 5-6 Waterstandseffecten langs de Rijntakken met infiltratiepolygoon V4 ($h_{min} = 0,001$ m), drie locaties en drie infiltratiesnelheden.....	32
Figuur 5-7 Waterstandseffecten langs de Rijntakken met infiltratiepolygoon V4a ($h_{min} = 0,5$ m), drie locaties en drie infiltratiesnelheden.....	33
Figuur 5-8 Waterstandseffecten langs de Rijntakken met infiltratiepolygoon V4b ($h_{min} = 1,0$ m), drie locaties en drie infiltratiesnelheden.....	34
Figuur 5-9 Tijdreeksen van geïnundeerd oppervlak van de Rijntakken.....	35

Tabellen

Tabel 2.1 Verschillen in methode voor bepaling infiltratiepolygoon.....	5
Tabel 2.2 Varianten infiltratiepolygonen Maas.....	7
Tabel 2.3 Varianten infiltratiepolygonen Rijntakken.....	8
Tabel 3.1 Varianten van infiltratie, modellen Maas en Rijn.....	10
Tabel 4.1 Gemiddeld waterstandseffect (cm) per traject, alle varianten infiltratie-polygonen en -snelheden.....	17
Tabel 4.2 Samenvatting resultaten Maas, traject Grensmaas.....	23
Tabel 4.3 Samenvatting resultaten Maas, traject Zandmaas.....	23
Tabel 4.4 Samenvatting resultaten Maas, traject Bedijkte Maas.....	24
Tabel 5.1 Gemiddeld waterstandseffect per tak, alle varianten infiltratie-polygonen en -snelheden.....	26
Tabel 5.2 Samenvatting resultaten Rijntakken, riviertak Waal.....	37
Tabel 5.3 Samenvatting resultaten Rijntakken, riviertak Nederrijn/Lek.....	37
Tabel 5.4 Samenvatting resultaten Rijntakken, riviertak IJssel.....	38

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In het kader van de SITO Programmasubsidie IenW 2023 tussen Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS-WVL) en Deltares wordt binnen het thema Modellen Applicaties en Data (MAD) gewerkt aan het actueel en geschikt houden van het modelinstrumentarium. Binnen de deelprojecten MAD09 2023 - Hydraulica Schematisaties Zoet – Rijn en – Maas wordt gewerkt aan de modelschematisatie van de Rijntakken en Maas respectievelijk. Een wens ten behoeve van de RWSOS/voorspel modellen is dat uiterwaarden na een hoogwater weer leeglopen zonder dat een herstart van het model na het hoogwater nodig is. Dit leidt tot betere figuren (minder onterecht natte gebieden) en inundatie patronen.

In 2023 is in opdracht van Deltares door Agtersloot Hydraulisch Advies (AHA) een verkennend onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheid om infiltratie te gebruiken om in de D-Hydro modelschematisaties van de Rijn en Maas droogval te modelleren (Agtersloot, 2023). De conclusie uit dit onderzoek was dat infiltratie kan worden gebruikt voor de modellering van droogval in uiterwaarden, maar dat een aanvullende analyse nodig is om te bepalen hoe de gewenste effecten (droogvallende uiterwaarden) samenhangen met ongewenste effecten (een te grote verlaging van de piekwaterstanden). Daartoe heeft Deltares een nieuwe opdracht aan AHA gegeven, namelijk om door middel van een gevoeligheidsanalyse te bepalen of het mogelijk is om infiltratie toe te passen voor een zo snel mogelijke droogval van de uiterwaarden, met een minimalisering van de ongewenste effecten.

1.2 Doel en aanpak

Het doel is een gevoeligheidsanalyse naar de modellering van droogval door middel van infiltratie. Hiertoe worden de volgende aspecten van de infiltratie onderzocht:

1. De opzet/uitgangspunten van de droogvalpolygonen
2. De infiltratiesnelheid

Ad 1) Opzet/uitgangspunten van de infiltratiepolygonen

De infiltratiepolygonen zijn de gebieden waarbinnen de infiltratie wordt toegepast. In (Agtersloot, 2023) zijn deze polygonen handmatig gemaakt, maar inmiddels beschikt Deltares over een script waarmee de polygonen geautomatiseerd worden gemaakt. Door te variëren met instellingen van dit script kan worden gevarieerd met de grootte/licging van de infiltratiepolygonen.

Ad 2) Infiltratiesnelheid

Een hogere infiltratiesnelheid leidt tot een snellere droogval in de uiterwaarden, maar heeft tegelijkertijd een groter effect op de piekwaterstand. Door nu te variëren in de infiltratiesnelheid kan worden gekeken hoelang het duurt voordat sprake is van droogval en wat het effect is op de piekwaterstand.

Het is zeer goed mogelijk om uiterwaarden snel droog te krijgen door de infiltratiepolygonen en/of de infiltratiesnelheid te vergroten. Een ongewenst neveneffect hierbij is echter dat iedere vergroting steeds meer van invloed is op de piekwaterstand. Voor RWS is vooral de hoogte van eerste piek van belang, waarbij de uiterwaarden nog droog staan en de volledige bergende capaciteit beschikbaar is. Ook in deze situatie is infiltratie actief, maar dat zou dan niet mogen leiden tot een te grote afname van de piekwaterstand. In overleg met RWS is afgesproken dat de waterstandsverlaging van de eerste piek gemiddeld 3 cm mag bedragen.

De beperking met betrekking tot de maximale waterstandseffecten is vanzelfsprekend ook van invloed op de tijd die het duurt voordat een uiterwaard droogvalt. Een combinatie van infiltratiepolygoon en -snelheid voldoet als binnen een periode van ongeveer 6 weken de uiterwaarden voor 95% zijn drooggevallen.

Beide aspecten worden beoordeeld aan de hand van een geschikt hoogwater; het hoogwater van 2002 voor de Maas en het hoogwater van 2018 voor de Rijntakken.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de variaties die zijn gekozen voor de infiltratiepolygonen en infiltratiesnelheid. Hoofdstuk 3 beschrijft de uitgangspunten die zijn toegepast voor de D-Hydro simulaties van de Maas en Rijntakken. Vervolgens worden in Hoofdstuk 4 (Maas) en Hoofdstuk 5 (Rijntakken) de resultaten van de verschillende simulaties besproken. Tot slot zijn in de conclusies en aanbevelingen opgenomen in Hoofdstuk 6.

In het rapport worden de woorden 'infiltratiepolygoon' en 'infiltratiepolygonen' door elkaar gebruikt. Met deze woorden wordt hetzelfde aangeduid, namelijk een gebied waarbinnen infiltratie kan plaatsvinden. Met 'infiltratiepolygoon' wordt het totale gebied aangeduid wat wordt gekenmerkt door specifieke aspecten, bijvoorbeeld minimale waterdiepte. Een infiltratiepolygoon bestaat uit één of meerdere 'infiltratiepolygonen' die elkaar niet raken, en met elkaar het gehele gebied van de infiltratiepolygoon beschrijven.

1.4 Projectteam

De werkzaamheden zijn uitgevoerd door de Agtersloot Hydraulisch Advies (AHA). Namens AHA is Ron Agtersloot contactpersoon richting de opdrachtgever. Eveline van der Deijl heeft namens Deltares gewerkt aan de automatisering van de bouw van infiltratiepolygonen en de gevoeligheidsanalyse van het totale infiltratieoppervlak voor de keuze van een minimale waterdiepte of minimale oppervlakte binnen de infiltratiepolygonen.

Projectleider namens de opdrachtgever is Anna Kusters, met inhoudelijke begeleiding door Eveline van der Deijl. Vanuit Rijkswaterstaat Oost-Nederland (RWS-ON) is het project begeleid door Dénes Beyer, en vanuit Rijkswaterstaat Zuid-Nederland (RWS-ZN) door Lianita Suryawinata. Van RWS-WVL hebben William de Lange en Martin Scholten het project begeleid.

2 Te beoordelen aspecten infiltratie

Het effect van infiltratie wordt grotendeels bepaald door twee aspecten, de infiltratiepolygoon en de infiltratiesnelheid. In het algemeen zal een groter infiltratieoppervlak leiden tot grotere (gewenste en ongewenste) effecten op de waterstanden en afvoeren. Naast de grootte van de infiltratiepolygoon is ook de ligging van de infiltratiepolygoon van belang. Wanneer een infiltratiepolygoon in permanent nat en aangetakt water ligt (bijvoorbeeld een aangetakte plas) zal er altijd maximale infiltratie plaatsvinden en is het hydraulisch effect groter dan bij een grote infiltratiepolygoon in een gebied waar nooit water komt. Bij de infiltratiesnelheid geldt eveneens dat een grotere snelheid leidt tot een groter hydraulisch effect.

2.1 Bouw van de infiltratiepolygoon

In (Agtersloot, 2023) zijn de infiltratiepolygoonen voor een groot deel handmatig bepaald wat niet alleen veel tijd kost maar ook kan leiden tot een niet geheel reproduceerbaar proces. In 2024 is door Deltares een nieuwe methodiek opgezet om het bepalen van infiltratiepolygoonen zoveel mogelijk te automatiseren. Deze methode is door Deltares geïmplementeerd in een Python-script. Dit script (ontvangen op 22 april 2024) is opgenomen in Bijlage 1 van deze rapportage. In Tabel 2.1 zijn de belangrijkste verschillen opgesomd tussen de handmatige methode (Agtersloot, 2023) en de geautomatiseerde methode van Deltares.

Tabel 2.1 Verschillen in methode voor bepaling infiltratiepolygoon

Aspect	(Agtersloot, 2023)	Deltares
Permanent nat gebied	Op basis van de natte Baseline-ecotopen	Op basis van nat gebied bij een lage afvoer
Maximaal nat gebied	De gehele modelomtrek	Enkel de cellen die daadwerkelijk nat blijven na een (extreem) hoge afvoer
Ondergrens oppervlakte infiltratiepolygoon	4 Ha	Door gebruiker te bepalen
Selectie op basis van waterdiepte in polygoon	Niet mogelijk	Door gebruiker te bepalen

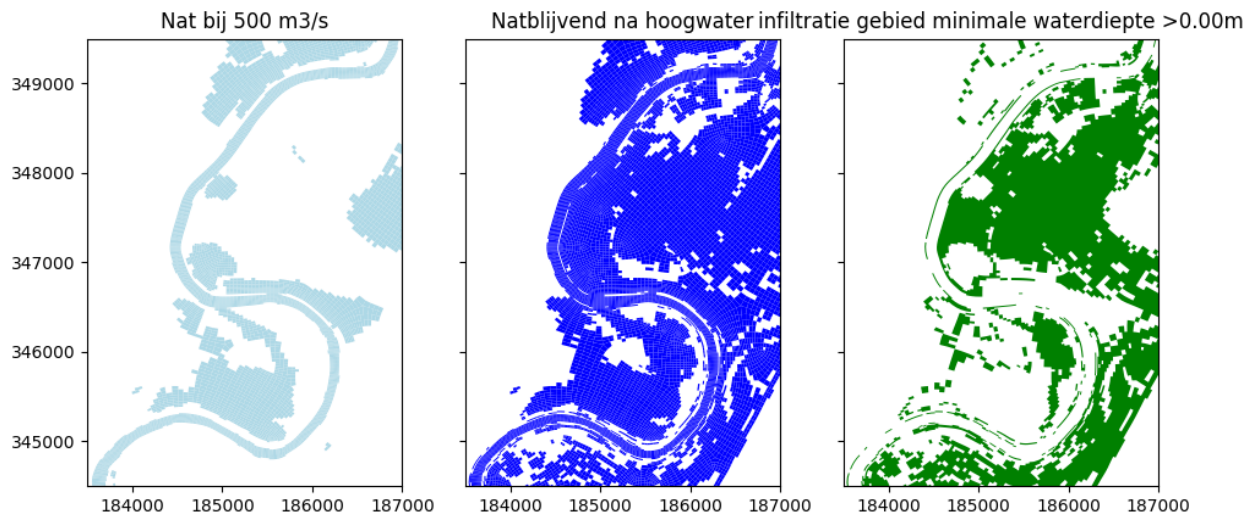
De geautomatiseerde methode zoals in dit project is toegepast voor de Maas en Rijntakken wordt hieronder beschreven.

Zoals is aangeduid in Tabel 2.1 maakt de methode gebruik van het resultaat van twee D-Hydro simulaties. De eerste simulatie gaat uit van een stationaire simulatie bij de gewenste minimale afvoer. Hier is gekozen voor 500 m³/s op de Maas en 5.000 m³/s op de Rijntakken. Dit is de basis voor het 'permanent nat gebied'. De tweede simulatie bevat het natte gebied na afloop van een extreem hoogwater, bijvoorbeeld een 1/1000 situatie. Na de hoogwaterpiek moet het hydraulisch model zoveel mogelijk leeg kunnen lopen, zodat duidelijk is waar water achterblijft in het model. Dit is de basis voor het 'maximaal nat gebied'.

Met de informatie uit de D-Hydro simulaties kan aansluitend volgens de onderstaande methode een infiltratiepolygoon worden bepaald:

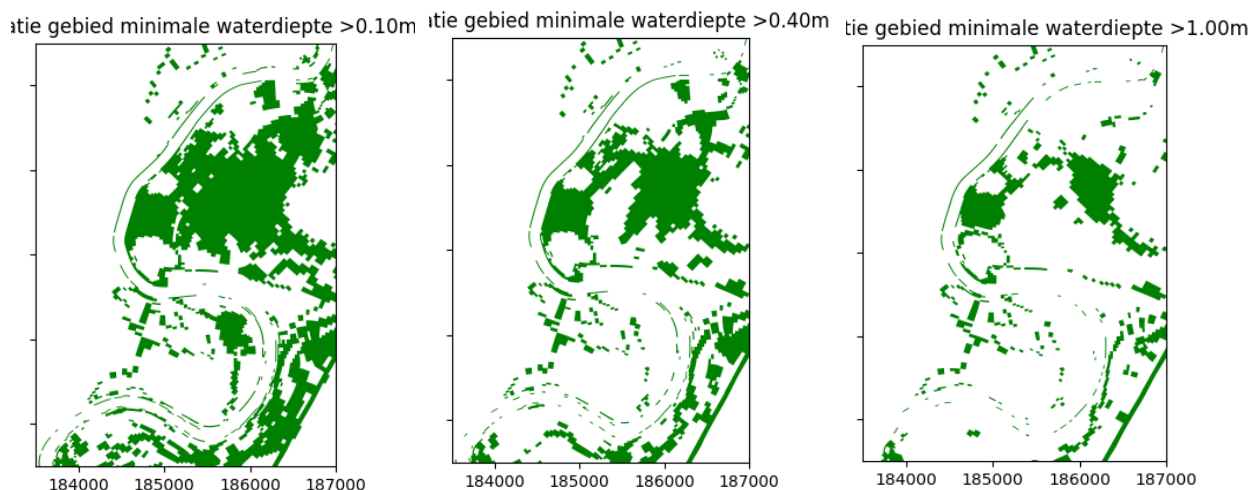
1. bepaling permanent nat gebied -> nat gebied, hydraulisch
2. bepaling maximaal nat gebied -> buitenrand infiltratiepolygoon
3. het gebied van 1) wordt geknipt uit het gebied van 2)
4. het resterende gebied is de infiltratiepolygoon
5. het aantal infiltratie polygoonen kan worden gefilterd op basis van:
 - a) minimaal oppervlak van de polygoon
 - b) minimale waterdiepte in de polygoon (op basis van de maximale waterdiepte van alle naast elkaar liggende rekencellen die met elkaar tot 1 polygoon zijn gecombineerd)

Bij het bepalen van de natte gebieden (stappen 1) en 2) uit de beschreven methode) gaat het script uit van een default waarde voor de waterdiepte van 0,001 m per rekencel. Enkel rekencellen met een waterdiepte groter dan deze default waarde worden als nat beschouwd. Deze natte rekencellen worden gebruikt bij het afleiden van de infiltratiepolygoon in stappen 3) en 4).



Figuur 2-1 Van links naar rechts stappen 1), 2) en 3) uit het script voor geautomatiseerd aanmaken van een infiltratiepolygoon

Bij het samenstellen van de infiltratiepolygoonen krijgt de infiltratiepolygoonen in stap 4) een waterdiepte toegekend die gelijk is aan de maximale waterdiepte van alle cellen die onderdeel zijn van deze infiltratiepolygoon. Vervolgens kan de gebruiker in stap 5) nog kiezen voor een hogere waterdiepte en/of minimaal oppervlak om te sturen in de uiteindelijke infiltratiepolygoon. Een hogere waarde voor waterdiepte en/of minimaal oppervlak leidt tot een kleinere infiltratiepolygoon. De default waarden in stap 5) zijn respectievelijk 0,001 m voor de waterdiepte en 0 m² voor de oppervlakte. Met andere woorden, bij de default waarden blijven alle infiltratiepolygoonen bestaan.



Figuur 2-2 Resultaat van infiltratiepolygoon selectie op basis van waterdiepte (stap 5b)

De mogelijkheid om te selecteren op basis van de oppervlakte van infiltratiepolygoon is ingebouwd omdat het vermoeden bestond dat meer infiltratiepolygoon zouden zorgen voor een toename van de rekentijd. En omdat de bijdrage aan infiltratie van kleine infiltratiepolygoon beperkt is, zou dit niet opwegen tegen de extra rekentijd. Uit testen is geconcludeerd dat het aantal infiltratiepolygoon echter niet van belang is, en dat kleine infiltratiepolygoon niet uitgesloten hoeven te worden als infiltratiegebied. Voor het minimale oppervlak kan dus de default waarde gebruikt worden.

Voor zowel de Maas als de Rijn is getest of de infiltratiepolygoon niet 'te groot' is en onverhoopt water onttrekt uit de rivier bij een afvoer gelijk aan de gebruikte afvoer voor de bepaling van het permanent natte gebied (respectievelijk 500 en 5.000 m³/s voor Maas en Rijn). Dit is niet het geval; een constante afvoer van 500 m³/s op de Maas blijft 500 m³/s als de infiltratiepolygoon actief is, en hetzelfde geldt voor de Rijn bij een afvoer van 5.000 m³/s.

2.2 Varianten infiltratiepolygoon voor de Maas

Voor de Maas zijn de volgende varianten van de infiltratiepolygoon gemaakt. Met de door Deltares geleverde polygoon V1x zijn wel simulaties uitgevoerd maar voor een goede vergelijking met de resultaten voor de Rijn worden de resultaten van deze simulaties niet gepresenteerd. De 'X' bij de infiltratiepolygoon heeft geen betrekking op de polygoon maar geeft aan welke infiltratiesnelheid aan de polygoon wordt toegekend (zie paragraaf 2.4).

Tabel 2.2 Varianten infiltratiepolygoon Maas

Code	Bouw	Beschrijving	Oppervlak (Ha)	Aantal
V0X	Handmatig	Identiek aan polygoon 2023	24.477*	137
V1X	Script v1	Geleverd door Deltares 16/04/2024	14.964	5.060
V4X	Script v2	Onttrekking in gebieden met minimale waterdiepte 0,001 m	10.408	3.224
V4Xa	Script v2	Onttrekking in gebieden met minimale waterdiepte 0,5 m	5.168	3.926
V4Xb	Script v2	Onttrekking in gebieden met minimale waterdiepte 1,0 m	2.877	3.453

* vanwege de gekozen buitengrens is het potentiële infiltratieoppervlak in deze methode van Agtersloot (2023) veel groter dan het daadwerkelijke infiltratieoppervlak. Er is gebruik gemaakt van een ondergrens van 4 Ha voor de infiltratiepolygoon.

2.3 Varianten infiltratiepolygonen voor de Rijntakken

Voor de Rijntakken zijn de volgende varianten van de infiltratiepolygonen gemaakt.

Tabel 2.3 Varianten infiltratiepolygonen Rijntakken

Code	Bouw	Beschrijving	Oppervlak (Ha)	Aantal
V0X	Handmatig	Identiek aan polygonen 2023	28.415*	48
V4X	Script v2	Onttrekking in gebieden met minimale waterdiepte 0,001 m	19.263	2931
V4Xa	Script v2	Onttrekking in gebieden met minimale waterdiepte 0,5 m	14.503	4479
V4Xb	Script v2	Onttrekking in gebieden met minimale waterdiepte 1,0 m	10.950	4345

* vanwege de gekozen buitengrens is het potentiële infiltratieoppervlak in deze methode van Agtersloot (2023) veel groter dan het daadwerkelijke infiltratieoppervlak. Er is gebruik gemaakt van een ondergrens van 4 Ha voor een infiltratiepolygonen.

De opmerking die in paragraaf 2.2 is gemaakt over het aantal infiltratiepolygonen en het verschil tussen de handmatige bouw en het script geldt ook voor de aantallen infiltratiepolygonen voor de Rijntakken.

2.4 Infiltratiesnelheid

Net als in (Agtersloot, 2023) is ook nu gekozen voor drie infiltratiesnelheden, te weten 100 mm/dag, 200 mm/dag en 300 mm/dag. In aansluiting op de codes van Tabel 2.2 en Tabel 2.3 komt dit terug als respectievelijk V01, V02 en V03 bij een infiltratiesnelheid van respectievelijk 100, 200 en 300 mm/dag met gebruik van infiltratiepolygoon V0. Voor de andere varianten van de infiltratiepolygonen geldt een vergelijkbare codering.

3 Uitgangspunten simulaties Maas en Rijntakken

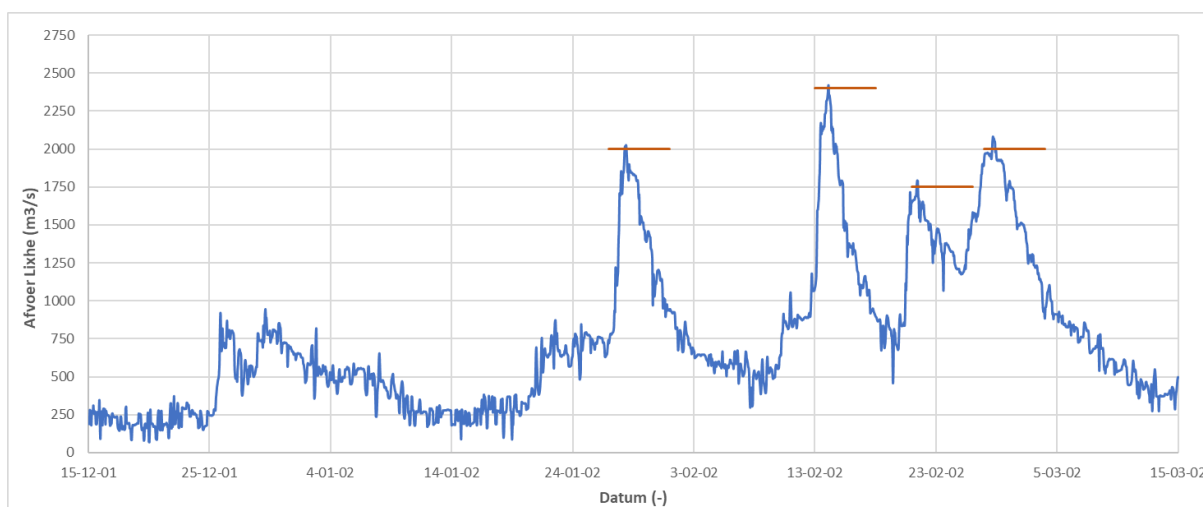
3.1 Uitgangspunten Maas

3.1.1 Software en schematisatie

De D-Hydro simulaties zijn uitgevoerd met delft3ddfm.2023.01 (dflowfm 1.2.167.141798) en RTC-versie 1.6.1.1230 op Linux-rekenclusters van AHA. De Maas-simulaties zijn uitgevoerd met het 2023 D-Hydro model van de Maas, dflowfm2d-maas-j23_6-v1a (Deltares, 2022). Dit model is door Deltares beschikbaar gesteld voor deze studie.

3.1.2 Hoogwater februari 2002

In overleg met de opdrachtgever is gekozen voor het hoogwater van 2002 (periode 15 december 2001 – 15 maart 2002) als testcase voor de Maas. Dit hoogwater kent vier verschillende pieken, die stuk voor stuk hoog genoeg zijn om de uiterwaarden te inunderen. Droogval van uiterwaarden tussen deze pieken zou dus een merkbaar effect op de waterstanden moeten hebben. Voor de verschillende pieken is een beoordeling gemaakt van de maximale waterstanden die bij de piek horen, en de tijdsperiode waarbinnen deze piek optreedt. Het volgende figuur laat de opgelegde tijdreeks van de afvoer bij Lixhe zien en de perioden waarbinnen de maximale waterstanden zijn bepaald.



Figuur 3-1 Hoogwater februari 2002 en de vier geselecteerde perioden voor bepaling maximale waterstanden

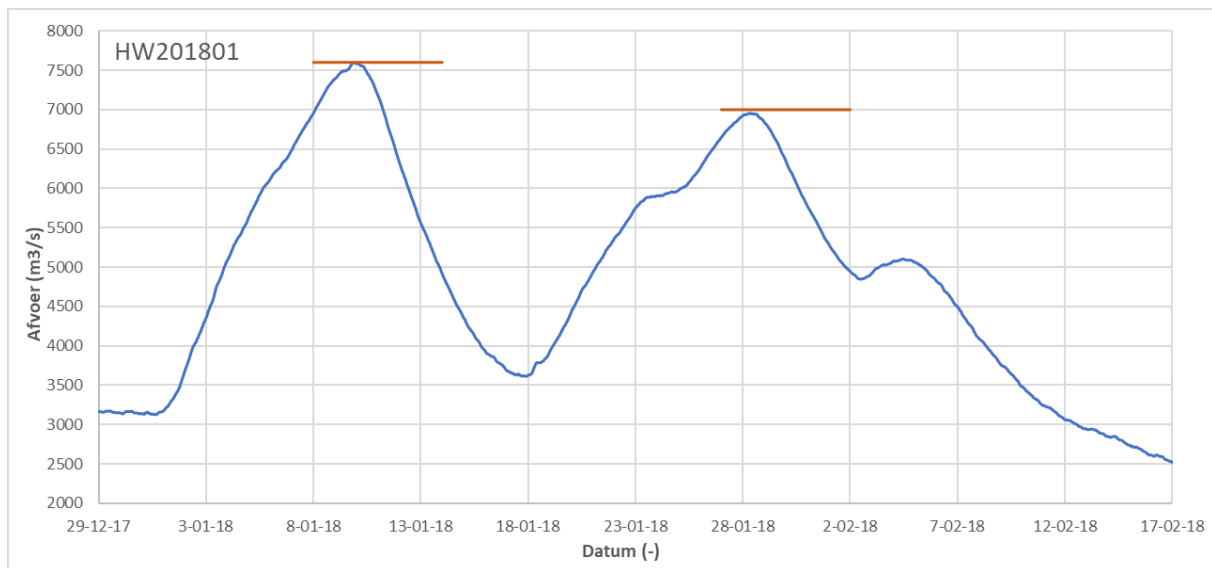
3.2 Uitgangspunten Rijn

3.2.1 Software en schematisatie

De D-Hydro simulaties zijn uitgevoerd met delftdfm.2023.01 (dflowfm 1.2.167.141798) met RTC-versie 1.6.1.1230 op Linux rekenclusters van AHA. De simulaties voor de Rijn zijn uitgevoerd met het 2022 D-Hydro model van de Rijntakken, dflowfm2d-rijn-j22_6-v1 (RWS, 2022). Dit model is door Deltares beschikbaar gesteld voor deze studie.

3.2.2 Hoogwater januari 2018

In overleg met de opdrachtgever is gekozen voor het hoogwater van 2018 als testcase. Dit hoogwater kent twee pieken, die beide hoog genoeg zijn om de uiterwaarden te inunderen. Droogval van uiterwaarden tussen deze pieken zou dus een merkbaar effect op de waterstanden tijdens de tweede piek moeten hebben. Uit de gehele hoogwaterperiode (1 december 2017 – 1 maart 2018) is de kortere periode 29 december 2017 – 17 februari 2018 gebruikt voor de simulatie. Binnen deze periode is vervolgens voor de beide pieken een beoordeling gemaakt van de maximale waterstanden. Het volgende figuur laat de opgelegde tijdreeks van de afvoer bij Dornick zien en de intervallen waarbinnen de maximale waterstanden zijn bepaald.



Figuur 3-2 Korte afvoerreeks Dornick, hoogwater januari 2018 met twee intervallen

3.3 Uitgevoerde simulaties

Er is sprake vier varianten van infiltratiepolygoon (zie paragraaf 2.2 en 2.3) en één referentiesituatie zonder infiltratie. Daarnaast is per infiltratiepolygoon gerekend met drie verschillende infiltratiesnelheden (zie paragraaf 2.4). Dit betekent dat voor zowel de Maas als de Rijn 13 simulaties zijn uitgevoerd. Tenslotte is voor vijf situaties gerekend met een verlengde simulatieduur van zes weken om een beter beeld te krijgen van de benodigde tijd voordat sprake is van voldoende droogval.

Voor zowel de Maas als de Rijn zijn voor de volgende combinaties van infiltratie-polygoon en -snelheden simulaties uitgevoerd, waarbij de extensie 'ex' betekent dat het een simulatie betreft met een verlengde simulatieduur van zes weken. Per model zijn dus 18 simulaties uitgevoerd.

Tabel 3.1 Varianten van infiltratie, modellen Maas en Rijn

Infiltratie-snelheid -polygoon	Geen infiltratie	100 mm/dag	200 mm/dag	300 mm/dag
Geen polygoon	V00 / V00ex	-	-	-
V0.	-	V01	V02	V03
V4.	-	V41 / V41ex	V42	V43 / V43ex
V4.a	-	V41a	V42a / V42aex	V43a
V4.b	-	V41b	V42b	V43b / V43bex

Alle 'V4' polygonen zijn gemaakt met het script voor automatische aanmaak van infiltratie-polygonen. Het onderscheidt tussen de infiltratiepolygonen betreft onttrekkingsgebieden:

V41/V42/V43	Onttrekking in gebieden met minimale waterdiepte 0,001 m
V41a/V42a/V43a	Onttrekking in gebieden met minimale waterdiepte 0,5 m
V41b/V42b/v43b	Onttrekking in gebieden met minimale waterdiepte 1,0 m

3.4 Resultaten

Het effect van infiltratie wordt op verschillende manieren in beeld gebracht. Er wordt gekeken naar de (maximale) waterstanden en afvoeren bij de verschillende pieken, tijdreeksen in de as van de rivieren, het geïnundeerd oppervlak en naar 2D-inundatie beelden tijdens het hoogwater. Dit alles geeft een beeld van het effect van het meenemen van infiltratie in de Maas en Rijntakken.

3.4.1 Effecten op maximale (piek)waterstanden en afvoeren

Om het effect van de infiltratie op de maximale waterstanden in beeld te brengen wordt voor vier (Maas) respectievelijk twee (Rijntakken) verschillende periodes een vergelijking gemaakt tussen de waterstanden van de varianten met infiltratie ten opzichte van de referentie zonder infiltratie.

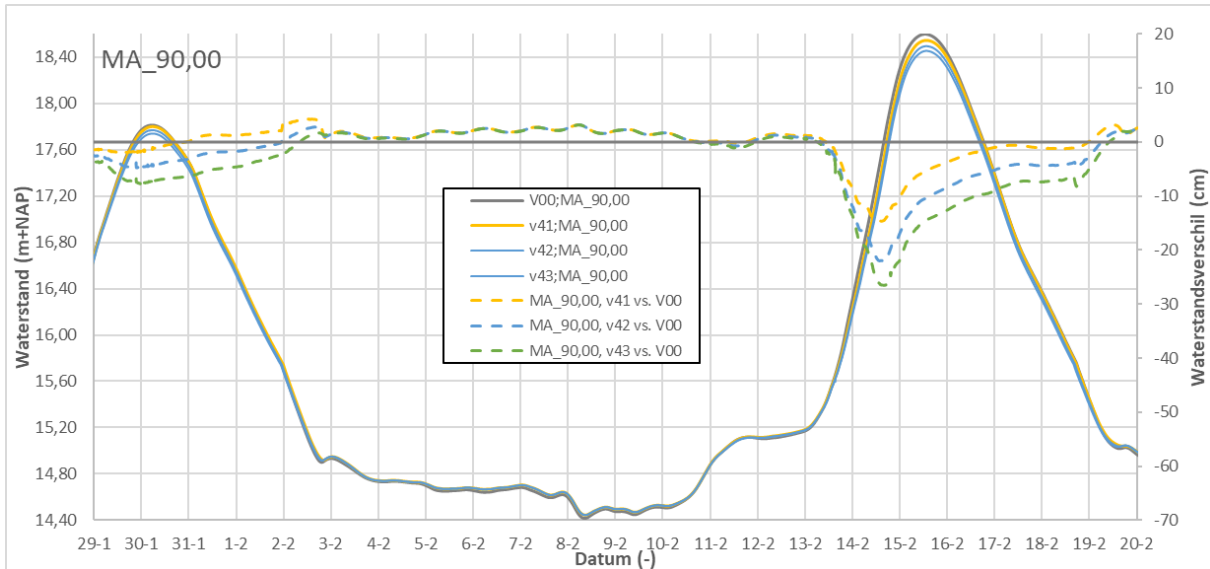
3.4.2 Infiltratie zichtbaar in de tijdreeksen

Per model zijn van alle 18 uitgevoerde simulaties tijdreeksen van waterstanden en afvoeren in één spreadsheet opgenomen om snel vergelijkingen tussen modellen en/of locaties te kunnen maken. Bij het verwerken van de resultaten bleek dat uitvoer op iedere rivierkilometer resulteerde in een spreadsheet van meer dan 1 Gb. Daarom is ervoor gekozen om niet voor iedere rivierkilometer de gegevens in de spreadsheet op te nemen, maar een selectie te gebruiken van de hele 10 kilometer locaties, dus rkm 10, rkm 20, rkm 30 etc. De onbewerkte data voor alle rivierkilometers is wel beschikbaar.

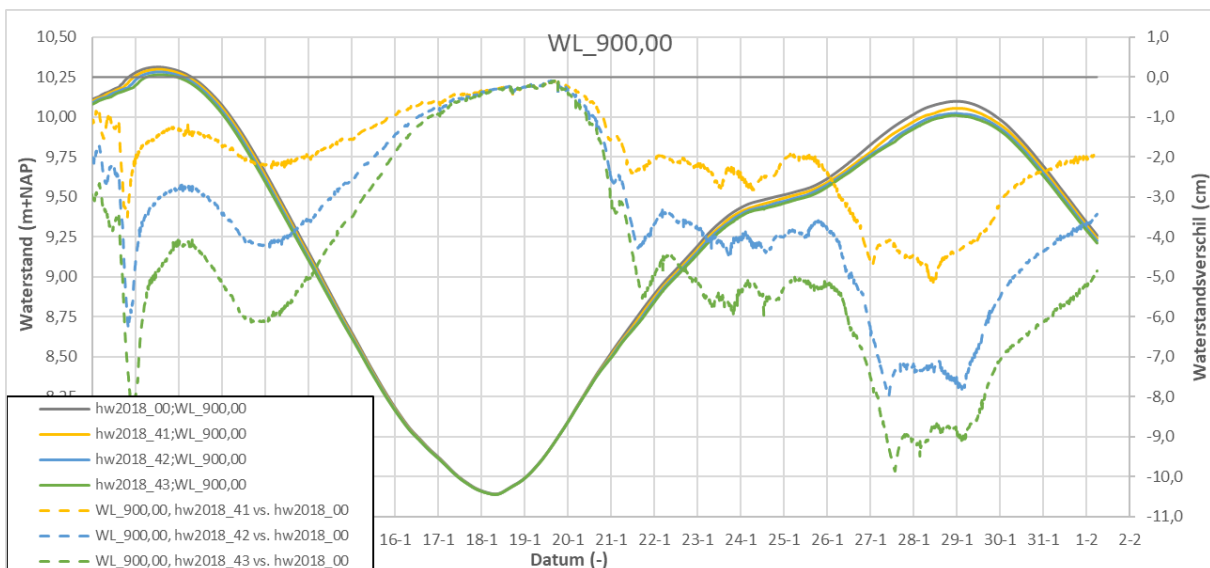
Door te kijken naar tijdreeksen van waterstanden in de as van de rivier is het mogelijk om te zien wanneer infiltratie in de uiterwaarden leidt tot een verschil in de as van de rivier. Hiervoor is een spreadsheet beschikbaar, *infiltratie_tijdreeksen_XXXX_20240917.xlsx* voor zowel de Maas als de Rijn. Hiermee kan de gebruiker per 10 km tijdreeksen tonen en verschillen van de varianten met infiltratie ten opzichte van de referentie zonder infiltratie in beeld brengen. Ter illustratie worden voor twee locaties deze tijdreeksen getoond.

In deze figuren is de volgende conventie gebruikt:

Referentiesituatie (geen infiltratie)	->	donkerblauw
Infiltratiesnelheid 100 mm/dag	->	lichtoranje/geel
Infiltratiesnelheid 200 mm/dag	->	lichtblauw
Infiltratiesnelheid 300 mm/dag	->	groen



Figuur 3-3 Tijdreeksen (verschil in) waterstanden op de Maas bij rkm 90, drie varianten van infiltratiesnelheid (infiltratiepolygoon V4)



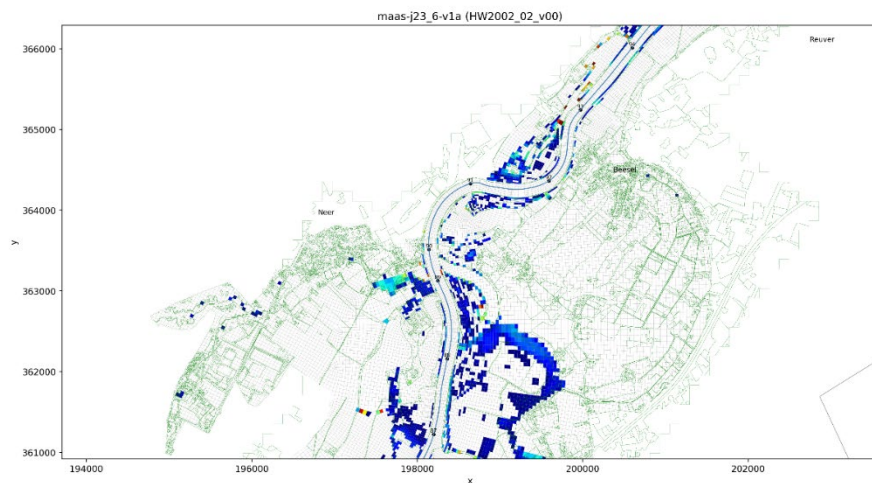
Figuur 3-4 Tijdreeksen (verschil in) waterstanden op de Waal bij rkm 900, drie varianten van infiltratiesnelheid (infiltratiepolygoon V4)

3.4.3 Infiltratie zichtbaar in geïnundeerd oppervlak

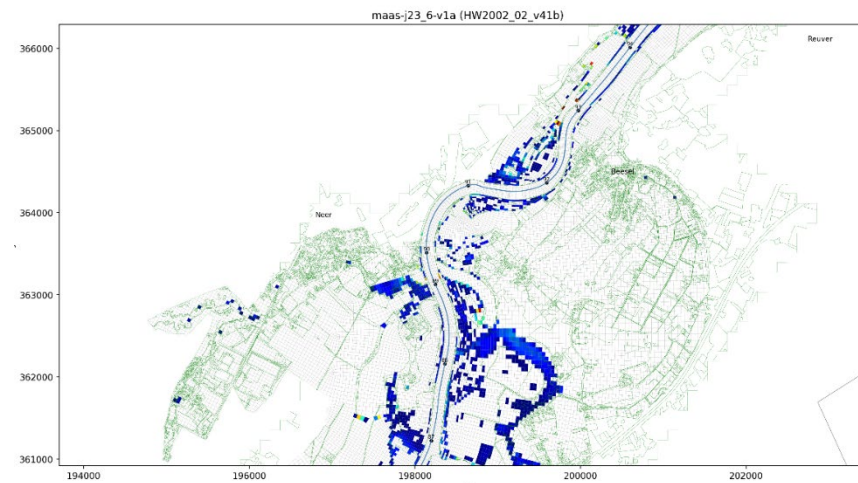
Door gedurende de loop van een simulatie uit te rekenen welk deel van het winterbed geïnundeerd is kan worden beoordeeld in hoeverre sprake is van (zo goed als) droge uiterwaarden.

3.4.4 Infiltratie zichtbaar in 2D-figuren

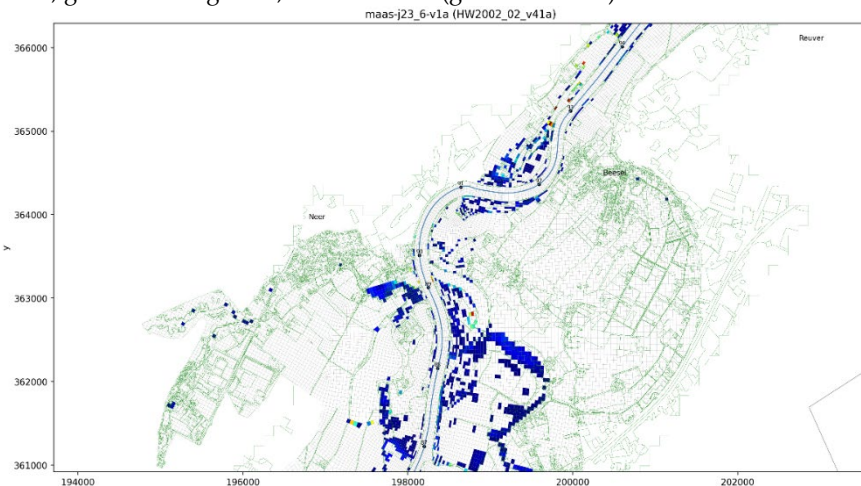
Voor de simulaties zijn figuren gemaakt van het natte gebied (exclusief de permanent natte gebieden) aan het eind van de simulatie. Voor de Maas gaat het om een kaartatlas van 35 kaartbladen per simulatie, bij de Rijn zijn het 44 kaartbladen per simulatie. Ter illustratie wordt voor vier situaties voor zowel de Maas (rkm 90) als de Waal (rkm 900) een afbeelding getoond van de 2D-figuren voor de varianten V00, V41, V41a en V41b. De volgorde van de afbeelding is van geen infiltratie (V00) naar veel infiltratie (V41).



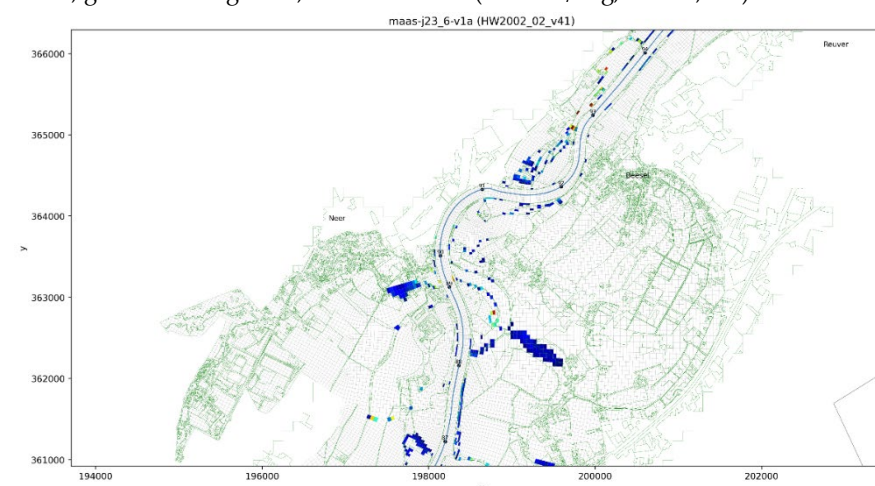
Maas, geïndeerd gebied, simulatie V00 (geen inundatie)



Maas, geïndeerd gebied, simulatie V41b (100 mm/dag, $h_{\min}=1,0$ m)

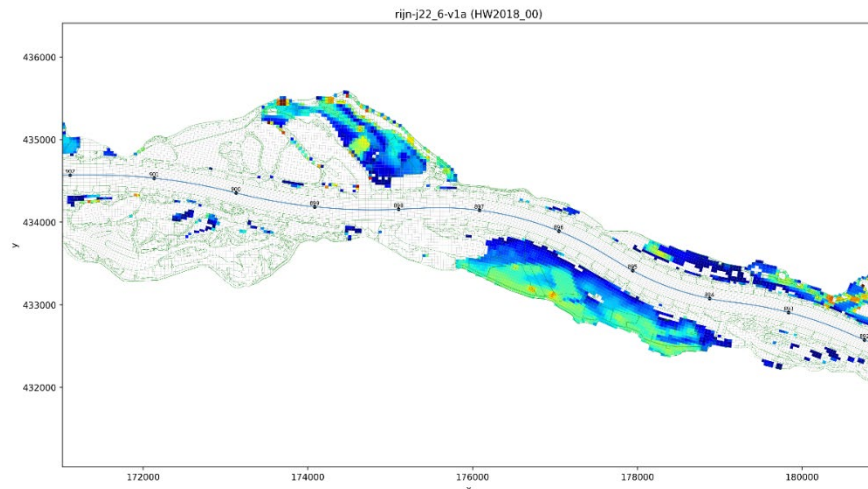


Maas, geïndeerd gebied, simulatie V41a (100 mm/dag, $h_{\min}=0,5$ m)

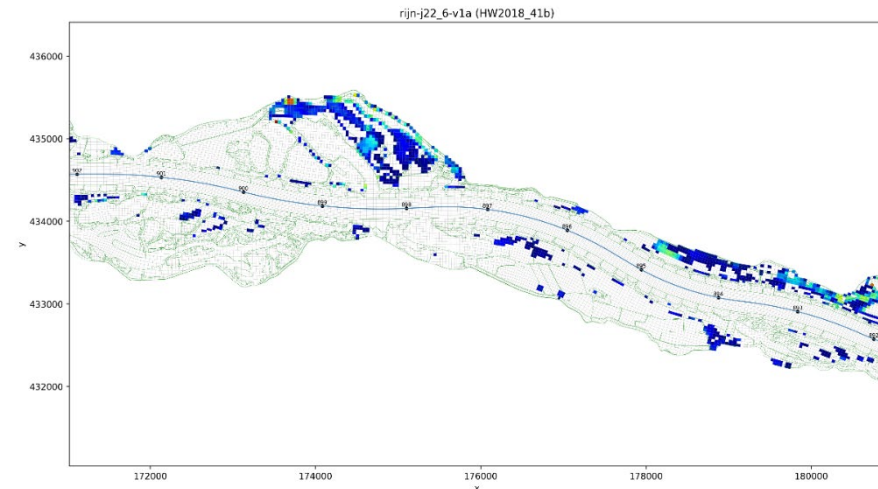


Maas, geïndeerd gebied, simulatie V41 (100 mm/dag, $h_{\min}=0,001$ m)

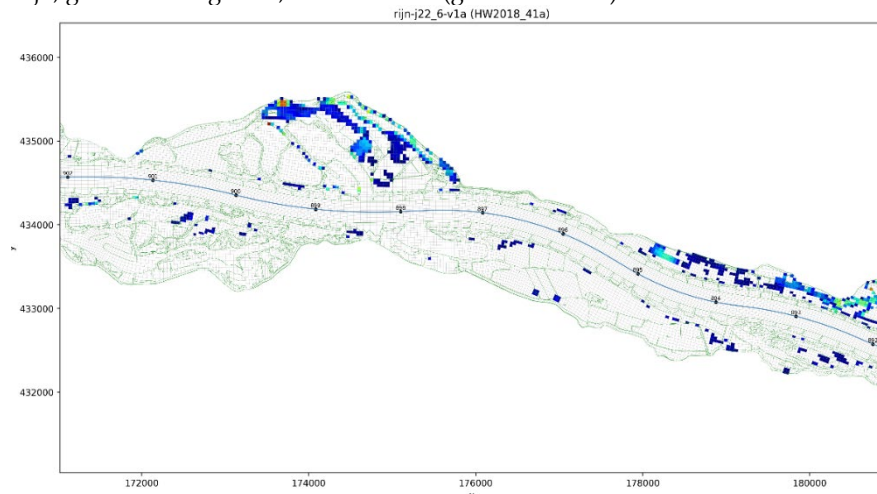
Figuur 3-5 Maas, geïndeerd gebied aan eind simulatie, 12 dagen na laatste hoogwater piek



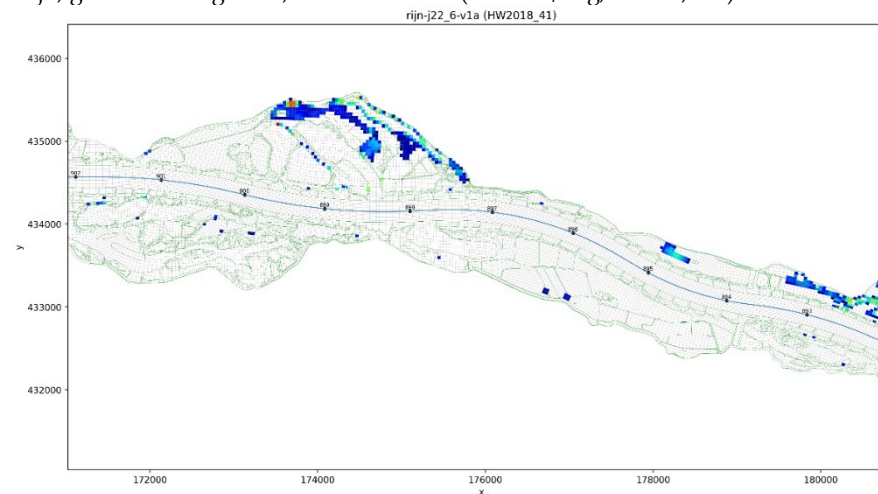
Rijn, geïnundeerd gebied, simulatie V00 (geen inundatie)



Rijn, geïnundeerd gebied, simulatie V41b (100 mm/dag, $h_{min}=1,0$ m)



Rijn, geïnundeerd gebied, simulatie V41a (100 mm/dag, $h_{min}=0,5$ m)



Rijn, geïnundeerd gebied, simulatie V41 (100 mm/dag, $h_{min}=0,001$ m)

Figuur 3-6 Rijntakken, geïnundeerd gebied aan eind simulatie, 20 dagen na laatste hoogwater piek

4 Gevoeligheidsanalyse infiltratie Maas

4.1 Resultaten

Het effect van infiltratie wordt op verschillende manieren in beeld gebracht. Er wordt gekeken naar de maximale waterstanden bij de verschillende pieken en tijdreeksen langs de as van de Maas, en het percentage geïnundeerd oppervlak van de uiterwaarden. Dit geeft een beeld van de gevoeligheid van het meenemen van infiltratie op de waterstanden in de Maas.

4.1.1 Effecten op maximale (piek)waterstanden

Om het effect van de infiltratie op de maximale waterstanden in beeld te brengen wordt voor de vier verschillende perioden een vergelijking gemaakt tussen de waterstanden van de varianten met infiltratie ten opzichte van de referentie zonder infiltratie.

Zoals in paragraaf 3.4.1 aangegeven is vanwege het grote aantal varianten van infiltratie 'beknibbeld' op de presentatie van de resultaten in een spreadsheet. Door enkel te kijken naar de resultaten per 10 km is de spreadsheet met resultaten 'slechts' 300 Mb groot en daarmee kunnen nog figuren/tabellen worden gemaakt. Om de tabellen en figuren te kunnen presenteren zijn deze in landscapeformaat opgenomen op de volgende pagina's.

Het is duidelijk zichtbaar dat een hogere infiltratiesnelheid leidt tot een grote verlaging van de piekwaterstanden, en dat het effect tijdens de tweede hoogwaterpiek groter is dan tijdens de eerste hoogwaterpiek. Dit is zichtbaar in de volgende vier figuren en ook kort samengevat in de onderstaande tabel. Hierbij is per traject de gemiddelde waterstandsverlaging berekend. De kleuren in de tabel komen overeen met de kleuren van de varianten in de figuren.

Op de Grensmaas is bij alle pieken sprake van een bijna lineair verband tussen het waterstandseffect en de grootte van de infiltratiesnelheid. Dat kan verklaard worden uit het feit dat er relatief weinig water in de uiterwaarden achterblijft. Hierdoor is het aandeel onttrekking (tijdens de periode dat de Maas zo hoog staat dat de uiterwaarden inunderen) belangrijk voor het totale volume dat wordt onttrokken. Omdat de tijdsduur in alle varianten vergelijkbaar is, is de mate van onttrekking evenredig met de grootte van de infiltratie.

Bij de eerste piek is op de trajecten Zandmaas en Bedijkte Maas sprake van een bijna lineair verband tussen het waterstandseffect en de mate van infiltratie. Dat kan verklaard worden uit het feit dat er enkel wordt gekeken naar het effect tot aan het moment van optreden van de eerste piek. Het vullen van de uiterwaarden zal in het algemeen veel sneller gebeuren dan de snelheid waarmee het water modelmatig infiltreert. Er is dus voldoende water beschikbaar om ook de hoogste infiltratiesnelheid (300 mm/dag) volledig te benutten. Bij 300 mm/dag kan dus drie keer zoveel water infiltreren als bij 100 mm/dag, en daarmee is een bijna drie keer zo groot effect op de waterstanden verklaarbaar.

Bij de tweede piek is (per traject en mate van infiltratie) het effect altijd groter dan bij de eerste piek aangezien er door de infiltratie voorafgaand aan de tweede piek weer extra bergend volume beschikbaar is gekomen. Verder komt de afvoer na de eerste hoogwaterpiek vrijwel niet meer onder de 500 m³/s, en daarmee is er continue infiltratie aanwezig. Dit verklaart waarom een hogere infiltratiesnelheid leidt tot een groter waterstandseffect. Bij de derde piek is het beeld diffuus, er is geen hele duidelijke relatie meer tussen trajecten, infiltratie en het waterstandseffect. Bij de vierde piek zijn de waterstandseffecten het grootst, en is vooral op de Bedijkte Maas sprake van een grote waterstandsverlaging.

In de komende figuren/tabellen is de volgende conventie gebruikt:

Referentiesituatie (geen infiltratie)	->	donkerblauw
Infiltratiesnelheid 100 mm/dag	->	lichtoranje/geel
Infiltratiesnelheid 200 mm/dag	->	lichtblauw
Infiltratiesnelheid 300 mm/dag	->	groen

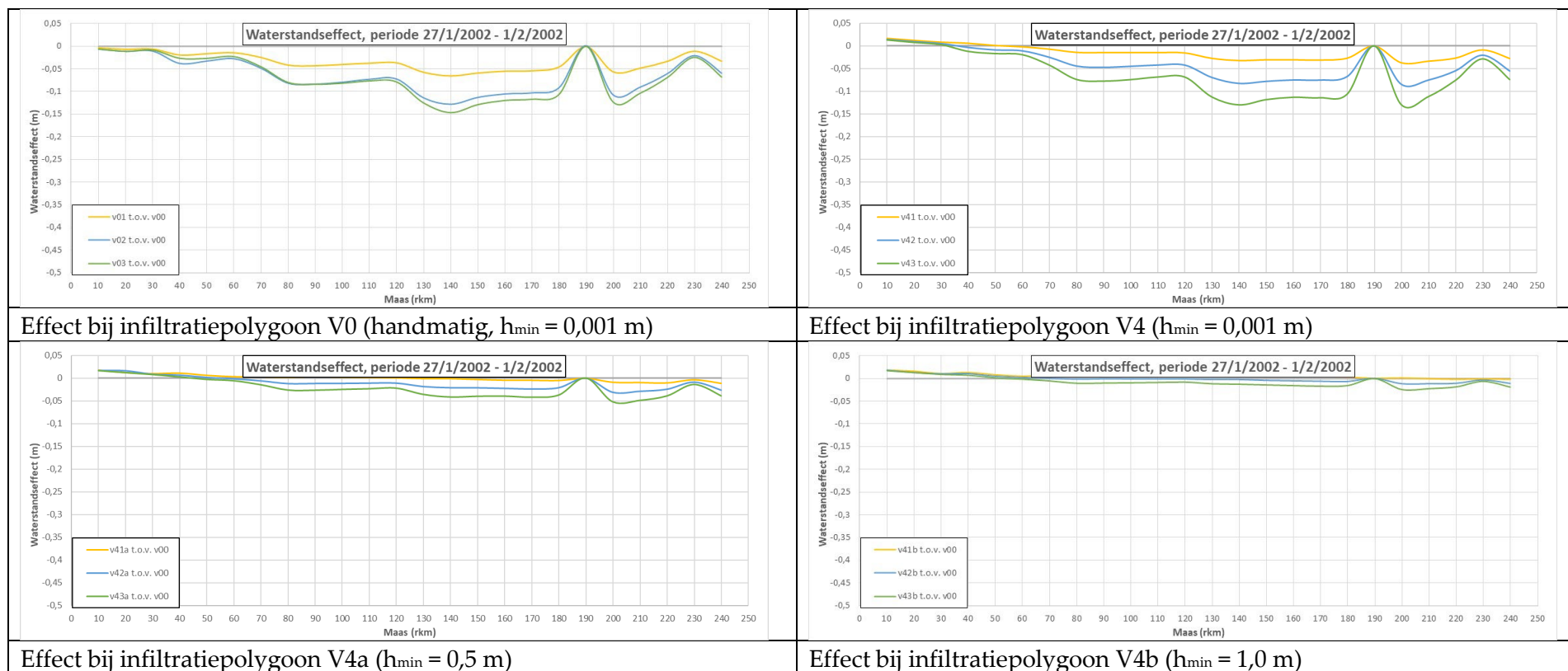
De ligging en afmetingen van de infiltratiepolygoon bepaald in welke mate een uiterwaard daadwerkelijk 'leeg' kan lopen, of dat er toch water achterblijft. Uit de simulaties blijkt dat infiltratiepolygoon V4 in dat opzicht een beter (droger) resultaat geeft dan bijvoorbeeld infiltratiepolygoon V0. Als een infiltratiepolygoon optimaal functioneert, is het de infiltratiesnelheid die bepaalt hoelang het duurt voordat de uiterwaard ook daadwerkelijk droog is. Andersom geldt dat bij een niet optimale infiltratiepolygoon een uiterwaard nooit geheel droog zal worden, hoe hoog de infiltratiesnelheid ook wordt gekozen.

Tabel 4.1 Gemiddeld waterstandseffect (cm) per traject, alle varianten infiltratie-polygoon en -snelheden

Piek	Traject	Rkm	Infiltratiepolygoon V0			Infiltratiepolygoon V4			Infiltratiepolygoon V4a			Infiltratiepolygoon V4b		
			100 mm/dag	200 mm/dag	300 mm/dag	100 mm/dag	200 mm/dag	300 mm/dag	100 mm/dag	200 mm/dag	300 mm/dag	100 mm/dag	200 mm/dag	300 mm/dag
1 ^e	Grensmaas	3 – 67	-1,3	-2,6	-2,1	0,5	-0,2	-1,0	0,9	0,6	0,2	1,1	0,8	0,6
	Zandmaas	68 – 150	-4,9	-9,5	-10,2	-2,1	-5,8	-9,3	0,0	-1,5	-3,1	0,6	-0,2	-1,2
	Bedijkte Maas	151 - 247	-3,6	-6,7	-7,6	-2,4	-5,4	-8,0	-0,7	-2,0	-3,4	0,0	-0,8	-1,6
2 ^e	Grensmaas	3 – 67	-2,1	-3,8	-3,7	-0,3	-1,6	-2,7	0,4	-0,3	-0,9	0,7	0,1	-0,3
	Zandmaas	68 – 150	-8,4	-14,4	-16,5	-6,9	-12,3	-17,1	-3,6	-6,7	-9,1	-1,5	-3,7	-5,3
	Bedijkte Maas	151 - 247	-7,7	-12,1	-14,5	-7,4	-12,1	-16,0	-4,1	-7,0	-9,2	-1,7	-3,6	-5,1
3 ^e	Grensmaas	3 – 67	-1,5	-2,9	-2,3	1,0	-0,1	-1,2	1,5	0,7	0,0	1,8	1,3	0,7
	Zandmaas	68 – 150	-6,6	-10,9	-11,3	-4,7	-9,2	-13,3	-1,3	-4,7	-7,2	0,3	-1,6	-3,5
	Bedijkte Maas	151 - 247	-4,1	-6,5	-7,1	-4,0	-7,1	-9,5	-1,8	-4,1	-5,9	-0,6	-1,9	-3,1
4 ^e	Grensmaas	3 – 67	-2,3	-3,9	-3,8	-1,2	-2,4	-3,5	-0,4	-1,3	-1,8	0,1	-0,7	-1,2
	Zandmaas	68 – 150	-11,2	-18,0	-20,4	-9,9	-15,7	-19,9	-5,4	-9,4	-11,8	-2,2	-5,1	-7,3
	Bedijkte Maas	151 - 247	-17,5	-25,9	-29,6	-16,2	-24,5	-30,1	-9,5	-15,3	-19,1	-3,9	-8,4	-11,6

Zoals eerder benoemd is het belangrijk dat enerzijds de infiltratiesnelheid voldoende hoog is om uiterwaarden droog te laten vallen, maar mag anderzijds het effect op de piekafvoeren niet te groot worden. Dit is vooral van belang bij de eerste piek, waarbij de uiterwaarden nog droog staan en de volledige bergende capaciteit beschikbaar is. Ook in deze situatie is infiltratie actief maar dat zou dan niet mogen leiden tot een te grote afname van de piekwaterstand. In overleg met RWS is afgesproken dat de waterstandsverlaging van de eerste piek maximaal 3 cm mag bedragen. Voor de Maas voldoen de varianten V41, V41a, V42a en de drie varianten V4.b aan dit waterstandseffect.

Dat het effect bij de volgende pieken groter wordt kan worden verklaard uit het feit dat in het referentiemodel sprake is van gevulde uiterwaarden, en de modellering van infiltratie zorgt voor het beschikbaar komen van bergende capaciteit bij een volgende piek. Dit is ook het beoogde effect van de modellering van infiltratie, en dat hierdoor het effecten van latere pieken groter is dan het effect bij de eerste piek is dan ook een verwacht bijeffect. Mogelijk dat de resultaten van een tweede piek al anders zouden zijn als de tweede piek individueel zou zijn gesimuleerd.



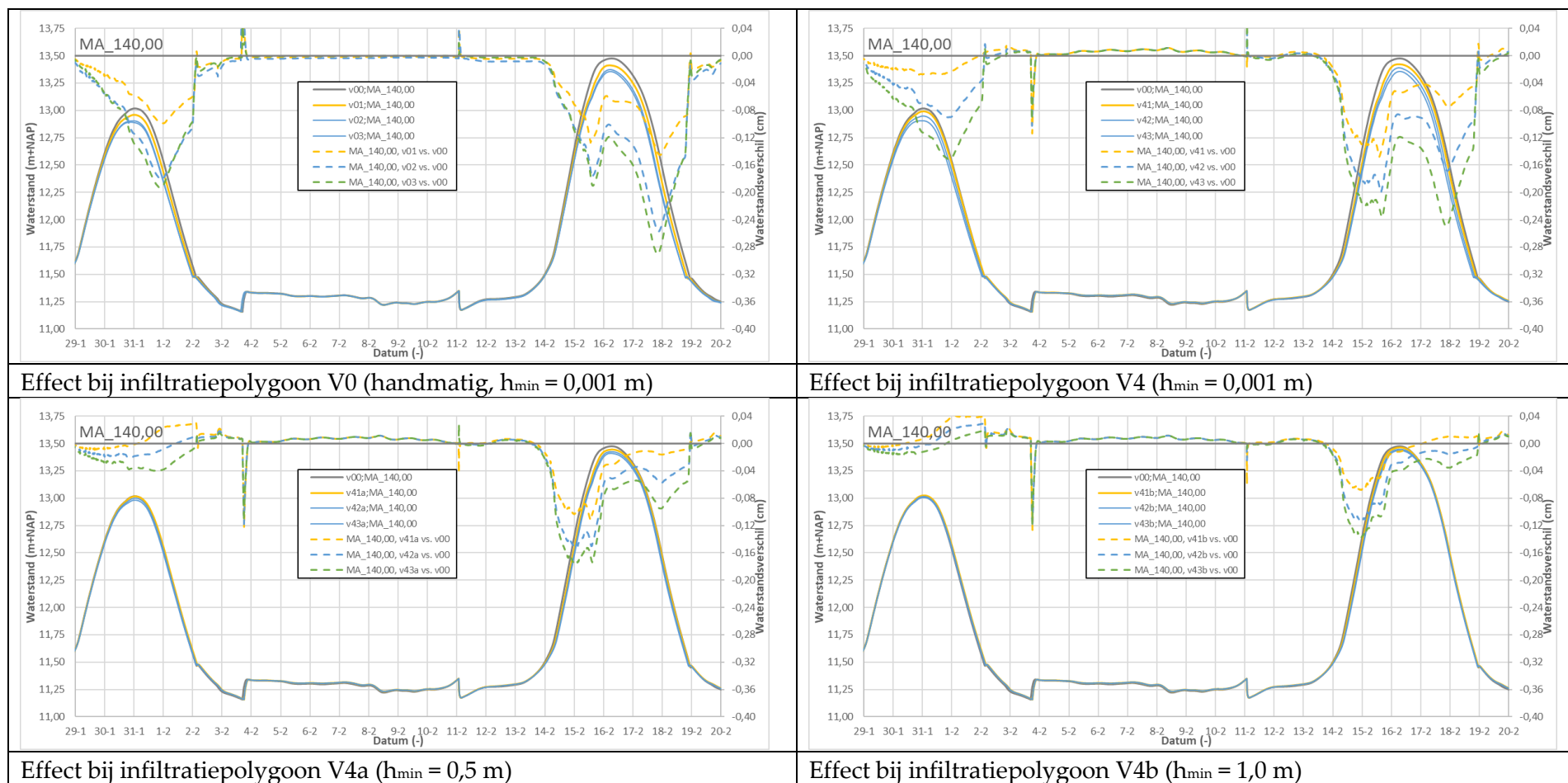
Figuur 4-1 Waterstandseffecten langs de Maas tijdens de eerste piek

Voor de volgende pieken geldt in het algemeen dat de effecten groter zijn dan bij de eerste piek. Omdat dit een gewenst effect is wordt verder geen gedetailleerde uitwerking/beschrijving gemaakt van de effecten maar wordt enkel een globaal beeld gegeven. Zo leidt een hogere infiltratiesnelheid altijd tot een groter effect op de waterstanden. Verder is er een sterke relatie aanwezig tussen het oppervlak van de infiltratiepolygoon en het effect op de waterstanden. Hoe groter (in Ha) de infiltratiepolygoon, hoe groter het effect.

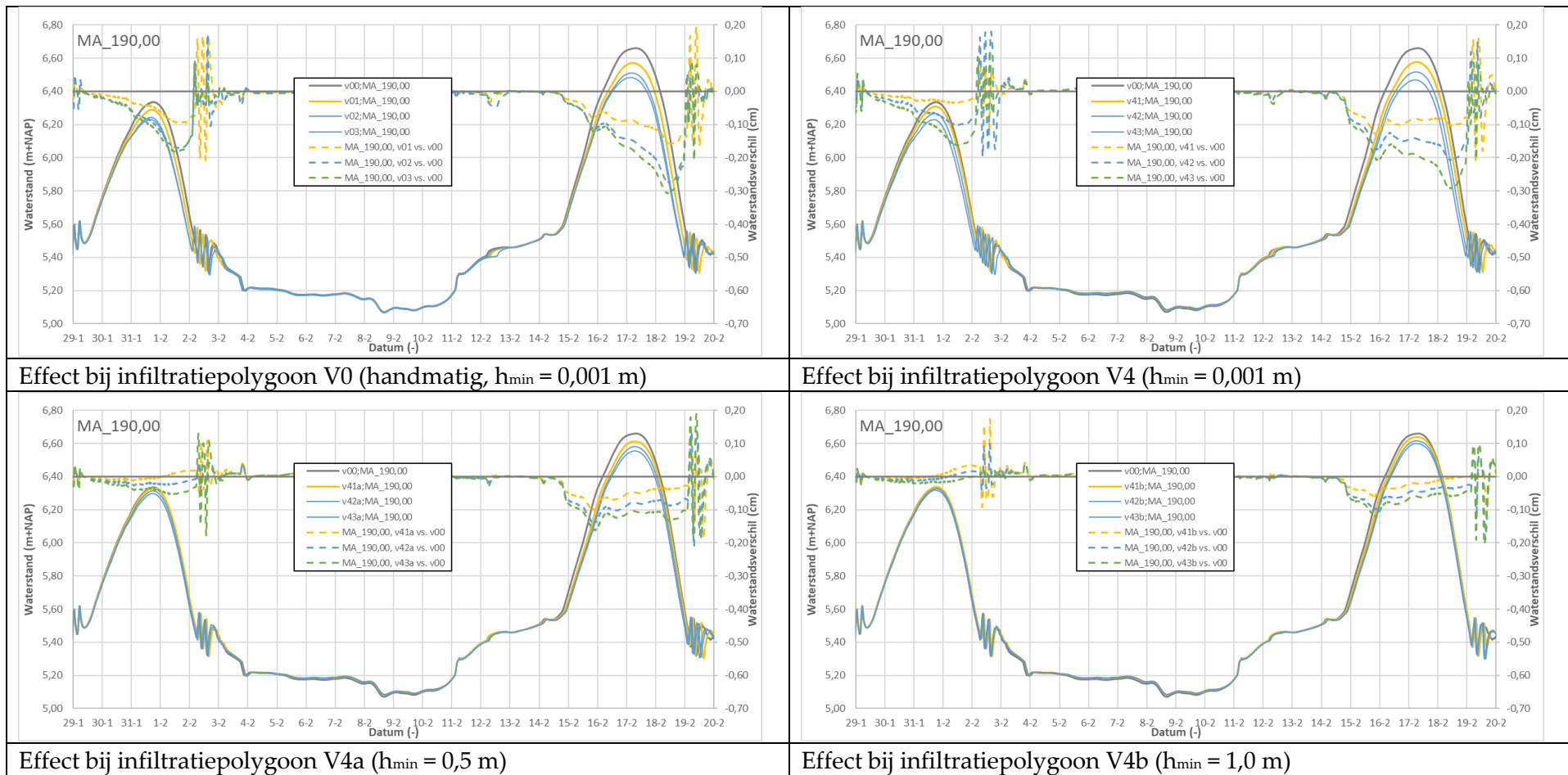
De knik bij rkm 190 wordt veroorzaakt door het stuwbeheer bij Lith. De piekwaterstanden komen in deze situatie vrijwel niet boven het stuwpeil uit, en daardoor valt het effect van de infiltratie weg tegen het effect van het stuwbeheer.

4.1.2 Effecten in de tijdreeksen van waterstanden, variatie in infiltratiesnelheid

Infiltratie is mogelijk op het moment dat de afvoer in de Maas hoger is dan 500 m³/s. In de hier getoonde figuren is dat het geval gedurende het gehele tijdsbestek met uitzondering van de periode tussen 7 en 9 februari.



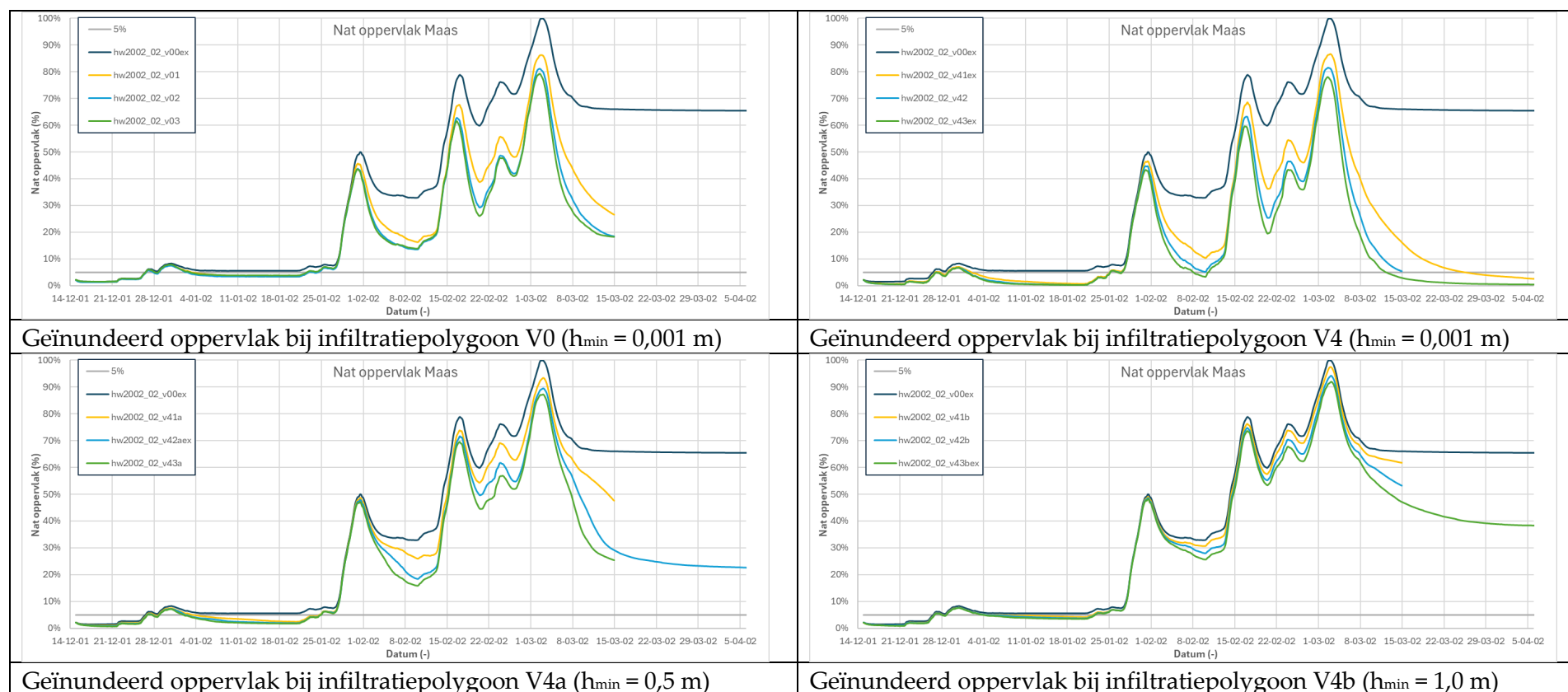
Figuur 4-2 Tijdreeksen van waterstandseffecten langs de Maas tijdens de eerste twee pieken, locatie rkm 140



Figuur 4-3 Tijdreeksen van waterstandseffecten langs de Maas tijdens de eerste twee pieken, locatie rkm 190

4.1.3 Infiltratie zichtbaar in geïnundeerd oppervlak, variatie in infiltratiepolygoon en -snelheid

Om te bepalen in hoeverre de uiterwaarden droogvallen zonder en met infiltratie is berekend welk deel van de uiterwaarden tijdens een simulatie nat is. Door hiervan een grafiek te maken kan snel worden gezien wat het effect is van infiltratie op de droogval van uiterwaarden. N.b. de berekende oppervlakte heeft betrekking op alle uiterwaarden gezamenlijk; er is niet per uiterwaard naar de snelheid/mate van droogval gekeken. Het percentage is bepaald ten opzichte van het maximaal natte gebied in de uiterwaarden; het betreft dus niet de gehele oppervlakte van de uiterwaarden.



Figuur 4-4 Tijdreeksen van geïnundeerd oppervlak van de Maas

Zonder infiltratie blijft ongeveer 65% van de oppervlakte van uiterwaarden nat. Het natte oppervlak neemt 13 dagen na de hoogwaterpiek namelijk niet meer of zeer gering af. Dit betekent dat 65% van het tijdens het hoogwater geïnundeerde oppervlakte in de uiterwaarden niet zelf kan afwateren en altijd nat zal blijven in de modelsimulatie.

Het meenemen van infiltratie in de simulaties blijkt te leiden tot de gewenste droogval van de uiterwaarden, waarbij het resultaat ook in overeenstemming is met de verwachting. Een hogere infiltratiesnelheid leidt tot snellere droogval, terwijl een grotere infiltratiepolygoon resulteert in een drogere uiterwaard.

Met een infiltratiesnelheid van 100 mm/dag bedraagt het resterende oppervlak op 15 maart (ongeveer 13 dagen na de hoogwaterpiek) ongeveer 29% voor infiltratiepolygoon V0; 17% voor infiltratiepolygoon V4, 48% voor infiltratiepolygoon V4a en 62% voor infiltratiepolygoon V4b. Dat bij de handmatig gemaakte infiltratiepolygoon V0 relatief meer oppervlak nat blijft dan bij V4 geeft aan dat het gebruikte oppervlak niet optimaal werkt voor infiltratie. Met minder oppervlak leidt V4 tot een grotere afname van geïnundeerd oppervlak. Dit komt waarschijnlijk doordat er in methode V0 uit Agtersloot (2023) op basis van ruwheidscodes in Baseline ook het ecologisch natte gebied uit de infiltratiepolygoon is weggelaten. Waarschijnlijk bevatten deze ecologisch natte gebieden relatief veel gebieden die niet permanent nat zijn en niet zelfstandig afwateren en daardoor nat blijven na een hoogwater.

De infiltratiesnelheid bepaalt hoelang het duurt voordat na de laatste piek de uiterwaard droog is. Wanneer ongeveer 5% van de oppervlakte van de uiterwaarden nat mag zijn, is enkel bij infiltratiepolygoon V4 uiteindelijk sprake van voldoende droogval. Bij 300 mm/dag duurt dit ongeveer 10 dagen, bij 200 mm/dag 13 dagen en bij 100 mm/dag ongeveer 23 dagen na de laatste hoogwaterpiek.

De oppervlakte van de infiltratiepolygoon bepaalt hoe droog uiterwaarden uiteindelijk kunnen worden. Bij infiltratiepolygoon V4 (alle natte gebieden) worden de uiterwaarden geheel droog, bij infiltratiepolygoon V4a (gebieden met waterdiepte > 0,5 m) blijft circa 23% van de oppervlakte van de uiterwaarden nat en bij infiltratiepolygoon V4b (gebieden met waterdiepte > 1,0 m) blijft ongeveer 38% van de oppervlakte van de uiterwaarden nat.

4.2 Samenvatting resultaten Maas

In de onderstaande tabellen zijn de belangrijkste hydraulische effecten per riviertraject beknopt samengevat. De kleuren van de simulaties komen overeen met de eerder gebruikte kleuren. Zichtbaar is dat op de Grensmaas alle drie de varianten met de grootste droogval polygoon (V4) voldoen; de uiterwaarden worden voldoende droog en de gemiddelde waterstandsverlaging is minder dan 3 cm. Voor de Zandmaas en de Bedijkte Maas voldoet enkel variant V41 met de grootste droogvalpolygoon (V4) en de laagste onttrekking (100 mm/dag); bij hogere onttrekkingen is de gemiddelde waterstandsverlaging groter dan 3 cm.

Tabel 4.2 Samenvatting resultaten Maas, traject Grensmaas

Grensmaas	duur tot 5% droog	1 ^e golf			2 ^e golf		
		gemiddeld Δh	stdev Δh	max. Δh	gemiddeld Δh	stdev Δh	max. Δh
HW2002_01	> 61 dagen (65%)	-1,3	0,8	-2,5	-2,1	1,6	-5,3
HW2002_02	> 61 dagen (65%)	-2,6	1,6	-4,9	-3,8	2,7	-9,2
HW2002_03	> 61 dagen (65%)	-2,1	1,4	-4,5	-3,7	2,6	-9,1
HW2002_41	23 dagen	0,5	0,8	-0,7	-0,3	1,9	-3,7
HW2002_41a	> 61 dagen (23%)	0,9	0,5	0,3	0,4	1,4	-1,9
HW2002_41b	> 61 dagen (38%)	1,1	0,5	0,5	0,7	1,0	-0,8
HW2002_42	13 dagen	-0,2	1,4	-2,5	-1,6	3,0	-7,4
HW2002_42a	> 61 dagen (23%)	0,6	0,9	-0,6	-0,3	2,1	-4,2
HW2002_42b	> 61 dagen (38%)	0,8	0,6	0,0	0,1	1,6	-2,6
HW2002_43	10 dagen	-1,0	1,9	-4,3	-2,7	3,9	-10,4
HW2002_43a	> 61 dagen (23%)	0,2	1,1	-1,5	-0,9	2,6	-5,8
HW2002_43b	> 61 dagen (38%)	0,6	0,8	-0,6	-0,3	2,0	-3,9

Tabel 4.3 Samenvatting resultaten Maas, traject Zandmaas

Zandmaas	duur tot 5% droog	1 ^e golf			2 ^e golf		
		gemiddeld Δh	stdev Δh	max. Δh	gemiddeld Δh	stdev Δh	max. Δh
HW2002_01	> 61 dagen (65%)	-4,9	1,1	-6,6	-8,4	2,7	-13,8
HW2002_02	> 61 dagen (65%)	-9,5	2,1	-12,8	-14,4	4,7	-23,3
HW2002_03	> 61 dagen (65%)	-10,2	2,7	-14,7	-16,5	6,3	-28,6
HW2002_41	23 dagen	-2,1	0,8	-3,2	-6,9	2,5	-11,5
HW2002_41a	> 61 dagen (23%)	0,0	0,3	-0,5	-3,6	1,2	-5,9
HW2002_41b	> 61 dagen (38%)	0,6	0,2	0,4	-1,5	0,4	-2,2
HW2002_42	13 dagen	-5,8	1,7	-8,2	-12,3	4,3	-20,0
HW2002_42a	> 61 dagen (23%)	-1,5	0,5	-2,2	-6,7	2,0	-10,5
HW2002_42b	> 61 dagen (38%)	-0,2	0,2	-0,5	-3,7	0,8	-5,2
HW2002_43	10 dagen	-9,3	2,5	-13,0	-17,1	5,9	-27,9
HW2002_43a	> 61 dagen (23%)	-3,1	0,8	-4,1	-9,1	2,8	-14,1
HW2002_43b	> 61 dagen (38%)	-1,2	0,3	-1,6	-5,3	1,2	-7,4

Tabel 4.4 Samenvatting resultaten Maas, traject Bedijkte Maas

Bedijkte Maas	duur tot 5% droog	1 ^e golf			2 ^e golf		
		gemiddeld Δh	stdev Δh	max. Δh	gemiddeld Δh	stdev Δh	max. Δh
HW2002_01	> 61 dagen (65%)	-3,6	2,1	-5,7	-7,7	2,5	-10,4
HW2002_02	> 61 dagen (65%)	-6,7	3,9	-10,8	-12,1	4,7	-17,8
HW2002_03	> 61 dagen (65%)	-7,6	4,5	-12,4	-14,5	5,6	-21,0
HW2002_41	23 dagen	-2,4	1,3	-3,7	-7,4	2,5	-9,5
HW2002_41a	> 61 dagen (23%)	-0,7	0,4	-1,1	-4,1	1,4	-5,2
HW2002_41b	> 61 dagen (38%)	0,0	0,2	-0,2	-1,7	0,6	-2,3
HW2002_42	13 dagen	-5,4	3,0	-8,5	-12,1	4,2	-16,7
HW2002_42a	> 61 dagen (23%)	-2,0	1,1	-3,1	-7,0	2,4	-9,0
HW2002_42b	> 61 dagen (38%)	-0,8	0,4	-1,2	-3,6	1,3	-4,7
HW2002_43	10 dagen	-8,0	4,5	-13,0	-16,0	6,1	-22,6
HW2002_43a	> 61 dagen (23%)	-3,4	1,8	-5,2	-9,2	3,0	-12,0
HW2002_43b	> 61 dagen (38%)	-1,6	0,8	-2,5	-5,1	1,8	-6,7

5 Gevoeligheidsanalyse infiltratie Rijntakken

5.1 Resultaten

De resultaten voor de Rijntakken worden op dezelfde manier in beeld gebracht als voor de Maas, dat wil zeggen maximale waterstandseffecten in de as, tijdreeksen van waterstanden en geïnundeerd oppervlak. Ook het kleurgebruik is hetzelfde als voor de Maas.

5.1.1 Effecten op maximale (piek)waterstanden

Om het effect van de infiltratie op de maximale waterstanden in beeld te brengen wordt voor twee verschillende periodes een vergelijking gemaakt tussen de waterstanden van de varianten met infiltratie ten opzichte van de referentie zonder infiltratie.

Duidelijk zichtbaar is dat een hogere infiltratiesnelheid leidt tot een grote verlaging van de piekwaterstanden, en dat het effect tijdens de tweede hoogwaterpiek groter is dan tijdens de eerste hoogwaterpiek. Dit is zichtbaar in de volgende zes figuren en ook kort samengevat in de onderstaande tabel. Hierbij is per tak de gemiddelde waterstandsverlaging berekend. De kleuren in de tabel komen overeen met de verschillende takken die in de figuren zichtbaar zijn.

Bij de eerste piek is op alle drie de riviertakken sprake van een bijna lineair verband tussen het waterstandseffect en de mate van infiltratie. Dat kan verklaard worden uit het feit dat er enkel wordt gekeken naar het effect tot aan het moment van optreden van de eerste piek. Het vullen van de uiterwaarden zal in het algemeen veel sneller gebeuren dan de snelheid waarmee het water modelmatig infiltreert. Er is dus voldoende water beschikbaar om ook de hoogste infiltratiesnelheid (300 mm/dag) volledig te benutten. Bij 300 mm/dag kan dus drie keer zoveel water infiltreren als bij 100 mm/dag, en daarmee is een tot drie keer zo groot effect op de waterstanden verklaarbaar. Het waterstandseffect is het grootst op de IJssel (IJ) en het kleinst op het Pannerdensch-kanaal, Nederrijn en Lek (PK-NR-LE). Dit komt overeen met de aanwezigheid van grote uiterwaarden langs de IJssel, en de (veel) minder grote uiterwaarden langs PK-NR-LE.

Bij de tweede piek is (per tak en mate van infiltratie) het effect altijd groter dan bij de eerste piek, en leidt een hogere infiltratiesnelheid tot een groter effect. Daarmee houdt de eenduidigheid van de effecten op. Wat opvalt is dat het effect op de Bovenrijn en Waal (BR-WA) en PK-NR-LE veel groter is geworden, terwijl het effect op de IJssel maar beperkt is toegenomen. Een verklaring hiervoor kan zijn dat de uiterwaarden langs de IJssel uit zichzelf al beter leeglopen dan de uiterwaarden langs de andere takken waar meer zomerkaden aanwezig zijn die het water vasthouden. In de praktijk zullen de uiterwaarden via sluisjes leeglopen.

Ten opzichte van de eerste piek kan er in aanvang naar de tweede piek nog sprake zijn van infiltratie, en bestaat de mogelijkheid dat een uiterwaard grotendeels droogvalt en weer volledige bergende capaciteit heeft, terwijl een andere uiterwaard nog nat is en er slechts beperkte waterbergende capaciteit is de tweede piek. Op dat moment is er dus geen eenduidig verband meer tussen de grootte van de infiltratie en het effect op de waterstand. Daarnaast zou de infiltratie ook een effect kunnen hebben op de afvoerdeling over de riviertakken wat ook een effect op de waterstanden heeft.

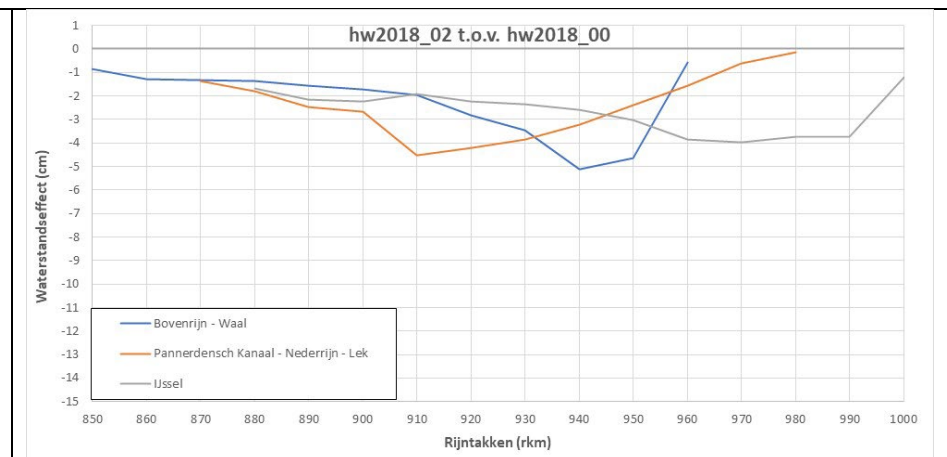
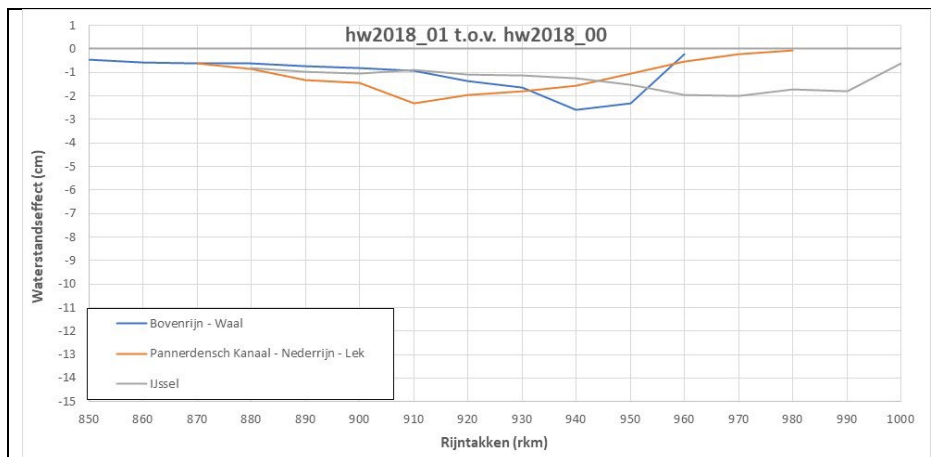
In de komende figuren/tabellen is de volgende conventie gebruikt:

- Referentiesituatie (geen infiltratie) -> donkerblauw
- Infiltratiesnelheid 100 mm/dag -> lichtoranje/geel
- Infiltratiesnelheid 200 mm/dag -> lichtblauw
- Infiltratiesnelheid 300 mm/dag -> groen

Tabel 5.1 Gemiddeld waterstandseffect per tak, alle varianten infiltratie-polygonen en -snelheden

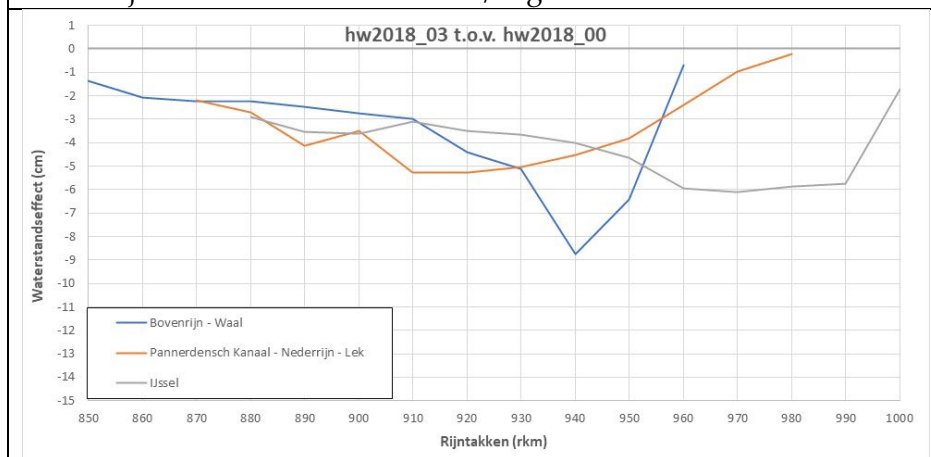
Piek	Traject	Infiltratiepolygoon V0			Infiltratiepolygoon V4			Infiltratiepolygoon V4a			Infiltratiepolygoon V4b		
		100 mm/dag	200 mm/dag	300 mm/dag	100 mm/dag	200 mm/dag	300 mm/dag	100 mm/dag	200 mm/dag	300 mm/dag	100 mm/dag	200 mm/dag	300 mm/dag
1 ^e	Boven-Rijn/Waal	-1,1	-2,2	-3,5	-1,9	-3,7	-5,6	-1,4	-2,8	-4,1	-1,0	-2,1	-3,2
	PanKan/Neder/Lek	-1,1	-2,4	-3,3	-2,4	-4,8	-7,3	-1,6	-2,9	-4,6	-1,0	-2,0	-2,6
	IJssel	-1,3	-2,7	-4,2	-3,6	-7,4	-11,3	-1,8	-3,9	-5,8	-0,7	-1,7	-2,5
4 ^e	Boven-Rijn/Waal	-3,0	-5,3	-6,5	-4,2	-7,4	-9,3	-3,8	-6,4	-8,1	-3,4	-5,7	-6,9
	PanKan/Neder/Lek	-3,6	-4,0	-5,0	0,1	-7,2	-9,5	-3,5	-5,5	-6,9	-3,7	-4,3	-5,0
	IJssel	-2,0	-3,2	-4,2	-4,6	-8,3	-12,0	-2,8	-4,8	-6,7	-1,6	-2,5	-3,4

Zoals eerder benoemd is het belangrijk dat de infiltratiesnelheid voldoende hoog is om uiterwaarden droog te laten vallen, maar mag anderzijds het effect op de piekafvoeren niet te groot worden. Dit is vooral van belang bij de eerste piek, waarbij de uiterwaarden nog droog staan en de volledige bergende capaciteit beschikbaar is. Ook in deze situatie is infiltratie actief maar dat zou dan niet mogen leiden tot een te grote afname van de piekwaterstand. In overleg met RWS is afgesproken dat de waterstandsverlaging van de eerste piek maximaal 3 cm mag bedragen. Voor de Rijntakken voldoen de varianten V41, V41a, V42a en de drie varianten V4.b aan het waterstandseffect bij de eerste piek.



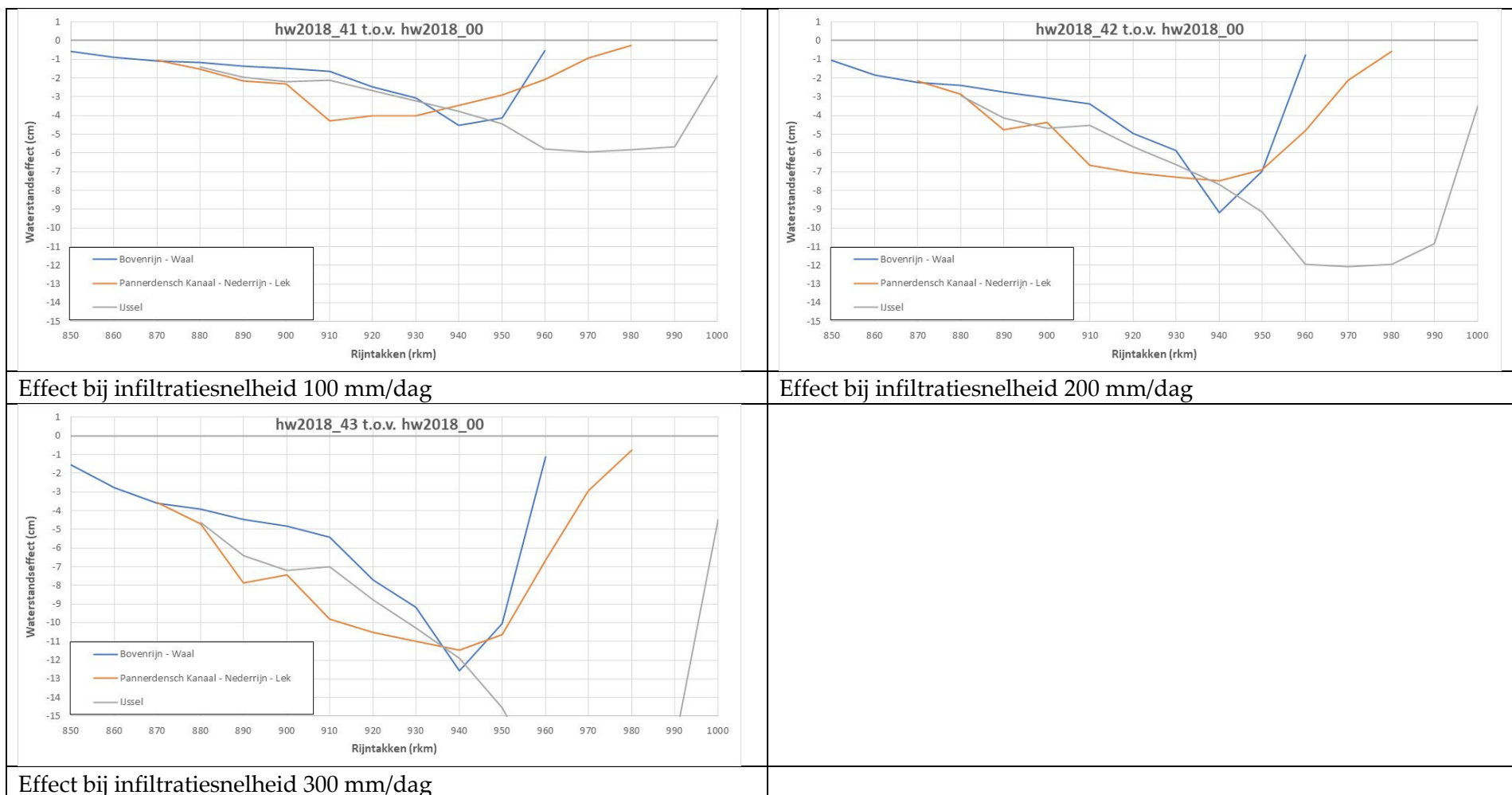
Effect bij infiltratiesnelheid 100 mm/dag

Effect bij infiltratiesnelheid 200 mm/dag

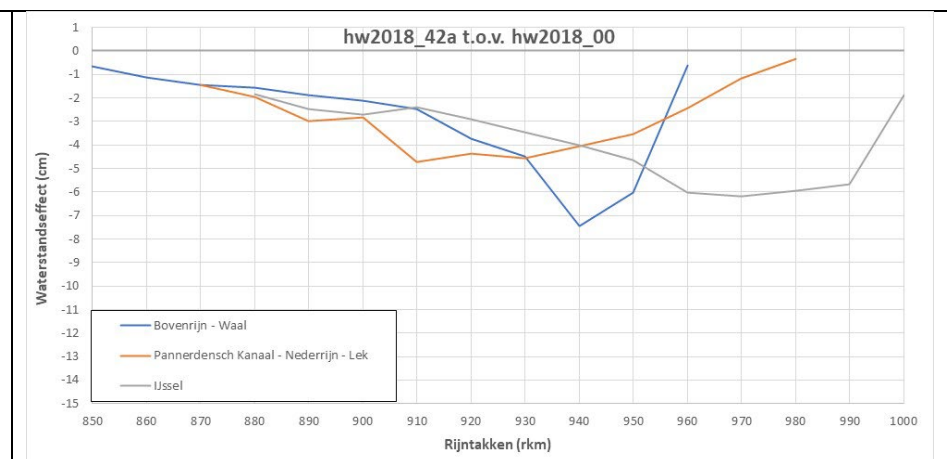
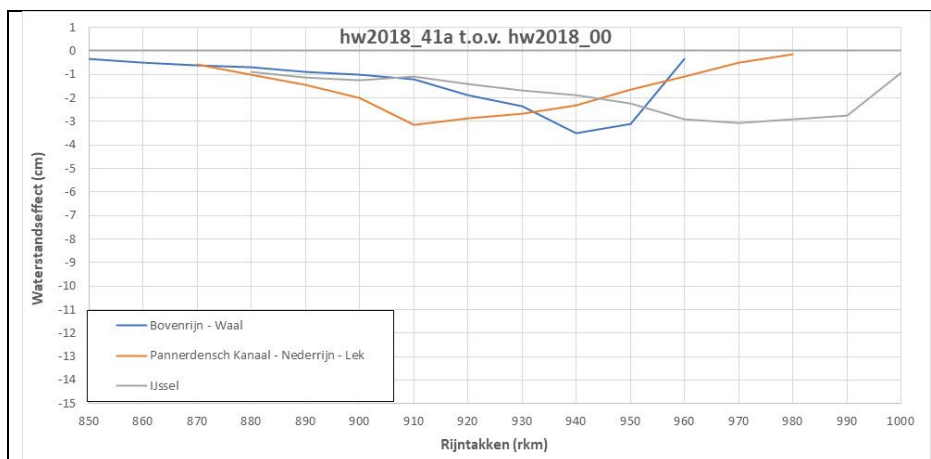


Effect bij infiltratiesnelheid 300 mm/dag

Figuur 5-1 Waterstandseffecten langs de Rijntakken tijdens de eerste piek, infiltratiepolygoon V0 ($h_{min} = 0,001$ m)

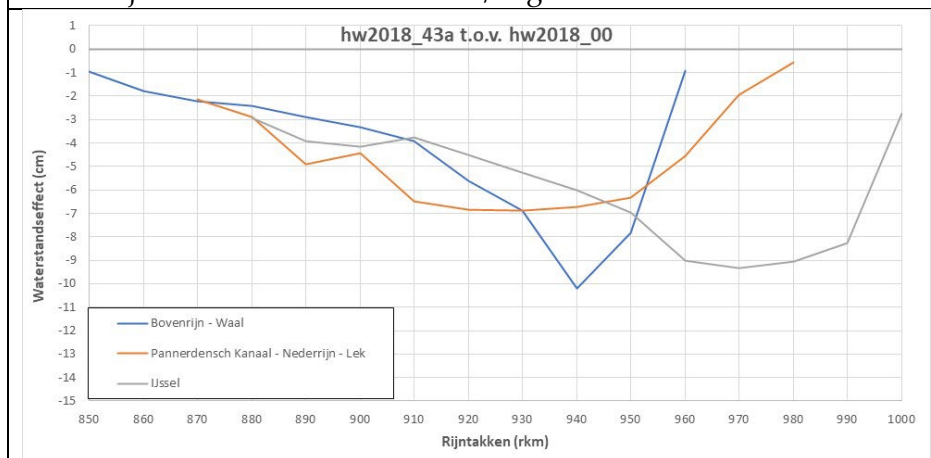


Figuur 5-2 Waterstandseffecten langs de Rijntakken tijdens de eerste piek, infiltratiepolygoon V4 ($h_{min} = 0,001$ m)



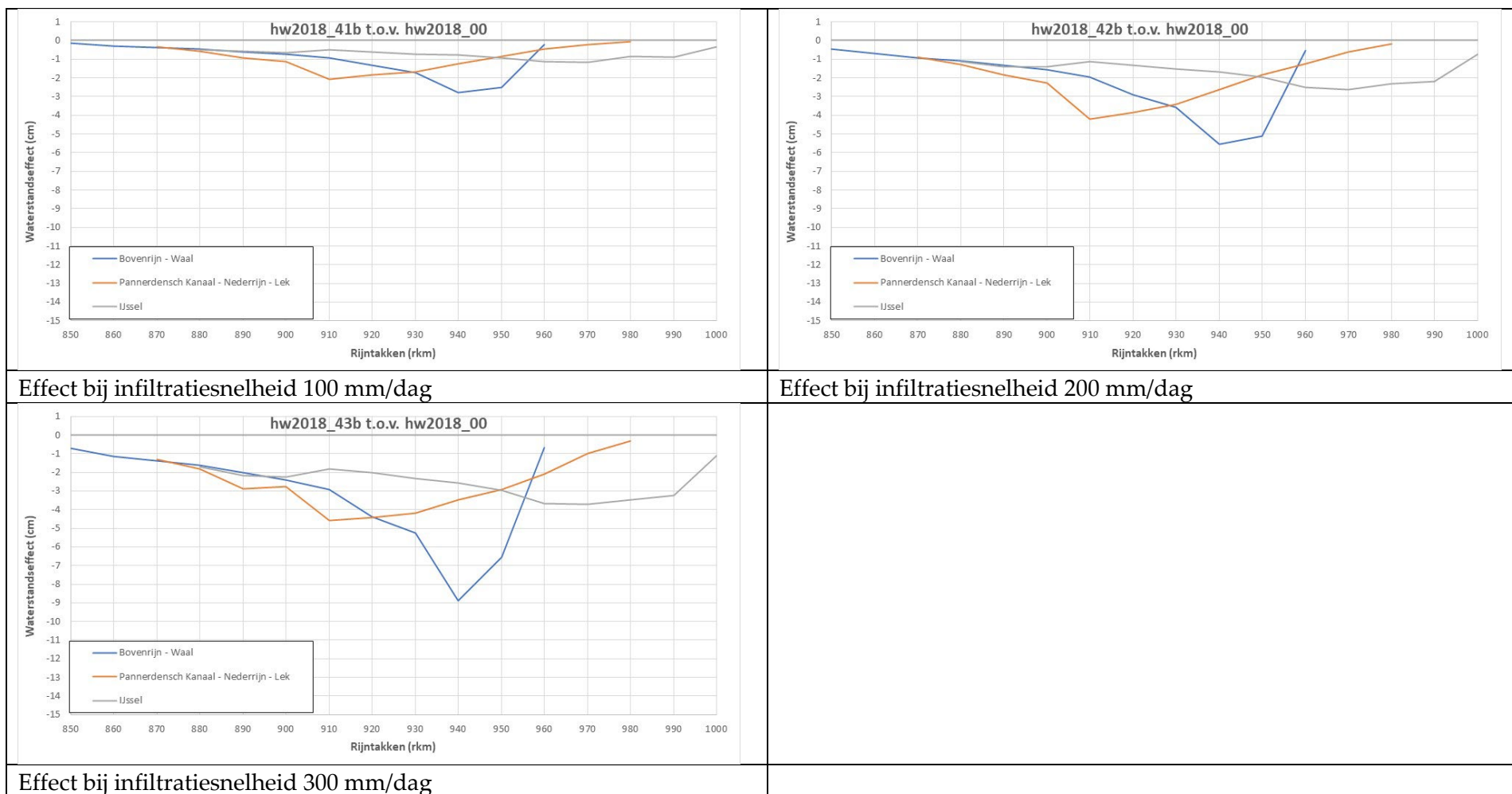
Effect bij infiltratiesnelheid 100 mm/dag

Effect bij infiltratiesnelheid 200 mm/dag



Effect bij infiltratiesnelheid 300 mm/dag

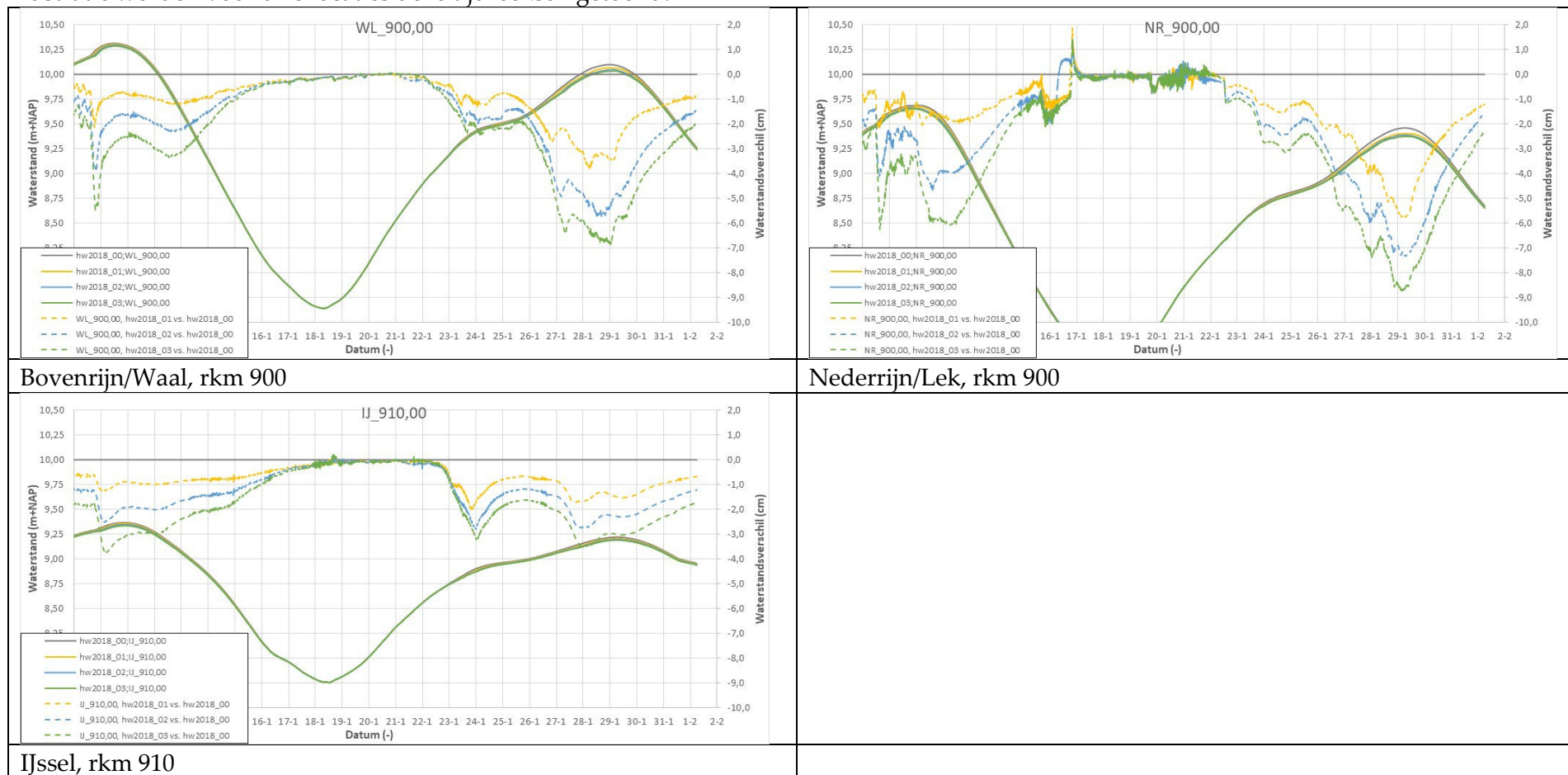
Figuur 5-3 Waterstandseffecten langs de Rijntakken tijdens de eerste piek, infiltratiepolygoon V4a ($h_{min} = 0,5$ m)



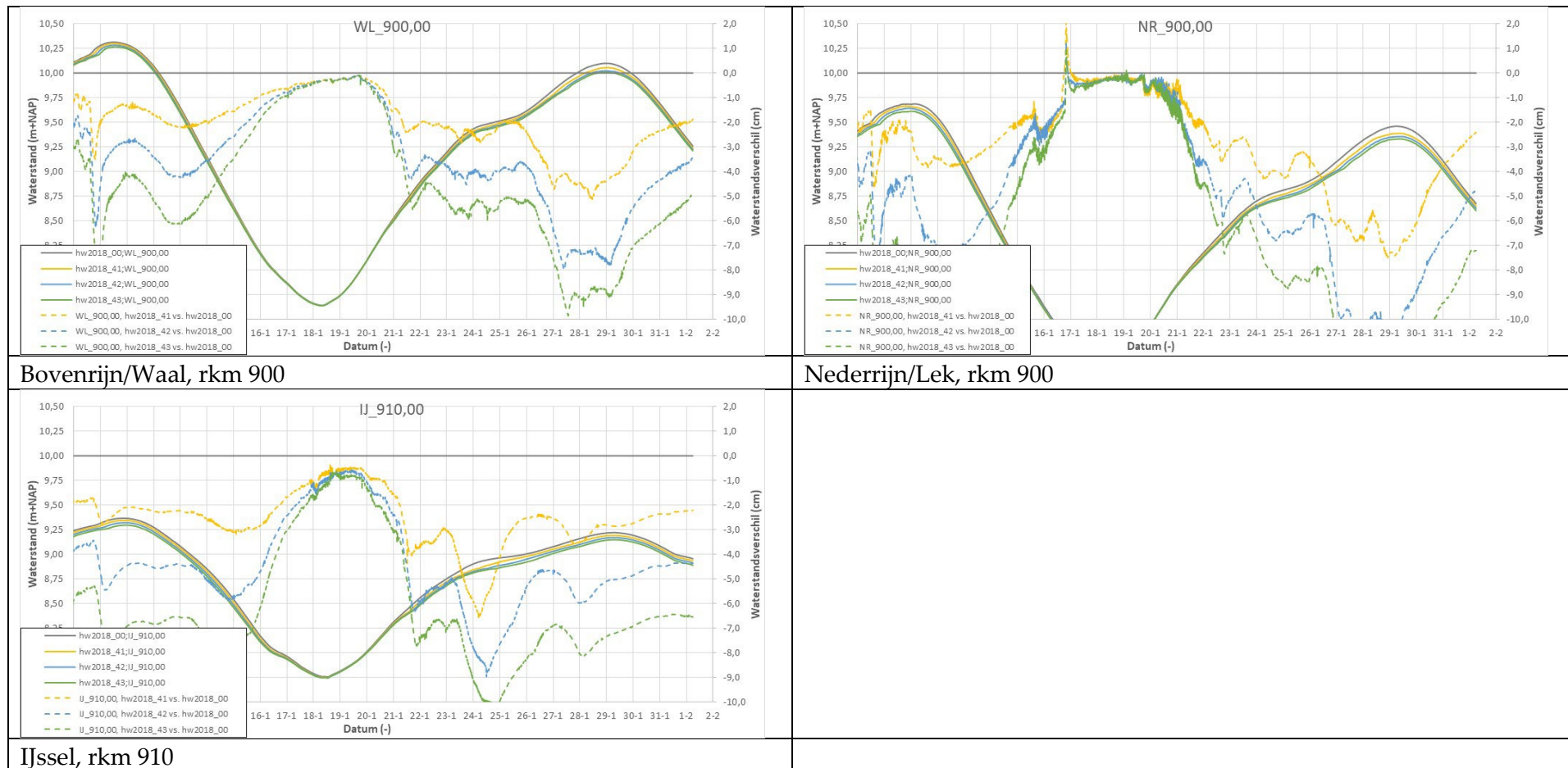
Figuur 5-4 Waterstandseffecten langs de Rijntakken tijdens de eerste piek, infiltratiepolygoon V4b ($h_{min} = 1,0$ m)

5.1.2 Infiltratie zichtbaar in de tijdreeksen

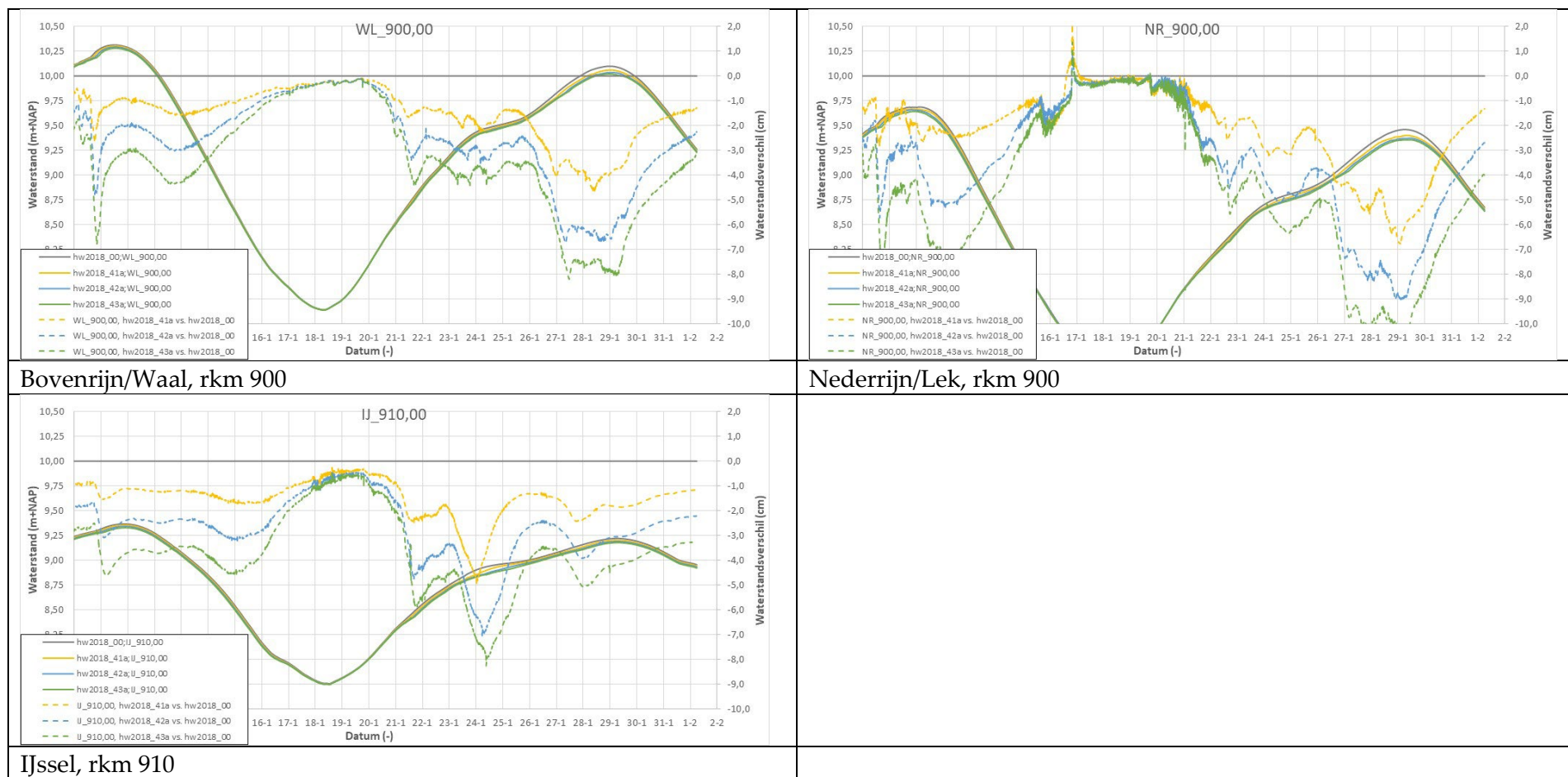
Door te kijken naar tijdreeksen van waterstanden in de as van Rijntakken is het mogelijk om te zien wanneer infiltratie in de uiterwaarden leidt tot een verschil in de as van de rivier. Hiervoor is een spreadsheet beschikbaar, *infiltratie_tijdreeksen_Rijntakken_20240919.xlsx*. Hiermee kan de gebruiker per 10 kilometer tijdreeksen maken en verschillen van de varianten met infiltratie ten opzichte van de referentie zonder infiltratie. Ter illustratie worden voor drie locaties deze tijdreeksen getoond.



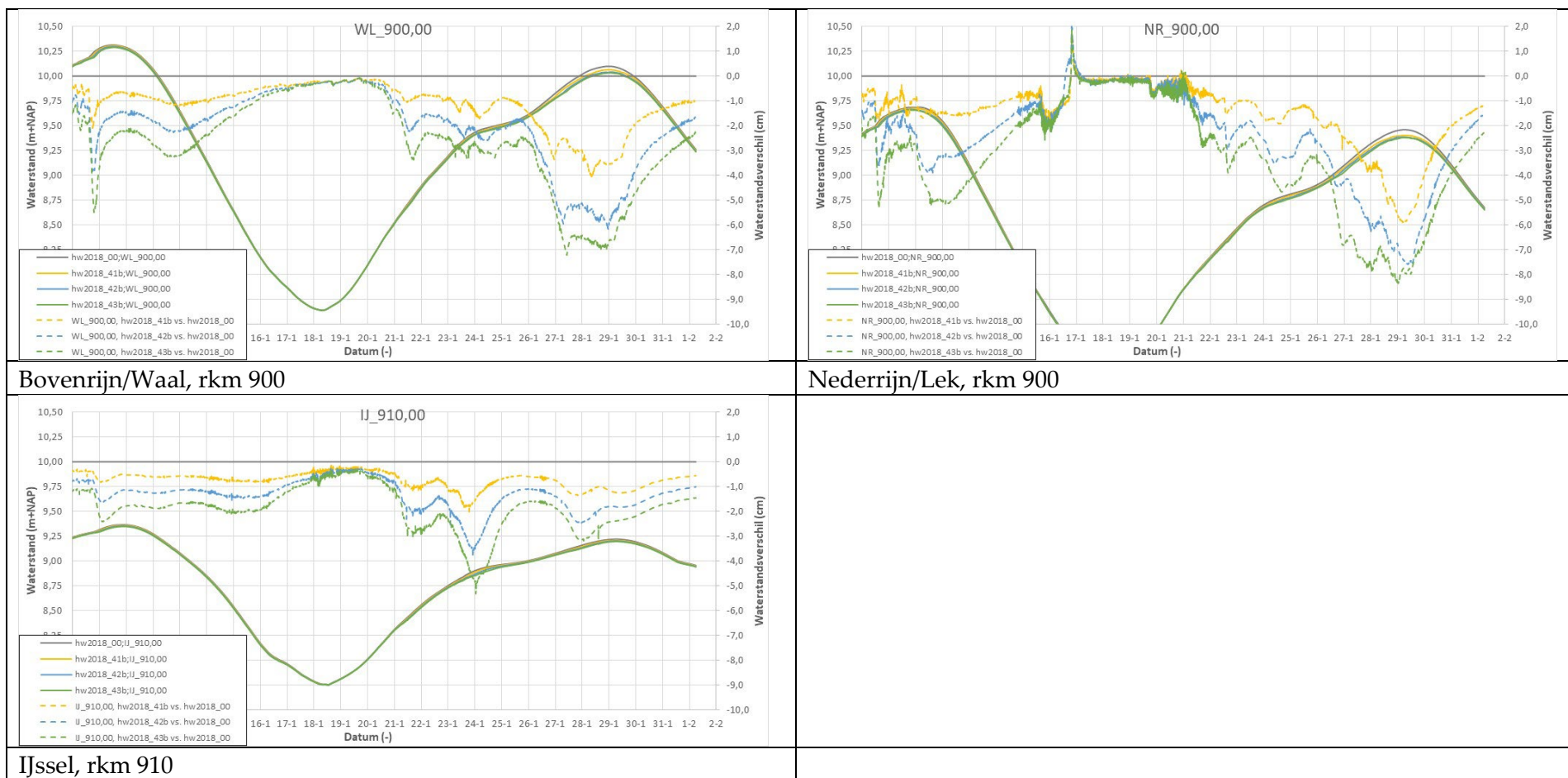
Figuur 5-5 Waterstandseffecten langs de Rijntakken met infiltratiepolygoon V0 ($h_{min} = 0,001$ m), drie locaties en drie infiltratiesnelheden



Figuur 5-6 Waterstandseffecten langs de Rijntakken met infiltratiepolygoon V4 ($h_{min} = 0,001$ m), drie locaties en drie infiltratiesnelheden



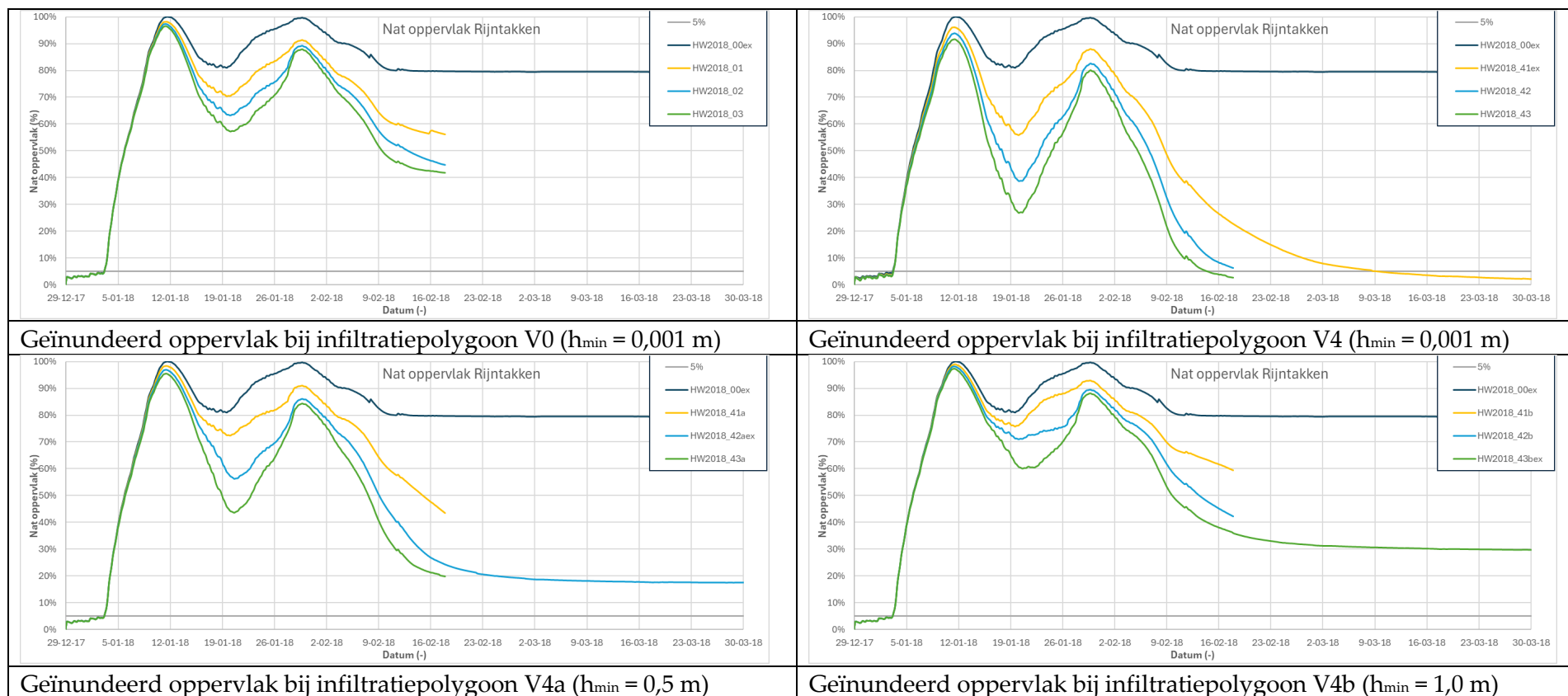
Figuur 5-7 Waterstandseffecten langs de Rijntakken met infiltratiepolygoon V4a ($h_{\min} = 0,5$ m), drie locaties en drie infiltratiesnelheden



Figuur 5-8 Waterstandseffecten langs de Rijntakken met infiltratiepolygoon V4b ($h_{min} = 1,0$ m), drie locaties en drie infiltratiesnelheden

5.1.3 Infiltratie zichtbaar in geïnundeerd oppervlak

Om te bepalen in hoeverre de uiterwaarden droogvallen zonder en met infiltratie is berekend welk deel van de uiterwaarden tijdens een simulatie nat is. Door hiervan een grafiek te maken kan snel worden gezien wat het effect is van infiltratie op de droogval van uiterwaarden. N.b. de berekende oppervlakte heeft betrekking op alle uiterwaarden; er is niet per uiterwaard naar de snelheid/mate van droogval gekeken. Het percentage is bepaald t.o.v. het maximaal natte gebied in de uiterwaarden, niet de gehele oppervlakte van de uiterwaarden.



Figuur 5-9 Tijdreeksen van geïnundeerd oppervlak van de Rijntakken

Zonder infiltratie blijft ongeveer 80% van de oppervlakte van uiterwaarden nat. Het natte oppervlak neemt 11 dagen na de hoogwaterpiek namelijk niet meer of zeer gering af. Dit betekent dat 80% van het tijdens het hoogwater geïnundeerde oppervlakte in de uiterwaarden niet zelf kan afwateren en altijd nat zal blijven in de modelsimulatie.

Het meenemen van infiltratie in de simulaties blijkt te leiden tot de gewenste droogval van de uiterwaarden, waarbij het resultaat ook in overeenstemming is met de verwachting. Een hogere infiltratiesnelheid leidt tot snellere droogval, terwijl een grotere infiltratiepolygoon resulteert in een drogere uiterwaard.

Met een infiltratiesnelheid van 100 mm/dag bedraagt het resterende oppervlak op 17 februari (ongeveer 19 dagen na de hoogwaterpiek) ongeveer 56% voor infiltratiepolygoon V0; 23% voor infiltratiepolygoon V4, 43% voor infiltratiepolygoon V4a en 59% voor infiltratiepolygoon V4b. Dat bij de handmatig gemaakte infiltratiepolygoon V0 relatief meer oppervlak nat blijft dan bij V4 geeft aan dat het gebruikte oppervlak niet optimaal werkt voor infiltratie. Met minder oppervlak leidt V4 tot een veel grotere afname van geïnundeerd oppervlak. Dit komt waarschijnlijk doordat er in methode V0 uit Agtersloot (2023) op basis van ruwheidscodes in Baseline ook het ecologisch natte gebied uit de infiltratiepolygoon is weggelaten. Waarschijnlijk bevatten deze ecologisch natte gebieden relatief veel gebieden die niet permanent nat zijn en niet zelfstandig afwateren en daardoor nat blijven na een hoogwater.

De infiltratiesnelheid bepaalt hoelang het duurt voordat na de laatste piek de uiterwaard droog is. Wanneer ongeveer 5% van de oppervlakte van de uiterwaarden nat mag zijn, is enkel bij infiltratiepolygoon V4 uiteindelijk sprake van voldoende droogval. Bij 300 mm/dag duurt dit ongeveer 16 dagen, bij 200 mm/dag 21 dagen en bij 100 mm/dag ongeveer 41 dagen na de laatste hoogwaterpiek.

De oppervlakte van de infiltratiepolygoon bepaalt hoe droog uiterwaarden uiteindelijk kunnen worden. Bij infiltratiepolygoon V4 (alle natte gebieden) blijft circa 1% van de oppervlakte van de uiterwaarden nat, bij infiltratiepolygoon V4a (gebieden met waterdiepte > 0,5 m) blijft circa 18% van de oppervlakte van de uiterwaarden nat en bij infiltratiepolygoon V4b (gebieden met waterdiepte > 1,0 m) blijft ongeveer 30% van de oppervlakte van de uiterwaarden nat.

5.2 Samenvatting resultaten Rijntakken

In de onderstaande tabellen zijn de belangrijkste hydraulische effecten per riviertak beknopt samengevat. De kleuren van de simulaties komen overeen met de eerder gebruikte kleuren. Zichtbaar is dat op de Waal en de Nederrijn/Lek enkel variant V41 met de grootste droogval polygoon (V4) en de laagste onttrekking voldoet (100 mm/dag); de uiterwaarden worden binnen 41 dagen voldoende droog en de gemiddelde waterstandsverlaging is minder dan 3 cm. Voor de IJssel voldoet geen enkele variant aan de gestelde eisen.

Tabel 5.2 Samenvatting resultaten Rijntakken, riviertak Waal

Waal	duur tot 5% droog	1 ^e golf			2 ^e golf		
		gemiddeld Δh	stdev Δh	max. Δh	gemiddeld Δh	stdev Δh	max. Δh
HW2002_01	> 61 dagen (40%)	-1,1	0,7	-2,6	-3,0	1,8	-5,9
HW2002_02	> 61 dagen (40%)	-2,2	1,4	-5,1	-5,3	3,4	-10,8
HW2002_03	> 61 dagen (40%)	-3,5	2,2	-8,8	-6,5	4,1	-13,3
HW2002_41	41 dagen	-1,9	1,3	-4,5	-4,2	2,6	-8,6
HW2002_41a	> 61 dagen (18%)	-1,4	1,0	-3,5	-3,8	2,4	-7,9
HW2002_41b	> 61 dagen (30%)	-1,0	0,9	-2,8	-3,4	2,2	-7,1
HW2002_42	21 dagen	-3,7	2,4	-9,2	-7,4	4,7	-15,4
HW2002_42a	> 61 dagen (18%)	-2,8	2,1	-7,5	-6,4	4,3	-13,5
HW2002_42b	> 61 dagen (30%)	-2,1	1,7	-5,5	-5,7	4,0	-12,3
HW2002_43	16 dagen	-5,6	3,4	-12,6	-9,3	5,6	-18,7
HW2002_43a	> 61 dagen (18%)	-4,1	2,8	-10,2	-8,1	5,3	-16,9
HW2002_43b	> 61 dagen (30%)	-3,2	2,5	-8,9	-6,9	4,7	-15,2

Tabel 5.3 Samenvatting resultaten Rijntakken, riviertak Nederrijn/Lek

Nederrijn/Lek	duur tot 5% droog	1 ^e golf			2 ^e golf		
		gemiddeld Δh	stdev Δh	max. Δh	gemiddeld Δh	stdev Δh	max. Δh
HW2002_01	> 61 dagen (40%)	-1,1	0,7	-2,3	-3,6	2,1	-6,0
HW2002_02	> 61 dagen (40%)	-2,4	1,3	-4,5	-4,0	2,3	-7,3
HW2002_03	> 61 dagen (40%)	-3,3	1,6	-5,3	-5,0	2,7	-8,7
HW2002_41	41 dagen	-2,4	1,3	-4,3	0,1	15,2	-7,6
HW2002_41a	> 61 dagen (18%)	-1,6	1,0	-3,2	-3,5	1,9	-6,1
HW2002_41b	> 61 dagen (30%)	-1,0	0,6	-2,1	-3,7	2,2	-6,0
HW2002_42	21 dagen	-4,8	2,3	-7,5	-7,2	3,8	-11,6
HW2002_42a	> 61 dagen (18%)	-2,9	1,4	-4,7	-5,5	3,0	-9,2
HW2002_42b	> 61 dagen (30%)	-2,0	1,2	-4,2	-4,3	2,4	-7,9
HW2002_43	16 dagen	-7,3	3,4	-11,5	-9,5	4,9	-15,4
HW2002_43a	> 61 dagen (18%)	-4,6	2,1	-6,9	-6,9	3,6	-11,2
HW2002_43b	> 61 dagen (30%)	-2,6	1,3	-4,6	-5,0	2,6	-8,6

Tabel 5.4 Samenvatting resultaten Rijntakken, riviertak IJssel

IJssel	duur tot 5% droog	1 ^e golf			2 ^e golf		
		gemiddeld Δh	stdev Δh	max. Δh	gemiddeld Δh	stdev Δh	max. Δh
HW2002_01	> 61 dagen (40%)	-1,3	0,4	-2,0	-2,0	0,6	-3,0
HW2002_02	> 61 dagen (40%)	-2,7	0,9	-4,0	-3,2	1,0	-4,9
HW2002_03	> 61 dagen (40%)	-4,2	1,3	-6,1	-4,2	1,5	-6,7
HW2002_41	41 dagen	-3,6	1,7	-6,0	-4,6	2,0	-7,9
HW2002_41a	> 61 dagen (18%)	-1,8	0,8	-3,1	-2,8	1,1	-4,6
HW2002_41b	> 61 dagen (30%)	-0,7	0,2	-1,2	-1,6	0,4	-2,4
HW2002_42	21 dagen	-7,4	3,3	-12,1	-8,3	3,8	-14,3
HW2002_42a	> 61 dagen (18%)	-3,9	1,6	-6,2	-4,8	2,0	-8,1
HW2002_42b	> 61 dagen (30%)	-1,7	0,6	-2,6	-2,5	0,8	-3,9
HW2002_43	16 dagen	-11,3	5,2	-18,9	-12,0	5,6	-20,5
HW2002_43a	> 61 dagen (18%)	-5,8	2,3	-9,3	-6,7	2,8	-11,3
HW2002_43b	> 61 dagen (30%)	-2,5	0,8	-3,7	-3,4	1,1	-5,4

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Infiltratiepolygonen

Het geautomatiseerd maken van de infiltratiepolygonen met behulp van een Python-script heeft het mogelijk gemaakt om de voorliggende gevoeligheidsanalyse uit te voeren. Infiltratiepolygonen beschrijven het gebied dat nat blijft na een hoogwater, maar wat niet permanent nat is. Het script geeft de gebruiker de mogelijkheid om infiltratiepolygonen te laten maken die rekening houden met zowel de minimale waterdiepte als met de minimale oppervlakte. Aangezien het aantal infiltratiepolygonen geen significant effect heeft op de rekentijd is besloten om het aantal infiltratiepolygonen niet te verminderen op basis van een minimaal oppervlak in de infiltratiepolygonen. Daarom is de gevoeligheidsanalyse enkel uitgevoerd op de minimale waterdiepte in de infiltratiepolygonen.

De keuzes die de gebruiker kan maken voor de toepassing van een minimale waterdiepte binnen de infiltratiepolygonen bij het (geautomatiseerd) maken van infiltratiepolygonen heeft een duidelijke invloed op de droogval van uiterwaarden en de effecten op de piekwaterstanden.

Infiltratie snelheid

De snelheid van infiltratie is gevarieerd tussen 100 mm/dag, 200 mm/dag en 300 mm/dag. Een hogere infiltratiesnelheid leidt tot een snellere droogval van de uiterwaarden maar eveneens tot een groter waterstandseffect.

Resultaat infiltratie

Het meenemen van infiltratie in de simulaties blijkt te leiden tot de gewenste droogval van de uiterwaarden, waarbij het resultaat ook in overeenstemming is met de verwachting. Een hogere infiltratiesnelheid leidt tot snellere droogval, terwijl een grotere infiltratiepolygoon resulteert in een drogere uiterwaard.

De modellering van infiltratie geeft voor de Maas enkel bij het gebruik van de variant met de grootste infiltratiepolygoon (d.w.z. waterdiepte van 0,001 m of hoger) en de laagste infiltratiesnelheid (100 mm/dag) een resultaat waarbij de uiterwaarden voldoende droogvallen (na ongeveer 30 dagen) en waarbij het effect op de piekwaterstand van de eerste piek gemiddeld niet groter is dan 3 cm. Bij minder grote infiltratiepolygonen is er in de uiterwaarden sprake van onvoldoende droogval, en bij een hogere infiltratiesnelheid is het waterstandseffect bij de eerste piek te groot.

Voor de Rijntakken voldoet geen enkele variant aan de gestelde eisen. De variant met de grootste infiltratiepolygoon (d.w.z. waterdiepte van 0,001 m of hoger) en de laagste infiltratiesnelheid (100 mm/dag) resulteert wel in uiterwaarden die voldoende droogvallen (na ongeveer 41 dagen), maar op de IJssel voldoet het gemiddelde waterstandseffect met -3,6 cm niet aan de eis. Voor de Waal en Nederrijn/Lek wordt met deze variant wel aan de eis van het waterstandseffect voldaan. Als de infiltratiesnelheid langs de IJssel lager gekozen zou kunnen worden dan langs de Waal en Nederrijn/Lek zou de methode mogelijk wel in een acceptabel waterstandseffect kunnen resulteren. Bij minder grote infiltratiepolygoonen is er in de uiterwaarden sprake van onvoldoende droogval, en bij een hogere infiltratiesnelheid is het waterstandseffect bij de eerste piek te groot.

6.2 Aanbevelingen

Het wordt aanbevolen om:

- Te beoordelen of droogval een echt noodzakelijk aspect is voor hoogwatervoorspellingen en operationele aspecten;
- Na te gaan of het mogelijk is te differentiëren in infiltratiesnelheden in verschillende gebieden. Hiermee wordt het mogelijk om enerzijds volledige droogval te kunnen realiseren, en anderzijds het waterstandseffect te beperken. De consequentie is wel dat het in het algemeen langer zal duren voordat sprake is van volledige droogval;
- Verder te gaan met de implementatie van lange duikers in D-Hydro als weergave van sluisjes in uiterwaarden. Deze objecten laten water zowel uit als in de uiterwaarden stromen en geven hiermee op twee momenten een verbetering in de modellering. Zowel in de aanloop van een hoogwatergolf als in de was van een hoogwatergolf komt de gemodelleerde situatie beter overeen met de daadwerkelijke situatie. Daarnaast verdwijnt er niet onterecht water uit de uiterwaarden, iets wat met infiltratie wel het geval kan zijn;
- Te onderzoeken of infiltratie een rol kan spelen bij de validatie van modellen. De hier gebruikte hoogwatergolven (2002 voor de Maas, 2018 voor de Rijntakken) laten zien dat er een aanzienlijk waterstandseffect kan zijn bij meerdere pieken in één hoogwatergolf. Door nu te variëren met de infiltratiesnelheid kan worden bepaald in hoeverre sprake is van een verbetering van de modelresultaten na de eerste hoogwaterpiek.

7 Referenties

Deltares, (2022), Memo 'Pilot leeglopen bergingsgebieden in D-HYDRO; kenmerk 11208054-010-ZKS-0001, 15 december 2022

Deltares, (2023a), Memo 'Implementatie van lange duikers in de Rijn'; kenmerk 11209233-003-ZWS-0008, 22 juni 2023

Deltares, (2023b), User Manual 'D-Flow Flexible Mesh, Computational Cores and User Interface, Delft3D FM Suite 2D3D 2023'; Version: 2023, SVN Revision: 78344, 15 april 2023

Deltares, (2023c), Memo 'D-HYDRO testing of the infiltration feature with the IJsselmeer IJssel-Vecht Delta (YM-IJVD-OVD) model version 2', 19 juli 2023

Kosters, A. en T. Visser, (2021), 'Jaarlijkse Actualisatie Modellen Rijn 2022, Baseline en D-HYDRO j22_6'. Deltares rapport 11208053-003-ZWS-0007, 26 augustus 2022

Bijlage 1

Python-script voor geautomatiseerd aanmaken infiltratiepolygonen

```
# -*- coding: utf-8 -*-
```

```
*****
```

Created on Mon Mar 25 10:45:38 2024

Option 1 for infiltration areas:

infiltration polygon = wet areas after dischargepeak - wet areas

wet areas after dischargepeak = wet areas after long simulation with high to low discharges

wet areas:

* wet in model simulation (500 m3/s for Meuse, 5000 for Rhine) + 50m buffer

```
*****
```

```
import os
```

```
# import dfm_tools as dfmt
```

```
import numpy as np
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
import pandas as pd
```

```
import geopandas as gpd
```

```
import xugrid as xu
```

```
# import contextily as ctx
```

```
from dfm_tools_Eveline import process_mapdata, geodataframe_to_PolyFile
```

```
#%%
```

```
#specify model data for determining the "permanent" wet area
```

```
dirmodel = r"p:\11210333-002-24mad09-
```

```
maas\C_Work\131_leegloop_uiterwaarden_infiltratie\01_ontvangen\20240327_vanRon_si
```

```
mulaties_hoog_laag_mapfiles\Maas_h2l_01"
```

```
modelname = 'dflowfm2d-maas-j23_6-v1a'
```

```
title = 'maas-j23_6-v1a'
```

```
modelset = 'JAMM2023'
```

```
level = 'S6000'
```

```
#specify model data for determining the hydraulic wet area (summerbed and lakes)
```

```
dirmodel2 = r"p:\11209233-002-mad09a-2023-maas\C_Work\02_actualisatie_j23\D-
```

```
HYDRO\dflowfm2d-maas-j23_6-v1a"
```

```
modelname2 = 'dflowfm2d-maas-j23_6-v1a'
```

```
title2 = 'maas-j23_6-v1a'
```

```
modelset2 = 'Initiele_condities'
```

```
level2 = 'S_500'
```

```
# specify threshold for minimum waterdepth to filter output
```

```
th = 0.001
```

```
# specify location of baselineschematisation
```

```
baseline = r"p:\11209233-002-mad09a-2023-maas\F_Final\2023-07-
```

```
17_Definitief_j23\baseline-maas-j23_6-v1\baseline.gdb"
```

```
diroutput = r"p:\11210333-002-24mad09-  
maas\C_Work\131_leegloop_uiterwaarden_infiltratie\03_scripts\testresults"
```

```
sensitivityanalysis = False # set to True for output for the sensitivity analysis  
### open and process modeldata  
# file_map = os.path.join(dirmodel , 'computations' , modelset ,level,  
"results\ \Maas_*_map.nc")  
file_map = os.path.join(dirmodel , "Maas_*_map.nc")  
data_xr_mapmerged = process_mapdata(file_map,modelname,level, th =  
0.001,crs='EPSG:28992')
```

```
file_map2 = os.path.join(dirmodel2 , 'computations' , modelset2 ,level2,  
"results\ \Maas_*_map.nc")  
data_xr_mapmerged2 = process_mapdata(file_map2,modelname2,level2, th =  
0.001,crs='EPSG:28992')
```

```
### step 1 determine determine hydraulic wet area (Summerbed + lakes)  
area_wet = data_xr_mapmerged['water_depth_filt'].isel(time=-1) # total wet area long after a  
peak discharge  
area_h = data_xr_mapmerged2['water_depth_filt'].isel(time=-1) # hydraulic wet area  
(Summerbed + lakes)
```

```
### step 2 exclude hydraulic wet area from infiltration area  
# reproject hydraulic wet area on grid of total wet area simulation  
regridder = xu.OverlapRegridder(source=area_h, target=area_wet.grid)  
area_h_regrid = regridder.regrid(area_h)
```

```
bool_permanentwet = area_h_regrid>0  
# select only gridcells of total wet area if they not exist in the hydraulic wet area  
area_wetinf = area_wet.where(~bool_permanentwet)
```

```
### conversion to pandasgeodataframe for plotting all data in the same figure  
# convert ugrid model data to geodataframe and set coordinate systemn  
area_hpd = area_h.ugrid.to_geodataframe()  
area_hpd = area_hpd.set_crs('EPSG:28992')  
# drop gridcells with no water  
area_hpd.dropna(subset = ['water_depth_filt'],inplace=True)
```

```
# convert ugrid model data to geodataframe and set coordinate systemn  
area_wetpd = area_wet.ugrid.to_geodataframe()  
area_wetpd = area_wetpd.set_crs('EPSG:28992')  
# drop gridcells with no water  
area_wetpd.dropna(subset = ['water_depth_filt'],inplace=True)  
### convert to polyobject and save as modelinput  
# convert ugrid model data to geodataframe and set coordinate systemn  
area_wetinf = area_wetinf.ugrid.to_geodataframe()  
area_wetinf = area_wetinf.set_crs('EPSG:28992')
```

```
# drop gridcells with no water
area_wetinf.dropna(subset = ['water_depth_filt'],inplace=True)

area_wetinf.to_file(os.path.join(diroutput,
f'{modelname}_infiltration_method1_nodissolve.shp'))

# buffer all polygons with 0.01 m ,then dissolve all polygons so only
# touching polygons also overlap, then buffer all polygons with -0.01 m
# explode multipartfeatures
area_wetinf_diss = area_wetinf
area_wetinf_diss['geometry'] = area_wetinf_diss.buffer(0.02, join_style=2)
area_wetinf_diss = area_wetinf_diss.dissolve()
area_wetinf_diss['geometry'] = area_wetinf_diss.buffer(-0.01, join_style=2)
area_wetinf_diss = area_wetinf_diss.explode(index_parts=False,ignore_index=True)

# save as .shp
area_wetinf_diss.to_file(os.path.join(diroutput, f'{modelname}_infiltration_method1.shp'))
# save as .pol
poly_file = os.path.join(diroutput, f'{modelname}_infiltration_method1.pol')
poly_obj = geodataframe_to_PolyFile(area_wetinf_diss)
poly_obj.save(poly_file)

# calculate surface area of all polygons
area_wetinf_diss['oppervlakte'] = area_wetinf_diss.area
# calculate total surface area for infiltration
infiltratieoppervlak = area_wetinf_diss['oppervlakte'].sum()
# determine total nr of polygons
nrpolygons = len(area_wetinf_diss)

# determine maximum water depth in each dissolved infiltration polygon
area_wetinf_diss['idx'] = np.arange(len(area_wetinf_diss))
df_is = area_wetinf_diss.overlay(area_wetinf, how='identity')
area_wetinf_diss['max_water_depth'] = df_is.groupby(['idx'])['water_depth_filt_2'].max()
area_wetinf_diss.to_file(os.path.join(diroutput,
f'{modelname}_infiltration_method1_inclstatistics.shp'))

# plot results and save figure for example area
plt.figure(figsize=(11.29,4.8))
ax1 = plt.subplot(131)
area_hpd.plot(ax=ax1,facecolor="lightblue")
ax1.title.set_text('Nat bij 500 m3/s')
ax2 = plt.subplot(132, sharex=ax1, sharey=ax1)
area_wetpd.plot(ax=ax2,facecolor="blue")
ax2.title.set_text('Natblijvend na hoogwater')
ax3= plt.subplot(133, sharex=ax1, sharey=ax1)
area_wetinf_diss.plot(ax=ax3,color='green')
ax3.title.set_text('infiltratie gebied')
```

```
ax1.set_xlim([183500, 187000])
ax1.set_ylim([344500, 349500])
plt.setp(ax3.get_yticklabels(), visible=False)
plt.setp(ax2.get_yticklabels(), visible=False)
plt.savefig(os.path.join(diroutput, '{}_infiltratiegebied_methode1.png'.format(modelname)))
plt.close()
%% Sensitivity analysis for minimum waterdepth in infiltrationpolygons
if sensitivityanalysis == True:
    infiltratieoppervlak = []
    nrpolygons = []
    wdepths = np.arange(0,1.1,0.1)

    for wd in wdepths:
        # select only areas with waterdepth > wd
        area_wetinf_sel = area_wetinf[area_wetinf['water_depth_filt'] >= wd]
        # dissolve all polygons and explode multipartfeatures
        area_wetinf_sel = area_wetinf
        area_wetinf_sel['geometry'] = area_wetinf_sel.buffer(0.02, join_style=2)
        area_wetinf_sel = area_wetinf_sel.dissolve()
        area_wetinf_sel['geometry'] = area_wetinf_sel.buffer(-0.01, join_style=2)
        area_wetinf_sel = area_wetinf_sel.explode(index_parts=False, ignore_index=True)

        # save as .shp
        area_wetinf_sel.to_file(os.path.join(diroutput,
        f'{modelname}_infiltration_method1_minwaterdepth_{wd}_buf.shp'))
        # save as .pol
        poly_file = os.path.join(diroutput,
        f'{modelname}_infiltration_method1_minwaterdepth_{wd}_buf.pol')
        poly_obj = geodataframe_to_PolyFile(area_wetinf_sel)
        poly_obj.save(poly_file)

        # calculate surface area of all polygons
        area_wetinf_sel['oppervlakte'] = area_wetinf_sel.area
        # calculate total surface area for infiltration
        infiltratieoppervlak.append(area_wetinf_sel['oppervlakte'].sum())
        # determine total nr of polygons
        nrpolygons.append(len(area_wetinf_sel))

    # plot results and save figure for example area
    plt.figure(figsize=(11.29, 4.8))
    ax1 = plt.subplot(131)
    area_hpd.plot(ax=ax1, facecolor="lightblue")
    ax1.title.set_text('Nat bij 500 m3/s')
    ax2 = plt.subplot(132, sharex=ax1, sharey=ax1)
    area_wetpd.plot(ax=ax2, facecolor="blue")
    ax2.title.set_text('Natblijvend na hoogwater')
```



```

ax3= plt.subplot(133, sharex=ax1, sharey=ax1)
area_wetinf_sel.plot(ax=ax3,color='green')
ax3.title.set_text('infiltratie gebied minimale waterdiepte >{:2.2f}m'.format(wd))
ax1.set_xlim([183500, 187000])
ax1.set_ylim([344500, 349500])
plt.setp(ax3.get_yticklabels(), visible=False)
plt.setp(ax2.get_yticklabels(), visible=False)
plt.savefig(os.path.join(diroutput,
'{}_infiltratiegebied_methode1_min_waterdepth{:2.2f}m.png'.format(modelname,wd)))
plt.close()

# save summary of sensitivity analysis for minimum waterdepth in infiltrationpolygons
samenvatting = pd.DataFrame(data={'aantal polygonen': nrpolygons , 'oppervlak':
infiltratieoppervlak},index=wdepths)
samenvatting.to_csv(os.path.join(diroutput,
f'{modelname}_infiltration_method1_oppervlaktes_minimalewaterdiepte.csv'))

### sensitivity analysis for minimum surface area of infiltrationpolygons
infiltratieoppervlak = []
nrpolygons = []
minarea= np.arange(100000,500000,100000)

for area in minarea:
    area_wetinf_sel = area_wetinf
    # dissolve all polygons and explode multipartfeatures
    area_wetinf_sel = area_wetinf
    area_wetinf_sel['geometry'] = area_wetinf_sel.buffer(0.02, join_style=2)
    area_wetinf_sel = area_wetinf_sel.dissolve()
    area_wetinf_sel['geometry'] = area_wetinf_sel.buffer(-0.01, join_style=2)
    area_wetinf_sel = area_wetinf_sel.explode(index_parts=False,ignore_index=True)
    # select only infiltration areas with areas larger than area
    area_wetinf_sel = area_wetinf_sel[area_wetinf_sel.area>=area]

    # save as .shp
    area_wetinf_sel.to_file(os.path.join(diroutput,
f'{modelname}_infiltration_method1_minarea_{area}.shp'))
    # save as .pol
    poly_file = os.path.join(diroutput,
f'{modelname}_infiltration_method1_minarea_{area}.pol')
    poly_obj = geodataframe_to_PolyFile(area_wetinf_sel)
    poly_obj.save(poly_file)

# calculate surface area of all polygons
area_wetinf_sel['oppervlakte'] = area_wetinf_sel.area
# calculate total surface area for infiltration
infiltratieoppervlak.append(area_wetinf_sel['oppervlakte'].sum())

```

```
# determine total nr of polygons
nrpolygons.append(len(area_wetinf_sel))

# plot results and save figure for example area
plt.figure(figsize=(11.29,4.8))
ax1 = plt.subplot(131)
area_hpd.plot(ax=ax1,facecolor="lightblue")
ax1.title.set_text('Nat bij 500 m3/s')
ax2 = plt.subplot(132, sharex=ax1, sharey=ax1)
area_wetpd.plot(ax=ax2,facecolor="blue")
ax2.title.set_text('Natblijvend na hoogwater')
ax3= plt.subplot(133, sharex=ax1, sharey=ax1)
area_wetinf_sel.plot(ax=ax3,color='green')
ax3.title.set_text('infiltratie gebied minimale oppervlakte >{:2.2f}m'.format(area))
ax1.set_xlim([183500, 187000])
ax1.set_ylim([344500, 349500])
plt.setp(ax3.get_yticklabels(), visible=False)
plt.setp(ax2.get_yticklabels(), visible=False)
plt.savefig(os.path.join(diroutput,
'{}_infiltratiegebied_methode1_minimaaloppervlak{:2.2f}m.png'.format(modelname,area)))
plt.close()

### save summary of sensitivity analysis for minimum surface area of infiltrationpolygons
samenvatting = pd.DataFrame(data={'aantal polygonen': nrpolygons , 'oppervlak':
infiltratieoppervlak},index=minarea)
samenvatting.to_csv(os.path.join(diroutput,
f'{modelname}_infiltration_method1_oppervlaktes_minimaaloppervlak.csv'))
```

Bijlage 2

Presentatie Deltares

“Automatiseren aanmaken infiltratiepolygonen”

Automatiseren aanmaken infiltratiepolygonen

[HYRIDEM-244](#)

Eveline van der Deijl

09-04-2024

Vraagstelling

- In 2023 is in D-HYDRO de opname van infiltratie in uiterwaarden getest in zowel het Maasmodel als het Rijnmodel.
- In het overleg van 19 maart is op basis van de resultaten en aanbevelingen besloten om het onderzoek naar infiltratie te vervolgen.
 - Rijn: [HYRIDEM-108](#)
 - Maas: [HYRIDEM-131](#)

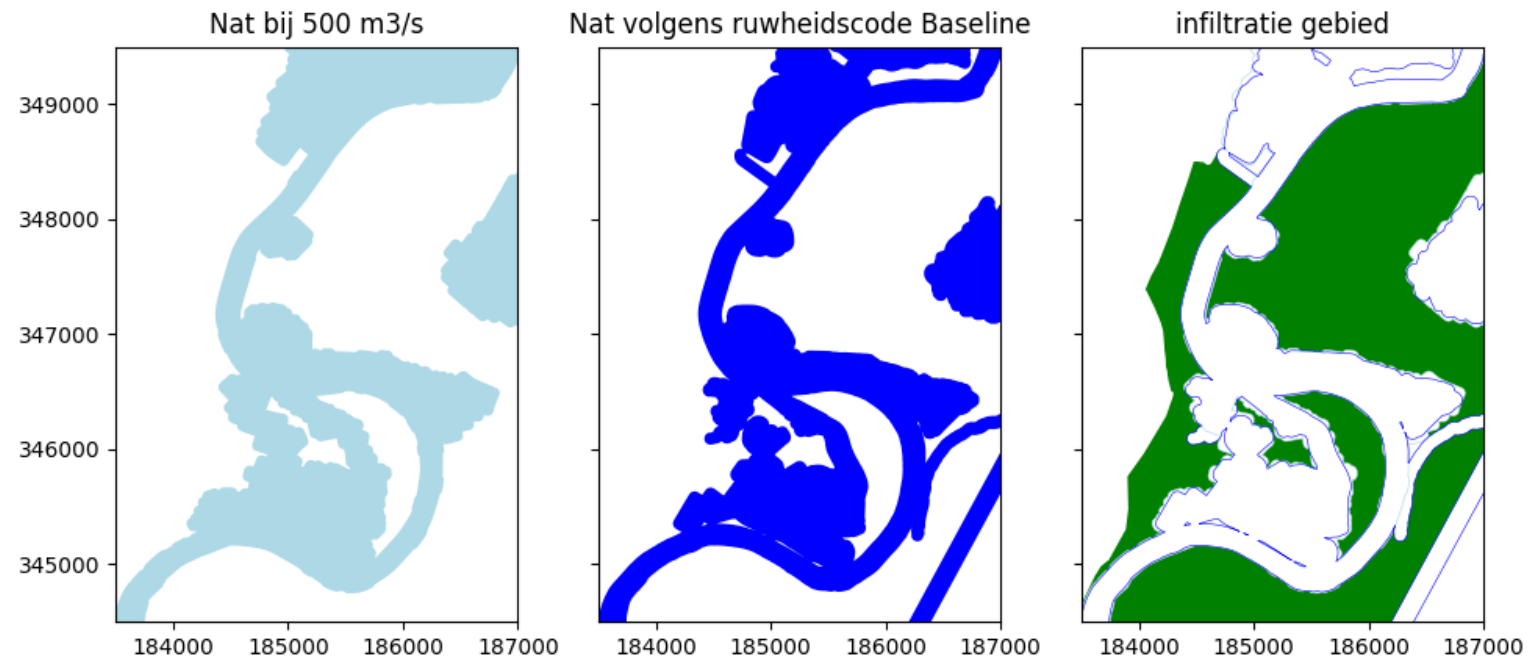
Aanpak vervolg infiltratie

1. **[HYRIDEM-244](#): Automatiseren aanmaken infiltratiepolygonen op basis van methode 1 uit rapport Ron**
 1. **Check of dit inderdaad tot een significante afname in infiltratie-oppervlak leidt.**
 2. **Check gevoeligheid oppervlakte voor hanteren minimale waterdiepte.**
2. Extra sommen Maas en Rijn voor verschillende infiltratiesnelheden (iteratief te bepalen o.b.v. effect op waterstanden, zie stap 3a), met nieuwe polygonen
3. Analyseren resultaten, effect infiltratie op:
 1. Waterstanden op de rivieras, met als criterium $< 2\text{cm}$ effect op de piek, $< 5\text{cm}$ effect in de aanloop
 2. Piekafvoeren en cumulatieve afvoer langs de rivieras
 3. Afvoerverdeling tijdseries (Rijn)
 4. Aantal dagen tot volledige droogval
 5. Potentie voor lange duikers
4. Rapportage

Stap 1 is uitgevoerd door Eveline van der Deijl, de vervolgstappen worden uitgevoerd door Ron Agtersloot (Agtersloot Hydraulisch Advies)

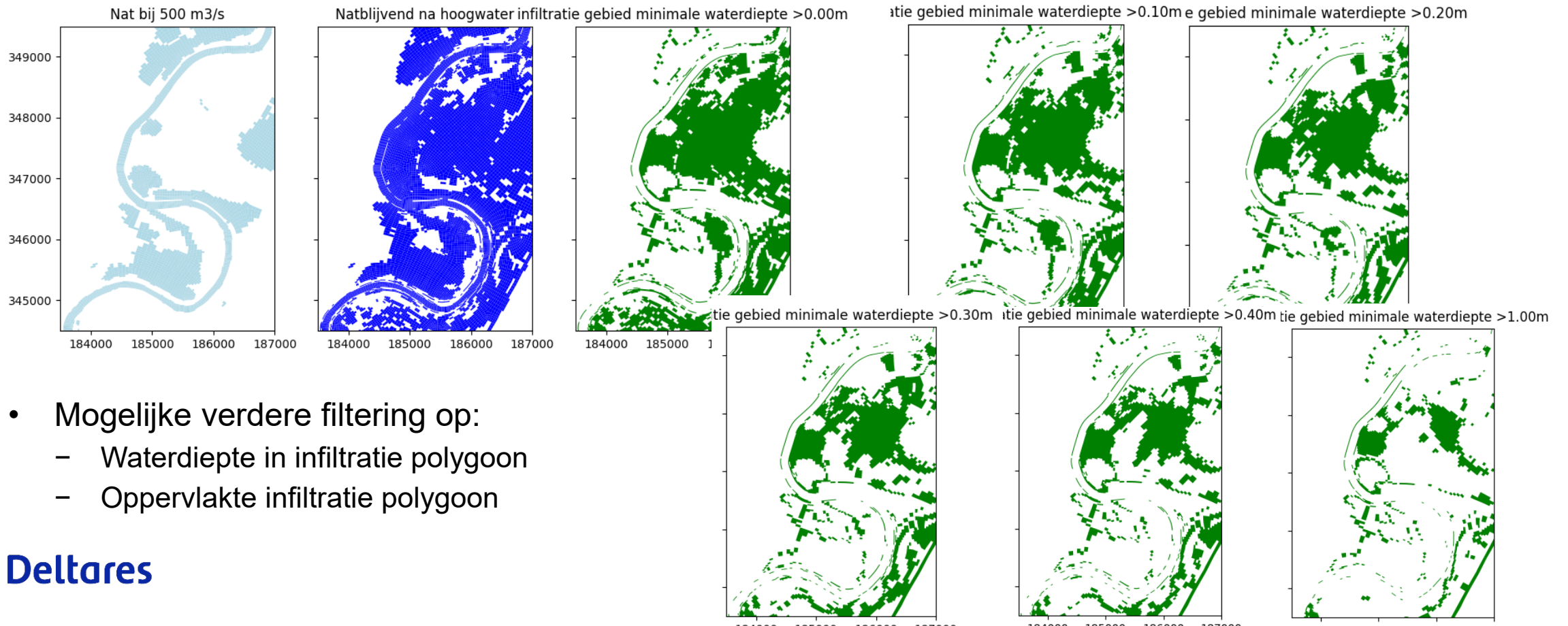
Automatisatie huidige methode (methode 2)

- Gebruik van Python met o.a. packages: geopandas, dfm_tools
- Tot nu toe gebruikte methode (Methode 2) :
Infiltratiegebied = modelomtrek exclusief nat gebied
Nat gebied : nat bij lage afvoer (500 m³/s voor Maas, 5000 voor Rijn) + 50m buffer
nat volgens ruwheidscodes in Baseline + 50 m buffer



Automatisatie nieuwe methode (methode 1)

- **Infiltratiegebied** = nat gebied na hoogwater – nat gebied bij lage afvoer
- **nat gebied na hoogwater** =
 - Maas: in 5 dagen dalende afvoer 4100 m³/s -> 50 m³/s, daarna 50m³/s voor 10 dagen
 - Rijn: in 5 dagen dalende afvoer 16000 m³/s -> 600m³/s, daarna 600m³/s voor 10 dagen



- Mogelijke verdere filtering op:
 - Waterdiepte in infiltratie polygoon
 - Oppervlakte infiltratie polygoon

Resultaten – test Maas nieuwe methode (methode 1)

Minimale waterdiepte [m]	Aantal Polygonen	Infiltratie oppervlak [Ha]	Fractie [%]
0	5.060	14.218	100
0,1	5.422	11.700	82.4
0,2	5.488	10.400	73.2
0,3	5.531	9.393	66.1
0,4	5.511	8.479	59.7
0,5	5.480	7.647	53.9
0,6	5.273	6.883	48.5
0,7	5.138	6.155	43.3
0,8	4.971	5.460	38.5
0,9	4.837	4.864	34.3
1	4.572	4.330	30.5

5060 polygonen vs **297**

14.218 Ha infiltratie oppervlak vs **24.554 Ha**



6G D-Hydro model Maas
Modellering infiltratie



Figuur 3.13: Infiltratie polygonen (gebieden < 4 Ha geselecteerd)

Methode 2

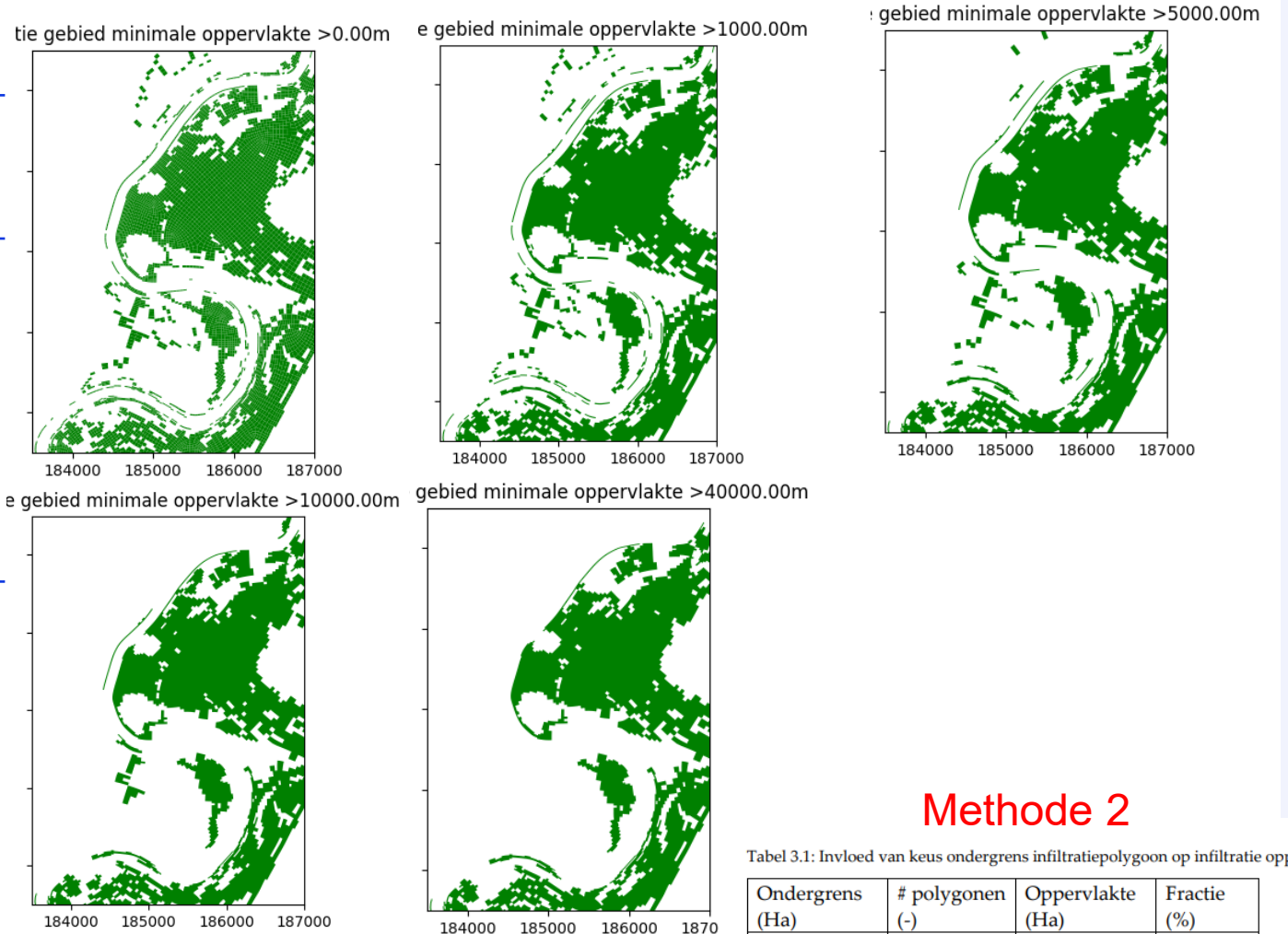
Tabel 3.1: Invloed van keus ondergrens infiltratiepolygoon op infiltratie oppervlakte

Ondergrens (Ha)	# polygonen (-)	Oppervlakte (Ha)	Fractie (%)
0	297	24.554	100%
1	163	24.533	100%
4	137	24.477	100%
10	105	24.275	99%
40	64	23.481	96%
100	41	21.997	90%

Resultaten – test Maas nieuwe methode (methode 1)

	Minimaal oppervlak [Ha]	aantal Polygonen	Infiltratie oppervlak [Ha]	Fractie [%]
	0	5.060	14.218	100
IJVD	0,1	4.166	14.150	100
	0,5	1.384	13.502	95
	1	767	13.067	92
Methode 2	4	254	12.294	85
	10	128	11.342	80
	40	56	10.018	70

Voor 4Ha ondergrens:
 ~254 polygonen vs **137**
 ~12.294 Ha infiltratie oppervlak vs **24.477 Ha**



Methode 2

Tabel 3.1: Invloed van keus ondergrens infiltratiepolygoon op infiltratie oppervlakte

Ondergrens (Ha)	# polygonen (-)	Oppervlakte (Ha)	Fractie (%)
0	297	24.554	100%
1	163	24.533	100%
4	137	24.477	100%
10	105	24.275	99%
40	64	23.481	96%
100	41	21.997	90%

Conclusie

- ~halvering van infiltratieoppervlak door nieuwe methode maar grote toename ($\sim \times 20$) van het aantal polygonen
- Afname van aantal polygonen door selectie op basis van minimaal oppervlak

Discussie punten voor vervolg

- Voorstel: eerst test voor effect van veel polygonen op rekentijd/ opstarttijd simulatie, daarna eventueel methode verder aanpassen
- Rand van infiltratiepolygonen langs de hoofdgeul:
 - Bufferen van natte roostercellen voor lage afvoer? +1 extra cel (indien mogelijk) of vaste afstand?
 - Hogere lagere afvoer?
 - Wat is de laagste afvoer in scenario hoog-> laag?
- Minimaal oppervlak of minimale waterdiepte voor selectie polygonen?
- Nu veel kleine individuele polygonen/gaten doordat samenvoegen niet goed gaat bij slechts 1 rakende rand (gaat wel beter in ArcMap functie)

