



Opdrachtgever: **Waterschap Rivierenland**

D200712376



Hydraulische Randvoorwaarden Waal t.b.v. HWBP Projecten



Opdrachtgever: **Waterschap Rivierenland**



Hydraulische Randvoorwaarden Waal t.b.v. HWBP Projecten



Auteurs:

Gerbert Pleijter
Bob Maaskant
Roy Daggenvoorde
Guus Rongen

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding tot project.....	1
1.2	Doelstelling.....	1
1.3	Leeswijzer	1
2	Uitgangspunten en berekeningen	3
2.1	Uitgangspunten	3
2.2	Berekeningen.....	6
2.3	Combinatie dijkpalen met Hydra-databases voor bepaling rekenwaarde waterstand en HBN.....	7
3	Opvullen van Database Fysica	9
4	Resultaten	11
4.1	Waterstanden	12
4.2	Hydraulisch belasting niveau.....	14
5	Veranderingen van de Hydraulische Randvoorwaarden t.o.v. 2015	20
5.1	Uitgangspunten	20
5.2	Verschillen t.o.v. Hydraulische Randvoorwaarden zoals afgeleid in 2015.....	21
5.3	Detail vergelijking.....	24
6	Conclusies.....	30
6.1	Waterstand.....	30
6.2	Hydraulisch belasting niveau.....	30
6.3	Conclusies over de verschillen met voorgaande hydraulische randvoorwaarden	31
7	Referenties	33
	Bijlage A: Opgevolde locaties	37
	Bijlage B: Fout bij interpoleren van tussenliggende zichtjaren	59
	Bijlage C: Invoer bij Hydra – NL berekening	63

1 Inleiding

1.1 Aanleiding tot project

In het kader van de HWBP versterkingsprojecten langs de noordoever van de Waal moeten de hydraulische randvoorwaarden worden afgeleid. In 2015 zijn deze door HKV bepaald (HKV, 2016) voor de hele Waal voor het werkelijke profiel en standaard profielen (1-op-2 en 1-op-3).

Sinds de oplevering van deze hydraulische randvoorwaarden zijn de uitgangspunten gewijzigd. Dit betreft bijvoorbeeld de beleidsmatige afvoerverdeling op de Pannerdensch Kop en het vaststellen van een fysisch maximum voor de afvoer bij Lobith. Deze zijn o.a. vastgelegd in de nieuwste versie van het Ontwerp Instrumentarium 2014 (versie 4, RWS – WVL, 2017). Om deze wijzigingen te volgen en te anticiperen op nieuwe versies van het Ontwerp Instrumentarium worden in dit project de hydraulische randvoorwaarden conform de laatste inzichten opnieuw afgeleid. De uitgangspunten die in deze studie zijn gehanteerd bij de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden zijn daarom vastgesteld in een gezamenlijke sessie met WSRL, RWS - WVL, KPR, Deltares en HKV. Met deze uitgangspunten wordt (deels) aangesloten op het WBI2017 dat begin 2017 beschikbaar is gekomen.

Daarnaast was het bij de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden in 2015 (HKV, 2016) niet mogelijk om voor alle dijkpalen langs de Waal de hydraulische randvoorwaarden te bepalen. Niet bij alle dijkpalen was een uitvoerlocatie in de hydraulische database beschikbaar. In deze studie is de hydraulische database aangevuld op de ontbrekende locaties.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van het project is:

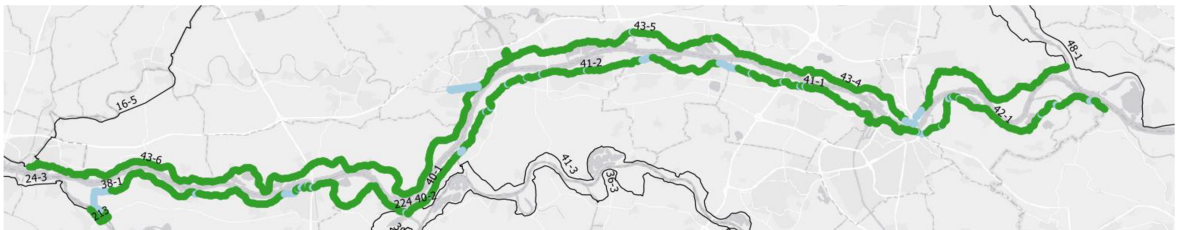
- Het opvullen van de database fysica voor de locaties met ontbrekende uitvoer.
- Het bepalen de van hydraulische ontwerprandvoorwaarden langs de Waal op basis van de laatste inzichten.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 van dit rapport beschrijft de uitgangspunten op basis waarvan de hydraulische randvoorwaarden zijn afgeleid. In Hoofdstuk 3 is beschreven hoe de hydraulische database is aangevuld op de locaties met ontbrekende uitvoer en Hoofdstuk 4 beschrijft vervolgens de berekende hydraulische randvoorwaarden. In Hoofdstuk 5 is beschreven hoe de uitgangspunten en de berekende randvoorwaarden uit 2015 verschillen van de hydraulische randvoorwaarden in deze studie. In Hoofdstuk 6 worden de conclusies gepresenteerd.

2 Uitgangspunten en berekeningen

In deze studie zijn de hydraulische randvoorwaarden afgeleid voor de dijken langs de Waal in het beheergebied van Waterschap Rivierenland (Figuur 1). Paragraaf 2.1 beschrijft de uitgangspunten die zijn toegepast bij afleiding van de hydraulische randvoorwaarden. Deze uitgangspunten zijn vastgesteld in een gezamenlijke sessie tussen WSRL, RWS, KPR, Deltares en HKV. De uitgangspunten kunnen afwijken van de uitgangspunten die zijn gehanteerd bij de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden in 2015 (HKV, 2016). Indien relevant worden de verschillen toegelicht in hoofdstuk 5. In paragraaf 2.2 zijn de uitgevoerde berekeningen beschreven.



Figuur 1: Dijkpalen langs de Waal die vallen in het beheergebied van Waterschap Rivierenland. Voor de groene locaties zijn de hydraulische randvoorwaarden afgeleid.

2.1 Uitgangspunten

- Afvoerverdeling bij de splitsingspunten:
 - De Nederrijn - Lek wordt ontzien bij afvoeren van $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ of hoger¹. De consequentie is dat de afvoer op de Nederrijn - Lek niet hoger wordt dan $3.384 \text{ m}^3/\text{s}$, ongeacht welk klimaatscenario en welke maatgevende afvoer worden gehanteerd (conform OI2014 versie 4)².
 - Hoe de afvoer precies wordt verdeeld over de verschillende riviertakken varieert per afvoerniveau. Deze varieert in het afvoerbereik $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ tot $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figuur 2).
 - Het ontzien van de Nederrijn - Lek (zoals bovenstaand is beschreven) wordt verwerkt door gebruik te maken van de Deltamodel 2015 databases fysica (conform OI2014 versie 4). De waterstand en het HBN in de zichtjaren 2050 en 2100 worden ook bepaald met diezelfde Deltamodel 2015 database. Dit is de enige beschikbare database waar de afvoerverdeling bij de splitsingspunten overeenkomt met hiervoor beschreven uitgangspunten.



Figuur 2: Toegepaste afvoerverdeling bij $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith in de Deltamodel 2015 database.

¹ Gegeven het huidige regelwerk is dit nog niet mogelijk, maar het beleidsuitgangspunt is dat dit voor 2025 wel zo is

² Dat de afvoer niet toeneemt op de Nederrijn-Lek betekent niet dat de waterstand op de Nederrijn-Lek niet meer stijgt als de afvoer van $3.384 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt bereikt (zie paragraaf 4.1.1).

Afvoer bij Lobith [m ³ /s]	13.000	16.000	16.500	17.000	18.000
Afvoer Waal [m³/s]	8.337	10.170	10.572	10.982	11.736
Afvoer Pannerdens Kanaal [m³/s]	4.658	5.827	5.925	6.025	6.257
Afvoer Nederrijn-Lek [m³/s]	2.766	3.374	3.379	3.379	3.382
Afvoer IJssel [m³/s]	1.895	2.427	2.513	2.613	2.845

Tabel 1: Overzicht van afvoerverdelingen over de Rijntakken bij verschillende afvoerniveaus in de Deltamodel 2015 database [m³/s].

- Klimaatverandering (zeespiegelstijging en toename van de afvoer):
 - De klimaatverandering wordt alleen verwerkt in de afvoerstatistiek bij Lobith conform GRADE (o.b.v. KNMI '06 W+ scenario's).
 - De consequentie van de keuze voor het toepassen van de Deltamodel 2015 database voor de zichtjaren 2050 en 2100 (zie bovenstaand punt over het ontzien van de Nederrijn - Lek) is dat geen rekening wordt gehouden met zeespiegelstijging in de zichtjaren 2050 en 2100. Voor de meest benedenstroomse locaties (Gorinchem) kan dit voor het zichtjaar 2100 tot een onderschatting van de HR leiden in de orde van 5-10 centimeter (in een ongunstige situatie). Dit effect neemt snel af voor de meer bovenstroomse locaties.
- Database fysica:
 - De hydraulische randvoorwaarden zijn bepaald met een Deltamodel database 2015 met oeverlocaties om de 100 meter en geüpdatete strijklengtes en gemiddelde bodemhoogtes (zie ook Hoofdstuk 3). Dit is een kleine aanpassing op de Deltamodel-database 2015 als genoemd in het OI2014 versie 4 (in deze database zijn de uitvoerlocaties om de 750 m aanwezig).
 - De golfhoogte wordt bepaald met de golfgroeiformules van Brettschneider (conform de standaard aanpak in het OI2014 en WBI2017 voor de rivieren) en niet met SWAN. Hierbij is geen rekening gehouden met de interactie tussen stroming en golfgroei.
 - De invloed van toekomstige rivierverruimende maatregelen zoals Varik-Heesselt op de waterstand en de afvoerverdeling is niet meegenomen. Indien besloten wordt de maatregel Varik-Heesselt uit te voeren, is het wel van belang de invloed van de maatregel op de afvoerverdeling op de splitsingspunten inzichtelijk te maken.
- Omgang met onzekerheden:
 - Uitgangspunt is om de onzekerheden (model en statistisch) op een scherpere manier mee te nemen, door deze "uit te integreren" (conform de methode in het WBI2017) in plaats van deze mee te nemen middels een onzekerheidstoeslag (zoals voorgeschreven in het OI2014 versie 4). Dit uitgangspunt wijkt dus af van het advies in het OI2014 versie 4, maar is wel in lijn met het "Rekenrecept afleiden ontwerprandvoorwaarden Bovenrivieren Rijntakken met Hydra-NL" van 14 september 2017. De statistische- en modelonzekerheden zijn overgenomen uit de WBI2017 databases fysica³.
 - Statistische- en modelonzekerheden worden beiden uitgeïntegreerd, maar op een andere wijze in de berekening meegenomen. Statistische onzekerheden worden voorafgaand aan de berekeningen uitgeïntegreerd en in de berekeningen meegenomen middels aangepaste statistiekbestanden.

³ Voor de vijf dijkpalen binnen traject 16-1 is gerekend met dezelfde modelonzekerheden als op traject 43-6. Dit omdat de database fysica voor traject 16-1 nog niet beschikbaar was bij vaststelling van de uitgangspunten en de HR in dit project voor deze vijf dijkpalen wordt bepaald met een bovenrivieren databases.

- Modelonzekerheden worden in Hydra-NL uitgeïntegreerd en de kansverdeling (bandbreedte) van de onzekerheid wordt in de invoer opgegeven. Dit onderscheid in werkwijze wordt in het rapport niet gespecificeerd wanneer het gaat over het 'uitintegreeren van onzekerheden'.
- Ook voor de toekomstscenario's zijn de statistische- en modelonzekerheden toegepast zoals deze in het WBI2017 zijn vastgelegd. Dit betekent dat de bandbreedte van de onzekerheid niet verandert richting de toekomst (conform het rekenrecept voor de bovenrivieren).
 - Afvoer- en windstatistiek:
 - Toepassing van de afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith o.b.v. van GRADE inclusief uitgeïntegreerde statistische onzekerheden. Deze statistiek is voor de zichtjaren 2050 en 2100 nog niet beschikbaar binnen het OI2014 versie 4 en is in deze studie daarom afgeleid. De afvoerstatistiek inclusief uitgeïntegreerde onzekerheden is afgeleid conform de werkwijze binnen het WBI2017. In het OI2014 is aangenomen dat statistische onzekerheid in de afvoer in de toekomst niet toeneemt.
 - De basisdata voor de afvoerstatistiek inclusief uitgeïntegreerde onzekerheden is die van GRADE voor de zichtjaren 2015, 2050 en 2100 o.b.v. het KNMI'06 W+ scenario. De verwachtingswaarden komen overeen met de bestaande OI2014 statistiek (zonder onzekerheden).
 - Voor de windstatistiek wordt gebruik gemaakt van windstation Deelen.
 - Aftoppen van de afvoer bij Lobith:
 - De rivierafvoer bij Lobith wordt afgetopt boven 18.000 m³/s.
 - Toekomstscenario's:
 - De zichtjaren waarvoor de waterstanden en HBN's worden bepaald zijn 2015, 2050 en 2100. De waterstanden en HBN's de zichtjaren in 2025, 2075 en 2125 worden bepaald door de Hydra resultaten in de zichtjaren 2015, 2050 en 2100 te inter- of extrapoleren naar de gevraagde zichtjaren (2025, 2075 en 2125).
 - Door deze werkwijze en de invloed van het aftoppen worden de waterstanden en HBN's voor de geïnterpoleerde zichtjaren mogelijk niet correct weergegeven. Uit een beknopte gevoeligheidsanalyse blijkt dat deze fout beperkt is (zie Bijlage B).
 - Software:
 - Toepassing van de meest recente versie van Hydra-NL (versie 2.3.2).
 - In Hydra-NL wordt standaard gerekend met een stapgrootte van de hulpdijkhoogte van 1 cm wanneer sprake is van aftoppen van de rivierafvoer. Voor dit project is dit bijgesteld naar een stapgrootte van de hulpdijkhoogte van 5 cm voor de waterstand en 10 cm voor het HBN. Dit om de rekentijd en daarmee de doorlooptijd van het project te beperken. Het effect van deze aanpassing op de berekende waterstanden en HBN's is naar verwachting beperkt tot 1cm (op basis van steekproefsgewijze controle).
 - Lokale invloeden:
 - Bij de bepaling van de golfhoogte is geen rekening gehouden met (golffremmende) begroeiing of bebouwing in het rivierbed.
 - Bij de bepaling van de waterstanden (in WAQUA) is wel rekening gehouden met bebouwing in het rivierbed. Deze kunnen namelijk zorgen voor opstuwing van de waterstand.

2.2 Berekeningen

Voor de HWBP-projecten langs de Waal zijn de hydraulische randvoorwaarden bepaald voor de faalmechanismen hoogte, piping en macrostabiliteit. In onderstaande tabel zijn de trajecten langs de Waal opgenomen inclusief bijbehorende normen. In deze studie zijn de hydraulische randvoorwaarden afgeleid bij de maximaal toelaatbare overstromingskans.

Normtraject	Max. toelaatbare overstromingskans	Signaalwaarde
38-1	1/10.000	1/30.000
40-1	1/30.000	1/30.000
41-1	1/10.000	1/30.000
41-2	1/3.000	1/10.000
42-1	1/3.000	1/10.000
43-4	1/10.000	1/30.000
43-5	1/10.000	1/30.000
43-6	1/10.000	1/30.000

Tabel 2: Overzicht beschouwde trajecten.

Bij de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden zijn de volgende berekeningen uitgevoerd:

- Waterstanden zijn berekend bij de maximaal toelaatbare overstromingskans.
- De HBN's zijn bepaald bij de faalkanseis op doorsnedeniveau. Hiervoor wordt de maximaal toelaatbare kans gecorrigeerd met de faalkansruimtefactor voor het betreffende faalmechanisme. Dit is $\omega=0,24$ voor golfoverslag, etc. De factor voor het meenemen van het lengte effect is gelijk gekozen aan $N=1$, in overeenstemming met het OI2014 versie 4. Voor traject 43-6 resulteert dit bijvoorbeeld in een overschrijdingskans voor golfoverslag van $1/10.000 * 0.24 / 1 = 1/41.667$ per jaar.
- Het HBN en de waterstand worden per dijkpaal berekend voor de zichtjaren 2015, 2025, 2050, 2075, 2100 en 2125.
- De HBN's worden afgeleid bij golfoverslagdebieten van 0.1, 1, 5, 10 en 50 l/s/m. Daarnaast wordt de hoogte voor overloop afgeleid. Overloop is gedefinieerd als de waterstand die hoort bij de overschrijdingskans van het HBN (bij een normtraject met een maximaal toelaatbare overstromingskans van 1/10.000 per jaar is Overloop dus gedefinieerd als de waterstand met een overschrijdingskans van 1/41.667 per jaar).
- Voor bepaling van het HBN worden profielen gebruikt met taludhellingen van 1:2 en 1:3 en de werkelijke profielen. De werkelijke profielen komen overeen met de profielen die gebruikt zijn bij het afleiden van de hydraulische randvoorwaarden in 2015 (HKV, 2016). De werkelijke taluds op het traject Tiel-Gorinchem zijn afgeleid op basis van het AHN2 en door het waterschap aangeleverd. Voor de overige trajecten zijn op basis van het AHN2 de werkelijke profielen opgesteld. Voor de bepaling van het HBN op basis van het werkelijke profiel wordt het bovenste deel van het talud doorgetrokken om de benodigde hoogte te bepalen. Bij sommige dijkpalen zijn in de vorige studie geen dwarsprofielen afgeleid. Voor deze dijkpalen is het profiel volgens dezelfde werkwijze geschematiseerd.

2.3 Combinatie dijkpalen met Hydra-databases voor bepaling rekenwaarde waterstand en HBN

De berekeningen in Hydra-NL worden gedaan met zogenaamde Hydra-locaties die aanwezig zijn in de database. Deze Hydra-locaties komen echter niet exact overeen met de locatie van de dijkpalen. Om de HBN's zo goed mogelijk te bepalen en een zo compleet mogelijk beeld te geven, is elke dijkspaal gekoppeld aan de dichtstbijzijnde Hydra-locatie. De HBN's worden dan op deze Hydra-locatie berekend met de eigenschappen horende bij de dijkpalen (profiel en dijknormaal). Hierdoor hebben een aantal dijkpalen dezelfde dichtstbijzijnde Hydra-locatie (i.e. ze maken gebruik van dezelfde waterstanden en golfcondities), maar hebben ze wel de lokale eigenschappen (profiel en dijknormaal) behorende bij die specifieke dijkspaal.

3 Opvullen van Database Fysica

In de database fysica is voor verschillende tracés geen uitvoerlocatie beschikbaar. Figuur 3 toont in groen alle locaties waar uitvoerlocatie missen in de database fysica. In de meeste gevallen wordt dit veroorzaakt door droogval. Om de waterstand ter hoogte van de dijkpalen bij de ontbrekende uitvoerlocaties toch te kunnen berekenen is de waterstand voor deze uitvoerlocaties opgevuld. Dit hoofdstuk beschrijft de werkwijze voor het opvullen van de database. Deze methode is specifiek ontwikkeld voor de Waal.



Figuur 3: *Gaten in de uitvoerlocaties zijn ontbrekende Hydra-locaties in database Referentie 2015. Groene bolletjes geven de missende locaties weer.*

De onbekende waterstanden zijn opgevuld op basis van waterstanden nabij de locatie waar de uitvoer mist (groene bolletjes Figuur 4). Om een ruimtelijk beeld te krijgen van de waterstanden nabij een missende oeverlocaties zijn vier type locaties gedefinieerd:

1. De reeds aanwezige oeverlocaties in de database. Deze liggen stroomopwaarts en stroomafwaarts van de missende locaties tegen de oever van de rivier (rode bolletjes Figuur 4);
2. Uitvoerlocaties 75 m richting de as van de rivier zijn t.o.v. de oeverlocaties (gele bolletjes Figuur 4);
3. Uitvoerlocaties 150 m richting de as van de rivier zijn t.o.v. de oeverlocaties (blauwe bolletjes Figuur 4);
4. Waterstand op de as van de rivier (zwarte bolletjes Figuur 4). Voor deze analyse is om de 100 m een aslocatie gedefinieerd;



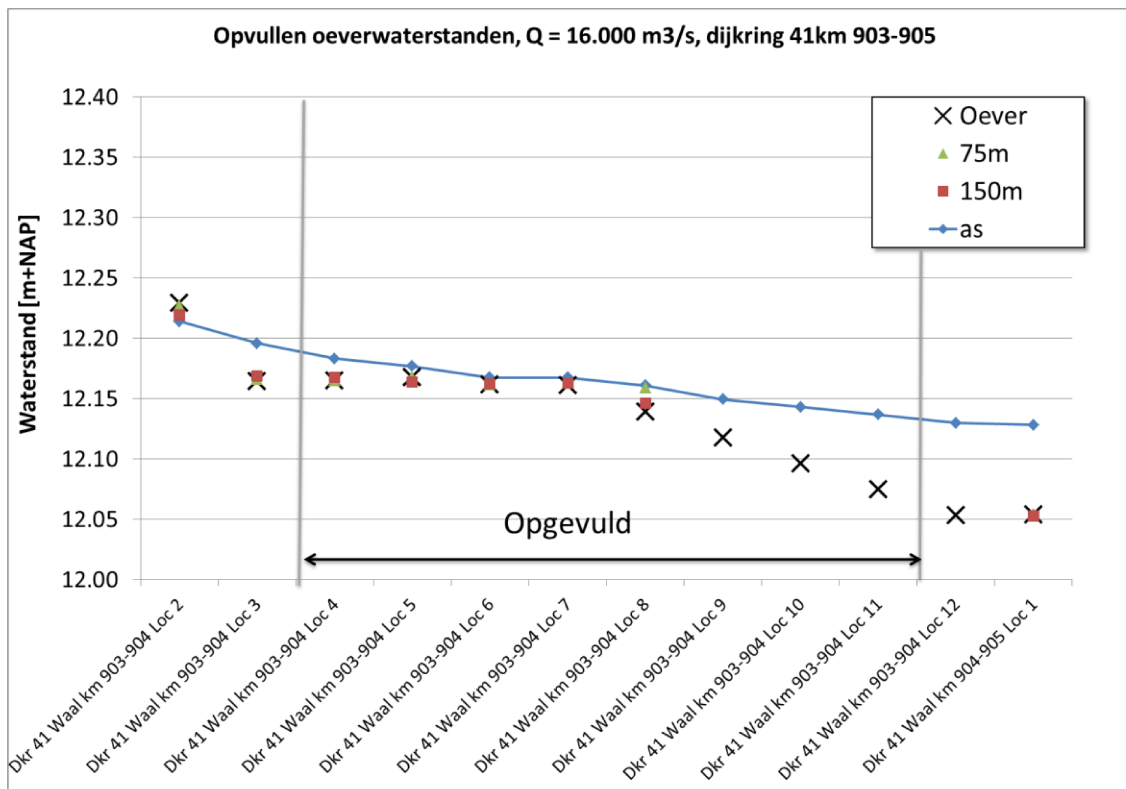
Figuur 4: *Beschikbare uitvoerlocaties opvullen van de database bij Druten: missende oeverlocaties (groen), aanwezig oeverlocaties (rood), aanvullende locaties op 75 m (geel) en 150 m uit de oever (blauw), aslocaties (zwart).*

De waterstanden ter plaatse van ontbrekende uitvoerlocaties worden in eerste instantie bepaald op basis van de volgende twee basisregels:

1. Als het verschil in waterstand tussen de locaties op 75 m en 150 m minder dan 1 cm is, wordt de waterstand van de oever gelijkgesteld aan die op 75 m van de oever;
2. Als de waterstand op 75 m niet beschikbaar is en het verschil in de waterstand tussen 150 m en de as minder dan 1 cm is, wordt de waterstand van de oever gelijkgesteld aan die op 150 m van de oever.

Indien de waterstand niet bepaald kan worden op basis van de bovenstaand twee basisregels, wordt de waterstand voor de missende oever in eerste instantie bepaald door lineair interpolatie tussen de naastgelegen oeverlocaties. Vervolgens wordt op basis van expert judgement visueel gecontroleerd of de waterstanden logisch zijn, gegeven het lokale rivierbed en het stromingspatroon. Daarbij wordt gecontroleerd of de waterstanden logisch aansluiten op de reeds bekende waterstanden van de naastgelegen uitvoerpunten.

Figuur 5 laat zien hoe deze procedure uitpakt bij Druten. Hier is sprake van droogval omdat de uitvoerlocaties gelegen zijn ter hoogte van een hooggelegen scheepsreparatiebedrijf (de zwarte kruisjes tussen de grijze verticale lijnen zijn opgevuld). Voor de meeste locaties is het verschil tussen de waterstand op de as van de Waal en uitvoerlocaties 75 m en 150 m uit de oever dusdanig klein dat de waterstand uit de nabij gelegen locatie is overgenomen als nieuwe waterstand voor de oeverlocatie (stroomopwaarts van locatie Dkr 41 Waal 903 – 904 Loc 8). Voor resterende locaties, waar geen waterstand op 75 m of 150 m voor de oeverlocaties beschikbaar is, is geïnterpoleerd tussen de naastgelegen oeverlocaties. Dit om een zo goed mogelijke aansluiting te realiseren. Het resultaat voor de overige 19 opgevulde locaties is weergegeven in Bijlage A.



Figuur 5: Opgevulde punten Druten (zwarte kruisjes tussen de grijze verticale lijnen).

4 Resultaten

In dit hoofdstuk zijn de berekende Hydraulische Randvoorwaarden toegelicht. In het vervolg van dit hoofdstuk zijn als eerste de waterstanden (paragraaf 4.1) en hydraulische belastingniveaus (paragraaf 4.2) verder toegelicht. In deze paragraaf is ook de opgave beschreven. Deze is gedefinieerd als het verschil tussen het HBN en de huidige kruinhoogte. Het HBN en de opgave is weergegeven voor verschillende zichtjaren, verschillende overslaggebieden en verschillende profieltypen. De verschillen met de hydraulische randvoorwaarden zoals deze in 2015 zijn afgeleid langs de Waal zijn weergegeven in hoofdstuk 5.

De hydraulische randvoorwaarden zijn in dit hoofdstuk alleen gepresenteerd voor het traject Ophemert-Waardenburg. Voor het HBN is de situatie bij 5 l/s/m en het werkelijke profiel in het zichtjaar 2015 als basis genomen. In de paragrafen 4.2.1 t/m 4.2.3 is vervolgens de invloed van een variërend overslagdebiet (paragraaf 4.2.1), variërende profielschematisatie (paragraaf 4.2.2) en variërende zichtjaren (paragraaf 4.2.3) beschouwd ten opzicht van de basissituatie (HBN, 5 l/s/m, werkelijke profiel, 2015). Via *Hydra-as-a-Service* (<http://hydra-as-a-service.hkvservices.nl/wsrl/>)⁴ en de bijgevoegde Excel sheet zijn de resultaten voor de hele Waal en alle combinaties van overslagdebiet, profiel en zichtjaar weergegeven. In *Hydra-as-a-Service* zijn de verschillende berekeningen te selecteren en onderling te vergelijken. Daarnaast zijn de illustratiepunten die horen bij de HBN-berekeningen weergegeven. Hier is dus meer detailinformatie over de berekeningen terug te vinden.

De HR2006 was tot voor kort de meest recente set van hydraulische randvoorwaarden die wettelijk zijn vastgesteld. De hydraulische randvoorwaarden zoals gepresenteerd in deze studie (en in de studie van 2015) wijken op onderstaande punten af van de HR2006:

- Klimaatverandering van 2006 tot 2015 (verhoging van de waterstand)
- Normverzwaring van 1/1.1250 naar 1/10.000 per jaar (verhoging van de waterstand)
- Het uitgevoerd zijn van PKB Ruimte voor de Rivier (verlaging van de waterstand)
- Invloed van GRADE op de werklijn (verlaging van de waterstand)
- Verandering van Hydra-model, Hydra-R naar Hydra-NL (geen impact op de waterstand wel op de berekende HBN's). In plaats van één ontwerpwindnelheid per windrichting wordt de kans van voorkomen van de waterstand gecombineerd met de kans van voorkomen van de windrichting.
- Uitintegreren van onzekerheden in plaats van een robuustheidstoetslag.

Deze verschillen zijn uitgebreid beschreven in HKV (2016). In de huidige rapportage ligt de focus op de verschillen met de hydraulische randvoorwaarden zoals deze in 2015 zijn afgeleid langs de Waal (paragraaf 5.2).

De waterstand en het HBN zijn in paragraaf 4.1 en 4.2 gevisualiseerd voor het traject Ophemert - Waardenburg. Dit omdat de bandbreedten van de mogelijke verschillen goed weergegeven worden op het traject Ophemert - Waardenburg. Het traject bevat zowel delen waar de afvoer relatief belangrijk is in een HBN (oostelijke oriëntatie en korte strijklengtes) als delen waar de wind relatief belangrijk is in een HBN⁵ (westelijke oriëntatie en lange strijklengtes). De gepresenteerde resultaten zijn daarom in principe relevant voor alle trajecten langs de Waal. Uitzonderingen op het algemene beeld zijn in de tekst beschreven.

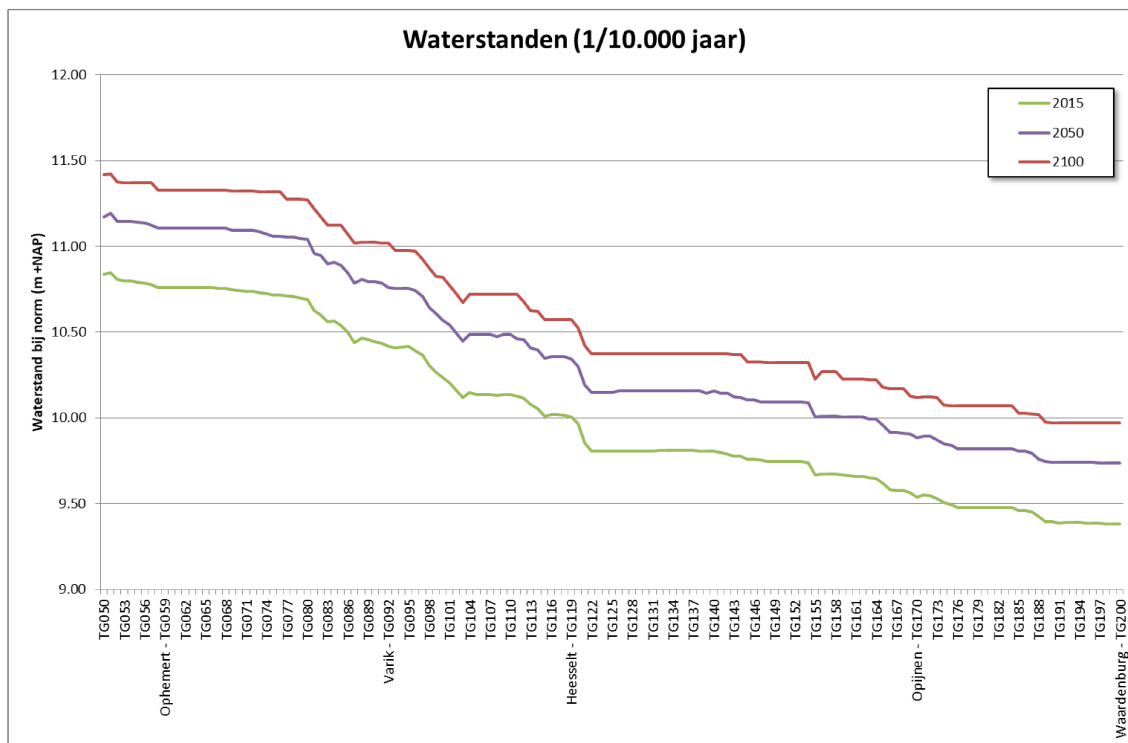
⁴ Bijbehorende inlog gegevens zijn opgeleverd aan Martin Groenewoud en Chris Sevink.

⁵ Het HBN is in alle gevallen afvoer gedomineerd – de (relatieve) mate waarin de wind invloed heeft is afhankelijk van de oriëntatie en de geometrie van de dijk en het rivierbed.

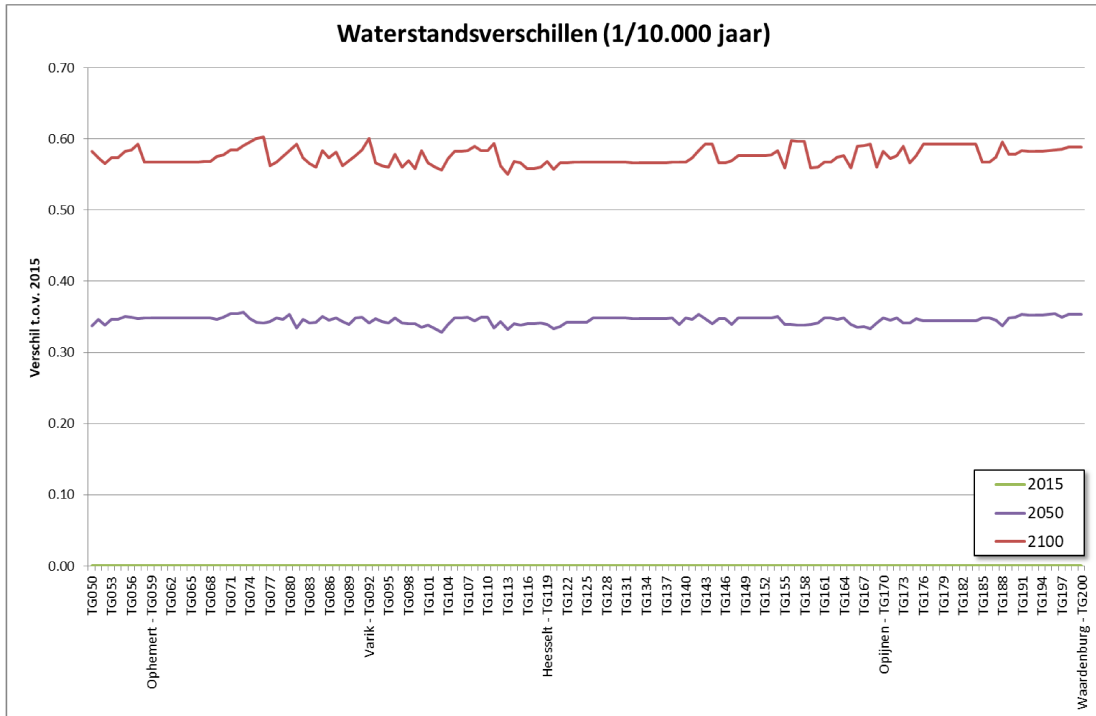
De resultaten zijn in dit hoofdstuk weergegeven voor de niet geïnterpoleerde zichtjaren 2015, 2050 en 2100, omdat de nauwkeurigheid van de waterstanden en HBN's voor de niet geïnterpoleerde zichtjaren (2015, 2050 en 2100) hoger is dan voor geïnterpoleerde zichtjaren (2025, 2075 en 2125).

4.1 Waterstanden

In Figuur 6 zijn de waterstanden bij de maximaal toelaatbare overstromingskans weergegeven langs het traject Ophemert-Waardenburg voor verschillende zichtjaren. De waterstanden nemen toe naarmate het zichtjaar verder in de toekomst ligt. Dit wordt veroorzaakt door de klimaatverandering. Opvallend is dat de klimaatopgave tussen 2015 en 2050 groter is dan de toename tussen 2050 en 2100. Dit is in meer detail te zien aan de waterstandverschillen t.o.v. 2015 in Figuur 7. De figuur laat zien dat de waterstand in 2100 bijna 60 cm hoger ligt dan de waterstand in 2015. De verwachte waterstandstijging bedraagt 8-10 cm per 10 jaar tot aan 2050 daarna neemt af tot 3-6 cm per 10 jaar voor de periode 2050-2100. De verminderde waterstandstijging wordt vooral veroorzaakt door aftoppen van de afvoer bij Lobith bij 18.000 m³/s.



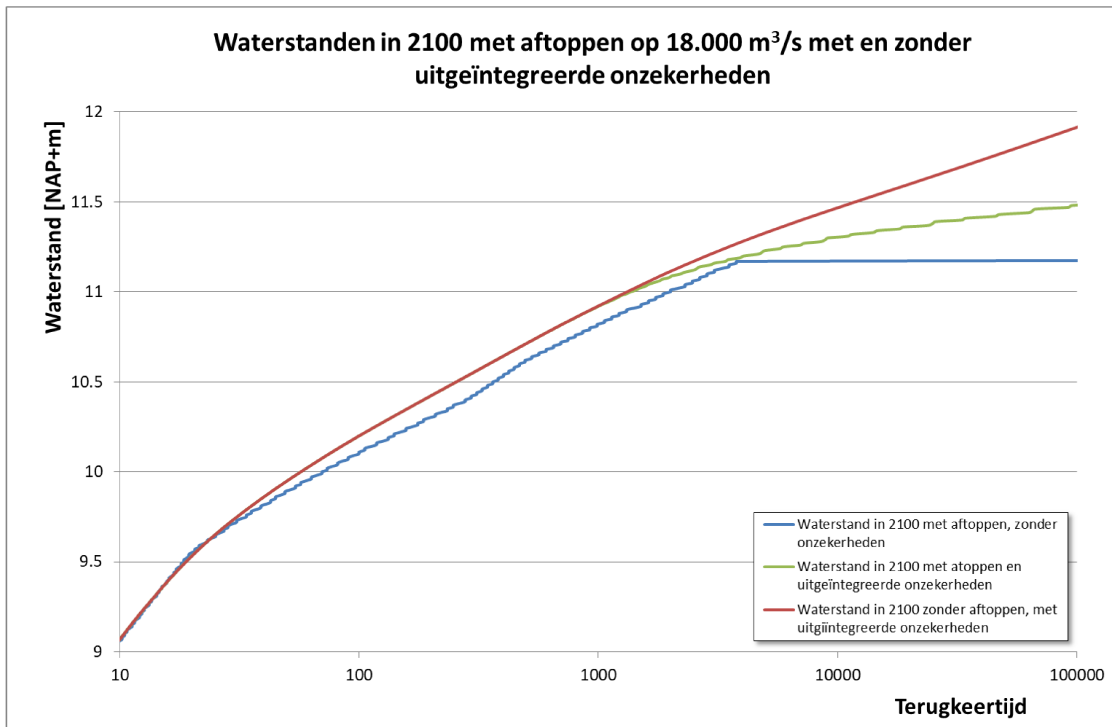
Figuur 6: Waterstand bij de maximaal toelaatbare overstromingskans op het traject Ophemert-Waardenburg voor verschillende zichtjaren.



Figuur 7: Waterstandenverschillen tussen de verschillende zichtjaren over het traject Ophemert-Waardenburg voor verschillende zichtjaren.

4.1.1 Aftoppen bij het uitintegreren van modelonzekerheden

Bij de analyse van de resultaten valt op dat de waterstand nog steeds toe kan nemen als de maximale waarde van de afvoer (van 18.000 m³/s) bereikt is. Dit volgt uit het toepassen van modelonzekerheden (zie Figuur 8).



Figuur 8: Waterstanden bij dijkpaal TG075 in 2100 met aftoppen op 18.000 m³/s met en zonder uitgeïntegreerde onzekerheden.

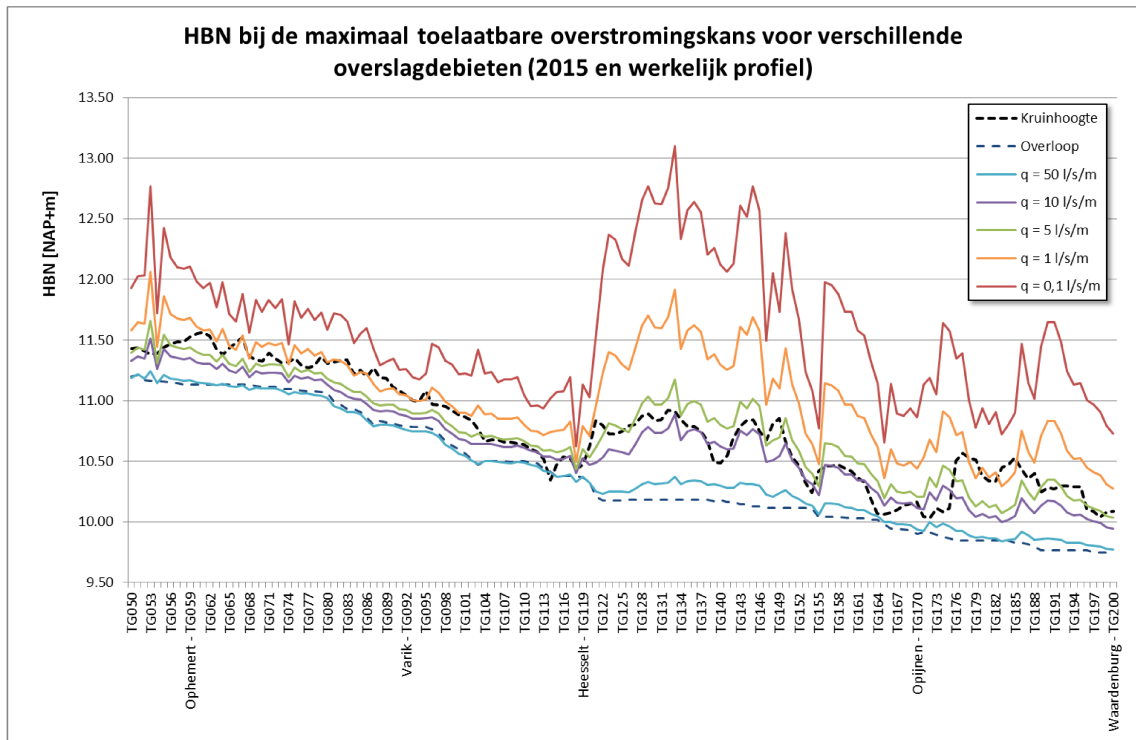
Wanneer geen rekening wordt gehouden met onzekerheden geeft een afvoerniveau van 18.000 m³/s dus lokaal altijd dezelfde waterstand. Omdat de modellen onzeker zijn, worden in het WBI2017 onzekerheden expliciet meegenomen. Dit heeft als consequentie dat een afvoerniveau van 18.000 m³/s niet altijd dezelfde lokale waterstand oplevert. Deze kan hoger of lager uitvallen omdat het model een bepaalde fout maakt. Als we alle combinaties van afvoeren en onzekerheden netjes -wiskundig- verwerken, valt de balans (in de meeste gevallen) naar boven uit. Dit betekent dat een waterstand 'met onzekerheden' hoger is dan een waterstand 'zonder onzekerheden'. Wanneer de aftopgrens is bereikt, kan de afvoer niet verder toenemen bij een kleinere kans van voorkomen van de waterstand. In plaats dat de afvoer toe neemt bij een waterstand met een kleinere kans van voorkomen, neemt de verwachte modelfout toe (omdat de afvoer niet verder toe kan nemen). Hierdoor kan de waterstand dus nog steeds toenemen, ook als het aftopniveau bereikt is.

Ter informatie: in de KPR review van de hydraulische randvoorwaarden – auteur Robert Vos – is aangegeven dat nader onderzoek wordt verricht over de hierboven beschreven interactie tussen modelonzekerheden en aftoppen.

4.2 Hydraulisch belasting niveau

4.2.1 Overslagdebieten

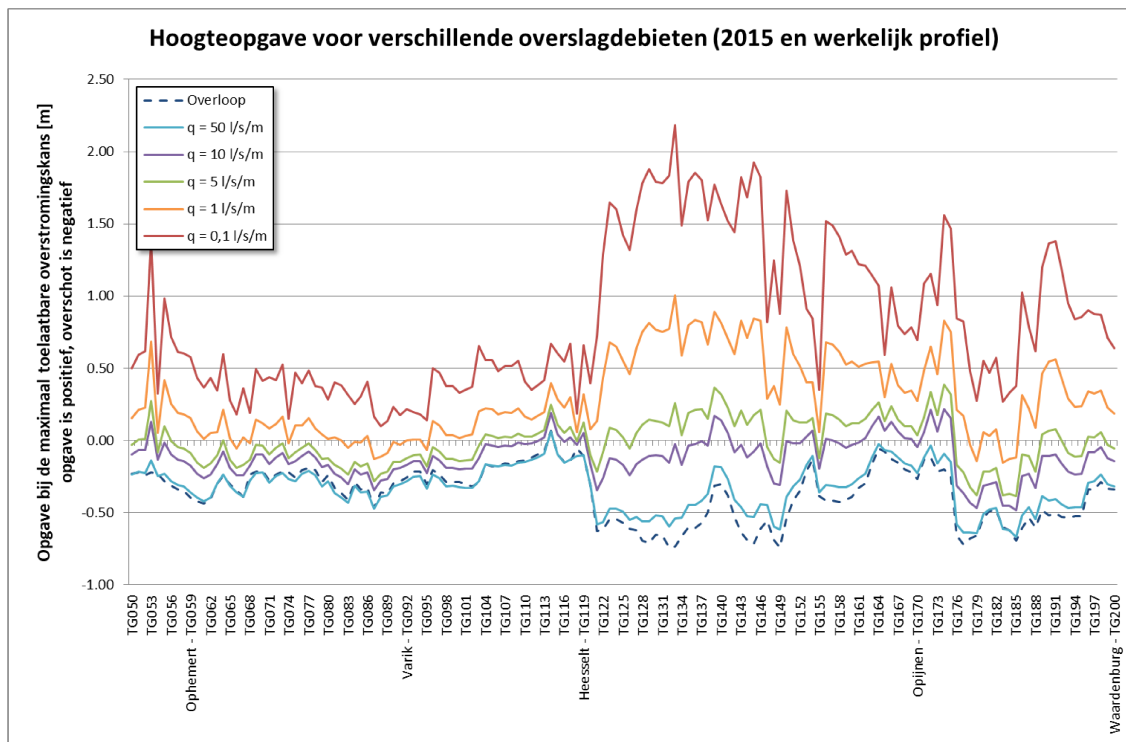
De hydraulische belastingniveaus zijn berekend voor vijf verschillende overslagdebieten namelijk 0.1, 1, 5, 10 en 50 l/s/m en bij overloop. Overloop is hier gedefinieerd als de waterstand die hoort bij de overschrijdingskans van het HBN. Dit is weergegeven in Figuur 9 voor het zichtjaar 2015 bij het huidige profiel. In deze figuur is de aanwezig kruinhoogte weergegeven met de zwarte gestippelde lijn. Te zien is dat het HBN tussen Heesselt en Waardenburg erg gevoelig is voor het overslagdebiet. Dit komt omdat hier sprake is van lange strijklengtes, waardoor sprake is van relatief hoge golven. De Waaldijk tussen Ophemert en Heesselt is oostelijk gelegen en er is sprake van korte strijklengtes, hierdoor zijn de golven lager en is het HBN minder gevoelig voor de keuze voor het overslagdebiet.



Figuur 9: HBN voor verschillende overslagdebieten in het jaar 2015 bij het werkelijke profiel. Huidige kruinhoogte is weergegeven met de zwarte stippellijn.

In Figuur 10 is de opgave weergegeven bij verschillende overslagdebieten voor de situatie in 2015 bij het werkelijk aanwezige profiel. In deze figuur is de hoogteopgave positief gedefinieerd en een hoogteoverschot negatief. Zoals verwacht neemt de opgave af bij een hoger overslagdebiet. Bij een overslagdebiet van 5 l/s/m ligt het HBN voor het zichtjaar 2015 rond de aanwezige kruinhoogte. Er is sprake van relatief kleine overschotten en relatief kleine tekorten. Bij een overslagdebiet van 10 l/s/m zijn de HBN's op nagenoeg het hele traject Ophemert – Waardenburg lager dan de aanwezig kruinhoogte.

In Figuur 9 en Figuur 10 is te zien dat het HBN en dus ook de opgave met 5 tot 20 cm afneemt op het traject Ophemert - Waardenburg als een overslagdebiet van 10 l/s/m in plaats van een overslagdebiet 5 l/s/m wordt toegepast. In het geval dat gekozen wordt voor een overslagdebiet van 1 l/s/m in plaats van 5 l/s/m, neemt het HBN en de bijbehorende opgave met 20 tot maximaal 75 cm toe. Op locaties waar sprake is van lange strijk lengtes is het verschil groter dan op locaties met beperkte strijk lengtes (en minder golfwerking). Tussen Heesselt en Oppijnen zijn de verschillen daarom het grootst en tussen Ophemert en Heesselt zijn de verschillen beperkt.

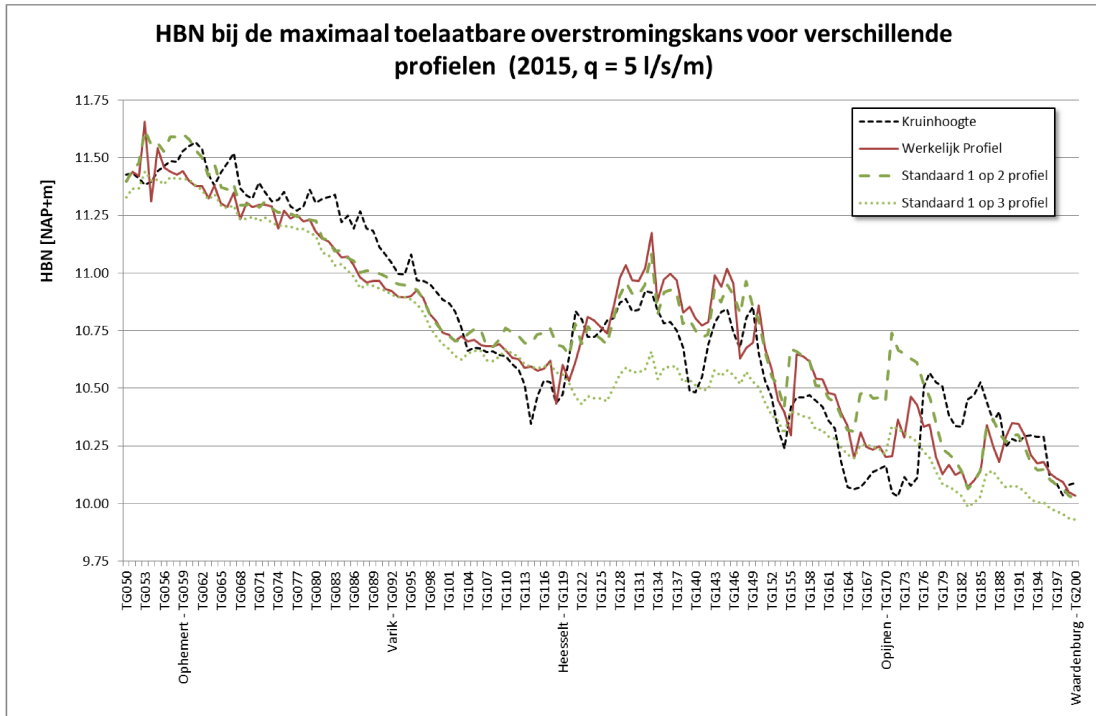


Figuur 10: Opgave (verschil aanwezige kruinhoogte en HBN) voor verschillende overslagdebieten in het jaar 2015 bij het werkelijke profiel.

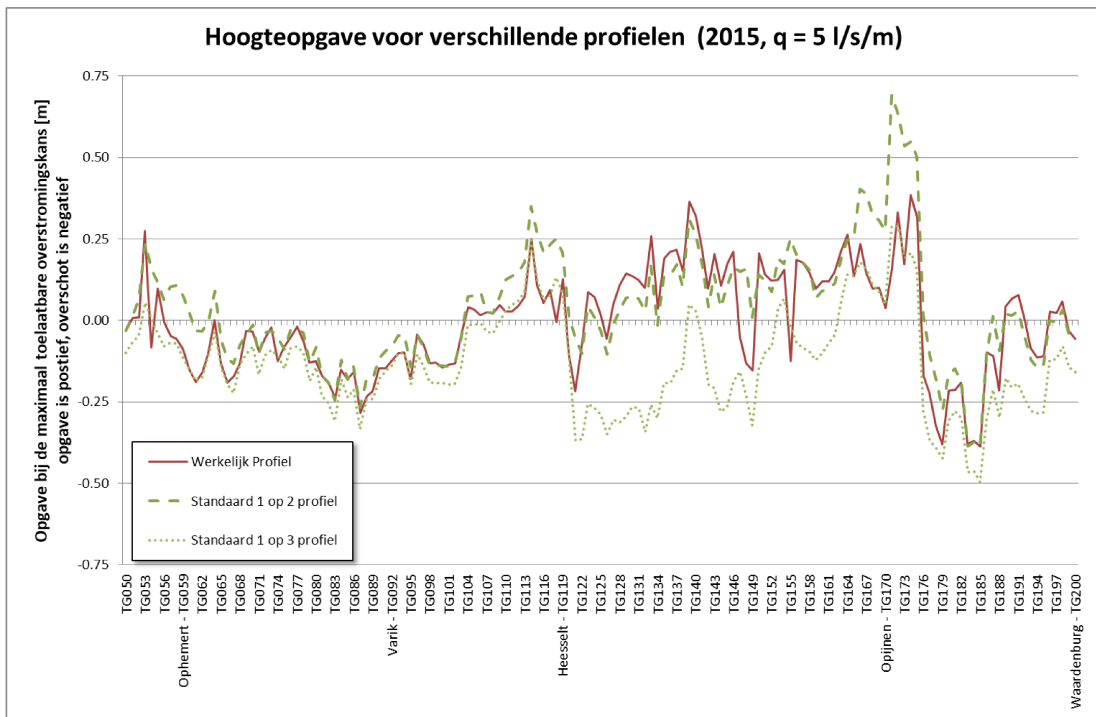
4.2.2 Profielen

Het HBN is bepaald bij zowel het werkelijke profiel als bij een standaard 1-op-2 en een standaard 1-op-3 profiel. Dit is weergegeven in Figuur 11 voor het zichtjaar 2015 en een overslagdebiet van 5 l/s/m. In het algemeen geldt dat steilere taluds een hoger HBN hebben dan flauwere taluds. De figuur laat zien dat de HBN's en dus de opgave tussen Heesselt en Opijnen 20 – 40 cm gunstiger uitvallen indien op dit traject een taludverflauwing tot 1op3 wordt toegepast. Daarnaast is duidelijk te zien dat de taludhelling tussen Ophemert en Varik nauwelijks invloed heeft op het HBN. Dit komt omdat het effect van golven, en dus de taludhelling, daar beperkt is.

De opgave is bij de verschillende profielschematisaties in het zichtjaar 2015 bij een overslagdebiet van 5 l/s/m weergegeven in Figuur 12. In de figuur is te zien dat door een taludverflauwing toe te passen naar een 1-op-3 profiel de opgave tussen Heesselt en Opijnen nagenoeg kan worden opgelost (in 2015 bij een overslagdebiet van 5 l/s/m).



Figuur 11: HBN voor verschillende profielschematisaties in het jaar 2015 bij een overslagdebiet van 5 l/s/m. Huidige kruinhoogte is weergegeven met de zwarte stippellijn.



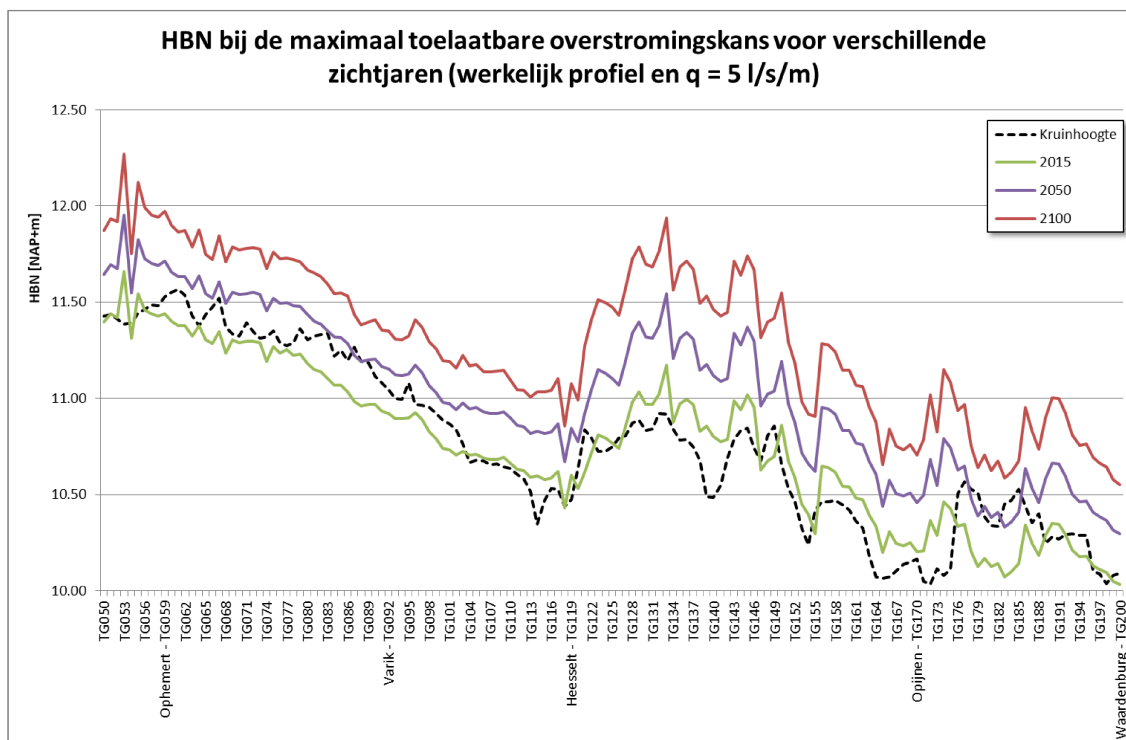
Figuur 12: Opgave (verschil aanwezige kruinhoogte en HBN) voor verschillende profielschematisaties in het jaar 2015 een overslagdebiet van 5 l/s/m.

4.2.3 Zichtjaren

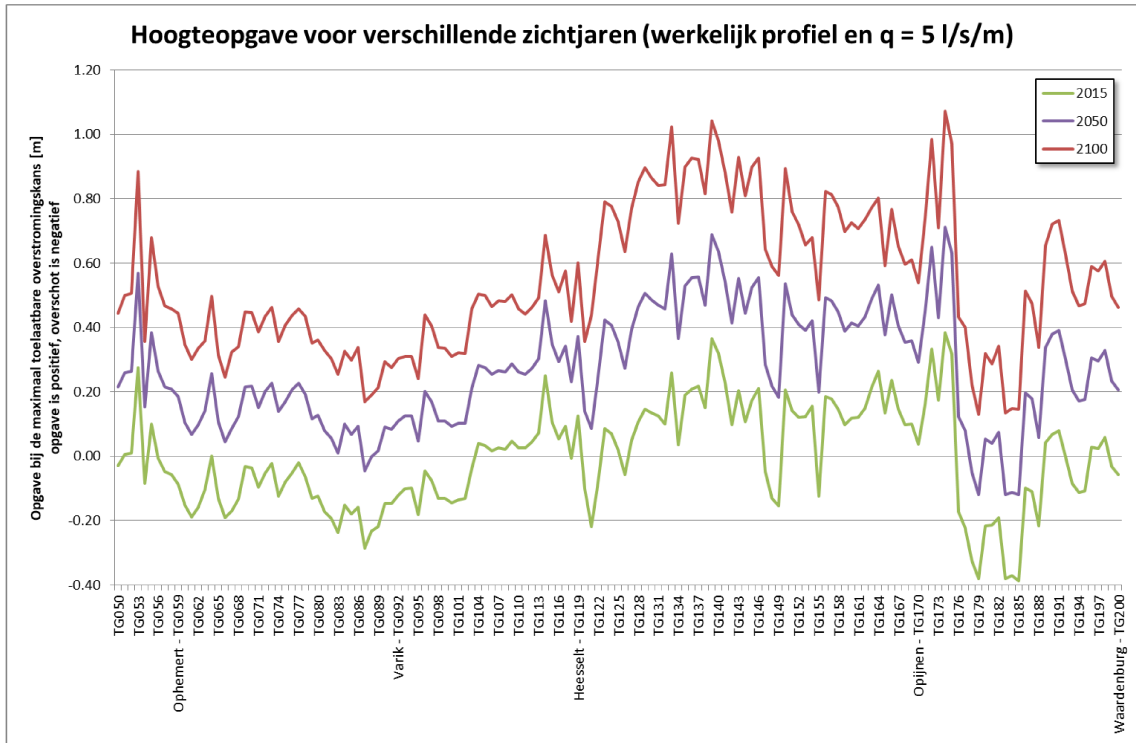
Als laatste is de invloed van het zichtjaar op de opgave in beeld gebracht bij het werkelijke profiel en een overslagdebiet van 5 l/s/m (Figuur 13). De HBN stijging voor de verschillende zichtjaren (de klimaatopgave) wordt veroorzaakt door de stijgende afvoer bij Lobith. In Figuur 13 is te zien dat de stijging van het HBN tussen 2015 en 2050 ongeveer gelijk is aan de stijging van het HBN tussen 2050 en 2100. Stroomopwaarts van Heesselt is de stijging van het HBN voor beide tijdsperiodes ongeveer 25 cm (dus ongeveer 50 cm voor 2015 – 2100). Stroomafwaarts van Heesselt is de stijging van het HBN voor beide tijdsperiodes ongeveer 35 cm (dus ongeveer 70 cm voor 2015 – 2100). Dit verschil wordt veroorzaakt door de lokale geometrie. Op locaties met beperkte golfwerking is de stijging door klimaatverandering namelijk kleiner dan op locaties waar golven wel een belangrijke rol spelen.

Door het aftoppen wordt het HBN op locaties met een beperkte golf invloed (en dus relatief hoge waterstanden / afvoeren) meer beperkt omdat de relevante afvoer in een HBN-berekening dichter bij het aftopniveau ligt. Bij klimaatverandering kan de afvoer op deze locaties daarom maar beperkt toenemen. Dit is niet het geval op locaties met grotere golf invloed (waar de relevante waterstand en afvoer relatief laag is). Hier is zijn relevante afvoerniveaus lager en is het verschil met het aftopniveau dus groter. Bij klimaatverandering kan het HBN op deze locaties dus meer toenemen totdat het aftopniveau bereikt wordt.

Figuur 14 geeft de opgave weer voor de verschillende zichtjaren (bij het werkelijke profiel en een overslagdebiet van 5 l/s/m). Hierin is te zien dat de opgave in het jaar 2100 gemiddeld 40 cm is op het traject Ophemert – Heesselt en gemiddeld 70 cm tussen Heesselt en Waardenburg.



Figuur 13: HBN voor verschillende zichtjaren bij het werkelijke profiel en een overslagdebiet van 5 l/s/m. Huidige kruinhoogte is weergegeven met de zwarte stippellijn.



Figuur 14: Opgave (verschil tussen de kruinhoogte en het HBN) bij het werkelijk profiel en 5 l/s/m voor verschillende zichtjaren.

5 Veranderingen van de Hydraulische Randvoorwaarden t.o.v. 2015

In deze paragraaf zijn de verschillen tussen de hydraulische randvoorwaarden zoals deze in deze studie zijn afgeleid en de hydraulische randvoorwaarden zoals deze in 2015 zijn afgeleid (HKV, 2016) met elkaar vergeleken. Voor de vergelijking worden de hydraulische randvoorwaarden die in 2015 zijn afgeleid in deze paragraaf aangeduid als '*HR Waal 2015*'. De hydraulische randvoorwaarden zoals deze in voorliggende studie zijn afgeleid worden in deze paragraaf aangeduid als '*HR Waal 2017*'.

In paragraaf 5.1 zijn de verschillen in uitgangspunten tussen de HR Waal 2015 en de HR Waal 2017 beschreven. In paragraaf 5.2 is beschreven in hoeverre de waterstand en het HBN verschilt door deze uitgangspunten. De verschillen zijn opnieuw in beeld gebracht voor het traject Opijnen – Waardenburg. Indien het beeld op andere trajecten afwijkt, is dit beschreven in de tekst. In paragraaf 5.3 is in een detailanalyse gekeken wat de bijdrage is van elk van de verschillende uitgangspunten aan het geheel.

5.1 Uitgangspunten

- Afvoerverdeling bij de splitsingspunten:
 - In de HR Waal 2017 is de Deltamodel 2015 database toegepast om de HR voor alle zichtjaren te bepalen. Dit wijkt af van de uitgangspunten bij de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden in 2015 (HKV, 2016). Hier is voor het zichtjaar 2050 de Deltamodel 2050 database toegepast en voor het zichtjaar 2100 de Deltamodel 2100 database toegepast. In deze studie wordt dit dus niet gedaan, omdat de gehanteerde verdeling over de riviertakken conform de 2015 database het beste aansluit bij het beleidsuitgangspunt ontzien van de Nederrijn - Lek.
 - De situatie waarbij de Nederrijn-Lek niet wordt ontzien wordt het beste in beeld gebracht door de WBI2017-database fysica. Met deze database zijn in deze studie geen berekeningen gemaakt. Het effect van het wel/niet ontzien van de Nederrijn – Lek is in deze studie daarom niet in beeld gebracht.
 - We merken opdat in de afvoerverdeling zoals deze is gemodelleerd in de hydraulische randvoorwaarden in 2015 (HKV, 2016) de afvoer op de Nederrijn – Lek ook nooit groter wordt dan 3.384 m³/s. Desondanks wijkt de verdeling die in de deltamodel databases 2050 en 2100 wordt gehanteerd (hoe de afvoer over de riviertakken wordt verdeeld) af van het uitgangspunt in het OI2014. We benadrukken echter dat het verschil tussen de hydraulische randvoorwaarden in 2015 (HKV, 2016) en de voorliggende resultaten niet het verschil beschrijft tussen het wel/niet ontzien van de Nederrijn – Lek.
- Klimaatverandering (zeespiegelstijging en toename van de afvoer):
 - Consequentie van de keuze voor het toepassen Deltamodel 2015 database voor de zichtjaren 2050 en 2100 (zie bovenstaand punt over het ontzien van de Nederrijn - Lek) is dat geen rekening wordt gehouden met zeespiegelstijging in de zichtjaren 2050 en 2100. Bij de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden in 2015 (HKV, 2016) is wel rekening gehouden met zeespiegelstijging.

- Omgang met onzekerheden:
 - Bij de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden in 2015 (HKV, 2016) is nog rekening gehouden met een vaste onzekerheidstoeslag van 30 cm op de waterstand en het HBN. In de HR Waal 2017 zijn onzekerheden uitgeïntegreerd (statische onzekerheden zijn verwerkt door de statistiek vooraf uit te integreren – modelonzekerheden worden in de software uitgeïntegreerd). De stijging van de waterstand of het HBN varieert daarmee per locatie, kans van voorkomen en type berekening.
- Afvoer- en windstatistiek:
 - Voor de windstatistiek is in de HR Waal 2017 gebruik gemaakt van windstation Deelen. Deze statistiek is anders dan bij de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden in 2015 (HKV, 2016), daar is de windstatistiek van Schiphol toegepast. Door deze verandering van statistiek wordt aangesloten bij WBI2017 en deze statistiek geeft de windkarakteristieken van landinwaartse gebieden beter weer.
- Aftoppen van de afvoer bij Lobith:
 - De rivierafvoer bij Lobith wordt afgetopt boven 18.000 m³/s. Bij de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden in 2015 (HKV, 2016) is nog geen rekening gehouden met aftoppen van de rivierafvoer, omdat dit nog niet beleidsmatig was vastgesteld. Wel is in HKV (2016) een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd m.b.t. het aftoppen van de afvoer.
- Software:
 - Bij de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden in 2015 is gebruik gemaakt van Hydra-Zoet. In de HR Waal 2017 is gebruik gemaakt van Hydra-NL. Dit zou overigens geen verschillen moeten opleveren.

5.2 Verschillen t.o.v. Hydraulische Randvoorwaarden zoals afgeleid in 2015

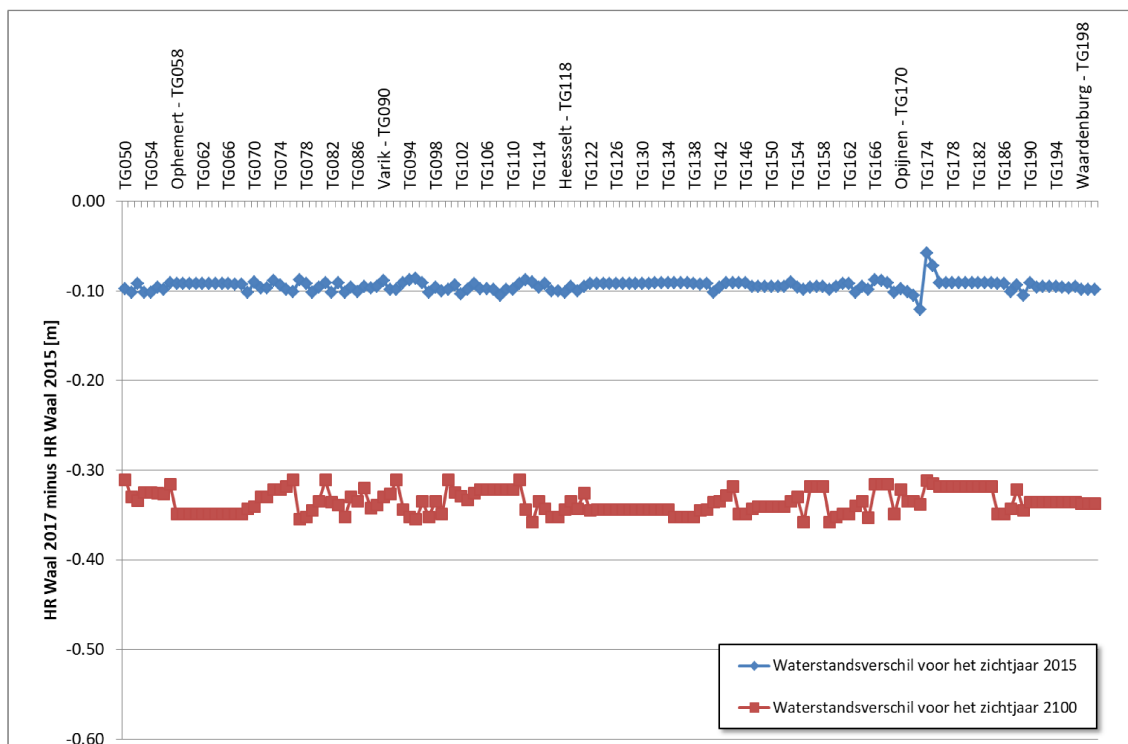
Waterstandsverschillen

In het algemeen wordt voor de hele Waal het volgende opgemerkt over de waterstandsverschillen:

- De waterstand bij de maximaal toelaatbare overstromingskansen zoals bepaald in de *HR Waal 2017* is lager dan de waterstand zoals deze is bepaald in de *HR Waal 2015*.
- De waterstandsverschillen tussen de *HR Waal 2015* en de *HR Waal 2017* zijn redelijk constant langs de trajecten. Bij de dijkpalen langs de trajecten met een maximaal toelaatbare overstromingskans van 1/3.000 per jaar daalt de waterstand in 2015 met ongeveer 15 cm. Bij de dijkpalen langs de trajecten met een maximaal toelaatbare overstromingskans van 1/10.000 per jaar daalt de waterstand met ongeveer 10 cm. Deze daling wordt vooral veroorzaakt door het uitintegreren van onzekerheden (zie ook paragraaf 5.3).
- Bij de dijkpalen langs de trajecten met een maximaal toelaatbare overstromingskans van 1/3.000 per jaar daalt de waterstand in 2100 met ongeveer 25 cm en langs de trajecten met een maximaal toelaatbare overstromingskans van 1/10.000 per jaar daalt de waterstand met ongeveer 35 cm. De daling in 2100 is groter dan in 2015 omdat het aftoppen van de rivierafvoer boven de 18.000 m³/s een grotere invloed heeft op de waterstanden.

- Traject 40-1 wijkt af van dit beeld omdat hier de maximaal toelaatbare overstromingskans is bijgesteld van 1/10.000 per jaar naar 1/30.000 per jaar⁶. De waterstand voor het zichtjaar 2015 is in de *HR Waal 2017* daarom 20 cm hoger dan zoals bepaald in de *HR Waal 2015*. In 2100 neemt de waterstand in de *HR Waal 2017* bijna 20 cm af t.o.v. de *HR Waal 2015*. Dit wordt vooral veroorzaakt door het effect van aftoppen.
- Het effect van aftoppen is het sterkst op locaties waar de Waal het smalst is. Veranderingen in de afvoer hebben daar de sterkste invloed op de berekende waterstanden. Dit verklaart waarom de verschillen in 2100 minder constant zijn dan de verschillen in 2015 (zie Figuur 15).
- Lokaal kunnen de veranderingen groter zijn. Dit is vooral het geval op locaties waar de waterstanden in de database opgevuld zijn (zie Figuur 3 in Hoofdstuk 3 voor een overzicht van deze locaties). Deze locaties zijn namelijk in de vorige studies geïnterpoleerd op basis van omliggende locaties en daarmee minder nauwkeurig. Dit is ook zichtbaar in Figuur 15 ter hoogte van dijkpaal TG174.

Als voorbeeld is het waterstandsverschil tussen de *HR Waal 2015* en de *HR Waal 2017* in Figuur 15 weergegeven op het traject Opijnen – Waardenburg voor de zichtjaren 2015 en 2100.



Figuur 15: Waterstandsverschillen 'HR Waal 2015' en 'HR Waal 2017' voor de zichtjaren 2015 en 2100.

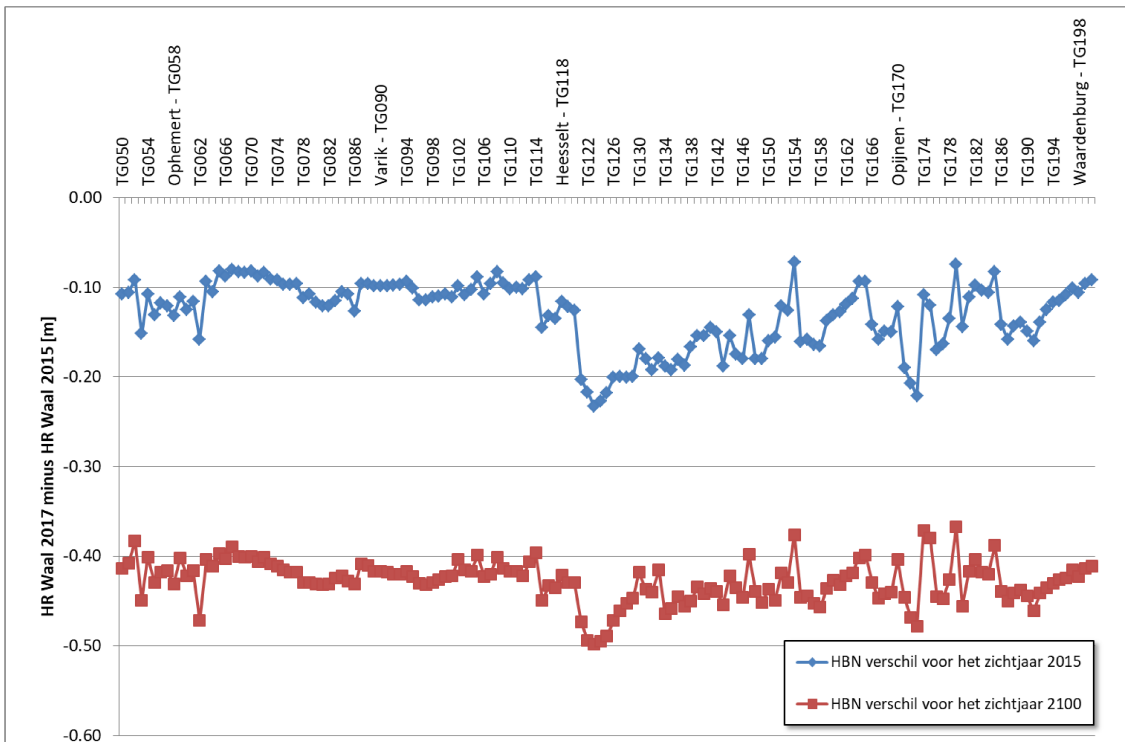
⁶ De signaalwaarde en max toelaatbare kans zijn aan elkaar gelijk gesteld. Dit heeft plaatsgevonden nadat de vorige analyse naar de HR is uitgevoerd.

HBN verschillen

In het algemeen wordt voor de hele Waal het volgende opgemerkt over de HBN verschillen tussen de twee studies:

- Het HBN bij de maximaal toelaatbare overstromingskans zoals bepaald in de *HR Waal 2017* is lager dan het HBN zoals deze is bepaald in de *HR Waal 2015*.
- De HBN verschillen tussen de *HR Waal 2015* en de *HR Waal 2017* zijn minder stabiel dan de waterstandsverschillen. Dit komt omdat bij het HBN de dijkoriëntatie, de strijklengten, het dwarsprofiel en het kritiek golfoverslagdebiet invloed hebben op hoe de verschillen in uitgangspunten doorwerken in het HBN.
- Het HBN verschil tussen de *HR Waal 2015* en de *HR Waal 2017* varieert tussen de 10 en 20 cm voor het zichtjaar 2015 bij een overslagdebiet van 5 l/s/m en een standaard 1-op-3 profiel. De maximaal toelaatbare overstromingskans (1/3.000 of 1/10.000 per jaar) zorgt niet voor significante verschillen. In het zichtjaar 2100 is deze daling 40 – 50 cm.
- Dat het HBN in de *HR Waal 2017* lager ligt dan de *HR Waal 2015* wordt vooral veroorzaakt door het aftoppen van de afvoer bij Lobith bij 18.000 m³/s, het uitintegreren van onzekerheden en het toepassen van een andere windstatistiek.
- Wanneer golven een belangrijkere rol krijgen bij het bepalen van het HBN neemt het verschil met de *HR Waal 2015* toe. Dit is bijvoorbeeld het geval bij een lager overslagdebiet, een steiler profiel of grotere strijklengten. De wijziging van de windstatistiek van Schiphol naar Deelen levert de belangrijkste bijdrage aan deze relatieve verschillen. Door toepassing van de windstatistiek bij Deelen neemt de kans op hoge windsnelheden en dus hoge golven af, hierdoor daalt het HBN. Als golven een belangrijker aandeel hebben in de HBN berekening wordt het verschil met de *HR Waal 2015* dus groter (zie ook paragraaf 5.3). Dit is bijvoorbeeld terug te zien in Figuur 16. De verandering tussen de *HR Waal 2015* en de *HR Waal 2017* is groter voor het traject Heesselt - Opijnen (westelijke oriëntatie) dan voor het traject Ophemert – Heeselt (oostelijke oriëntatie).
- Door de wijziging van de maximaal toelaatbare overstromingskans van traject 40-1 van 1/10.000 per jaar naar 1/30.000 per jaar neemt het HBN in de *HR Waal 2017* voor het zichtjaar 2015 met 10 – 30 cm toe t.o.v. de *HR Waal 2015*. Voor het zichtjaar 2100 daalt het HBN met 10 – 30 cm t.o.v. de *HR Waal 2015*.

Als voorbeeld is het HBN verschil tussen de *HR Waal 2015* en de *HR Waal 2017* in Figuur 16 weergegeven op het traject Opijnen – Waardenburg voor de zichtjaren 2015 en 2100.



Figuur 16: HBN verschillen 'HR Waal 2015' en 'HR Waal 2017' voor de zichtjaren 2015 en 2100.

5.3 Detail vergelijking

Om de verschillen tussen de *HR Waal 2015* en *HR Waal 2017* nader te duiden zijn op twee locaties aanvullende waterstands- en HBN berekeningen gemaakt (zie Figuur 17):

1. TG075 – een locatie met oostelijke oriëntatie en beperkte strijklengte;
2. TG127 – een locatie met westelijke oriëntatie en lange strijklengte;



Figuur 17: Testlocaties TG075 en TG127.

Waterstanden

De waterstanden van de *HR Waal 2015* en de *HR Waal 2017* zijn vergeleken voor de zichtjaren 2015 en 2100 bij de maximaal toelaatbare overstromingskans. In deze analyse zijn de zichtjaren 2015 en 2100 gebruikt, omdat bij deze zichtjaren geen sprake is van interpolatie van de resultaten (waardoor de analyse zuiverder is). De waterstanden zijn weergegeven in Tabel 3 en de verschillen zijn weergegeven in Tabel 4.

Achtereenvolgens zijn de volgende verschillen beschouwd:

1. Overstap van Hydra-Zoet naar Hydra-NL;
2. Toepassing van een andere database fysica;
3. Toepassen van een fysisch maximum;
4. Omgang met onzekerheden;

	2015		2100	
	TG075	TG127	TG075	TG127
HR Waal 2015 [NAP+m]	10,82	9,90	11,64	10,72
HR Waal 2017[NAP+m]	10,72	9,81	11,32	10,38

Tabel 3: Waterstand in de HR Waal 2015 en de HR Waal 2017 bij de maximaal toelaatbare overstromingskans.

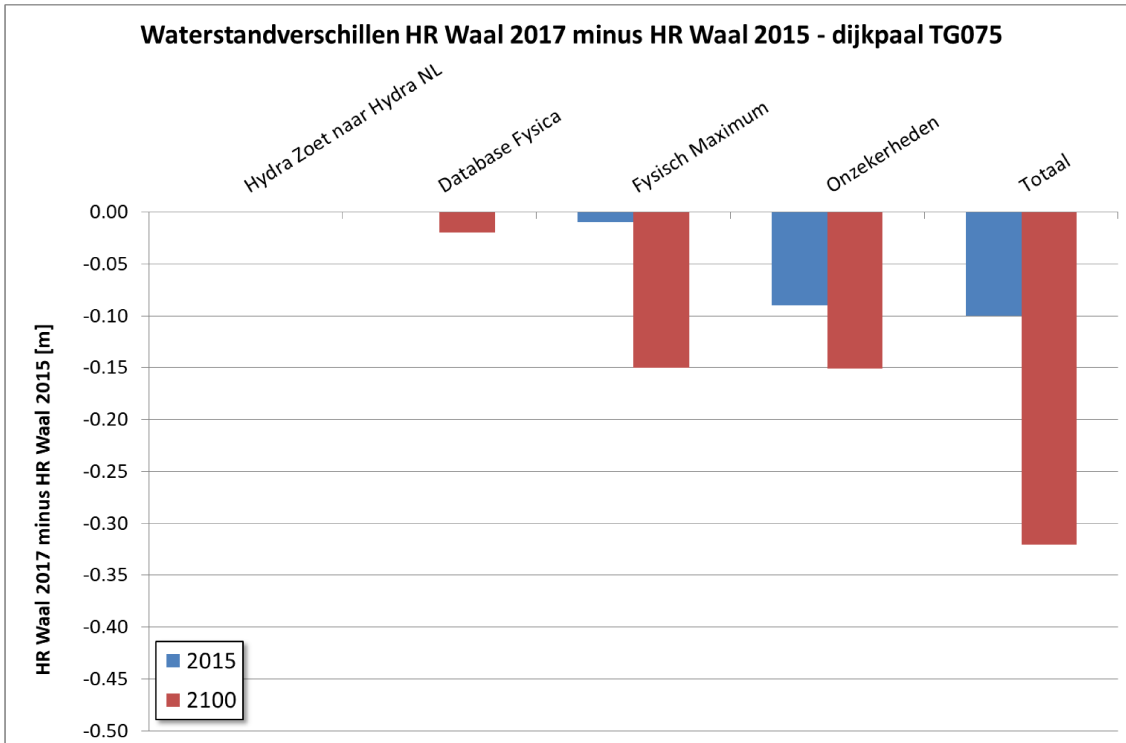
	2015		2100	
	TG075	TG127	TG075	TG127
Hydra-Zoet – Hydra-NL [m]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Database Fysica [m]	-	-	-0,02	-0,01
Fysisch Maximum [m]	-0,01	0,00	-0,15	-0,16
Onzekerheden [m]	-0,09	-0,09	-0,15	-0,18
Totaal [m]	-0,10	-0,09	-0,32	-0,35

Tabel 4: Verschillen tussen de waterstand in de HR Waal 2015 en de HR Waal 2017 bij de maximaal toelaatbare overstromingskans.

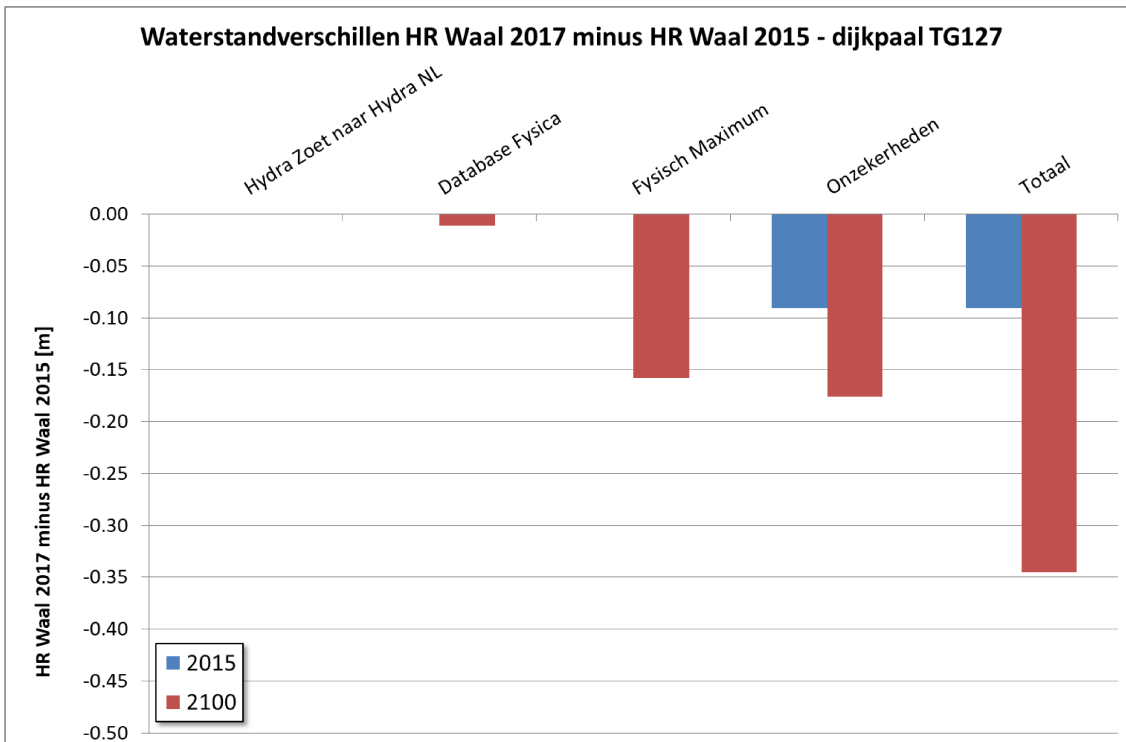
Over de waterstandsverschillen wordt het volgende opgemerkt:

- De overgang van Hydra – Zoet versie 1.6.3. naar Hydra NL resulteert niet tot nauwelijks in een andere waterstand (hooguit numerieke afronding).
- Door vast te houden aan de afvoerverdeling in 2015 en geen zeespiegelstijging toe te passen (door alleen de database fysica van 2015 te gebruiken) neemt de *HR Waal 2017* waterstand bij TG075 en TG127 in toekomst scenario's met één tot enkele centimeters af t.o.v. de *HR Waal 2015* waterstand⁷.
- Door toepassing van een fysisch maximum van de afvoer van 18.000 m³/s bij Lobith daalt de waterstand. In 2100 loopt deze daling op tot ongeveer 15 cm.
- Door toepassing van statistische en modelonzekerheden conform de methode in het WBI2017 daalt de waterstand. In de *HR Waal 2015* is sprake van een vaste toeslag van 30 cm, in de *HR Waal 2017* is sprake van een variabele toeslag van ongeveer 20 cm in 2015 en 15 cm in 2100. De toeslag is in 2100 kleiner omdat statistische onzekerheid beperkt wordt door het aftoppen van de rivierafvoer. Netto is de waterstand van de *HR Waal 2017* in 2015 ongeveer 10 cm lager in vergelijking met de *HR Waal 2015*. In 2100 is de *HR Waal 2017* waterstand ongeveer 15 cm lager dan de *HR Waal 2015* waterstand.
- Het gecombineerde effect van de veranderingen in de uitgangspunten resulteert in een lagere waterstand in de *HR Waal 2017* in vergelijking met de *HR Waal 2015*. De *HR Waal 2017* is voor het zichtjaar 2015 ongeveer 10 cm lager dan de *HR Waal 2015*. Voor het zichtjaar 2100 is de *HR Waal 2017* waterstand 30 – 35 cm lager dan de *HR Waal 2015* waterstand.

⁷ In deze studie is geen rekening gehouden met zeespiegelstijging. Voor de meest benedenstroomse locaties (Gorinchem) kan dit voor het zichtjaar 2100 tot een onderschatting van de HR leiden in de orde van 5-10 centimeter (in een ongunstige situatie). Dit effect neemt snel af voor de meer bovenstroomse locaties.



Figuur 18: Waterstandsverschillen bij TG075 bij de maximaal toelaatbare overstromingskans.



Figuur 19: Waterstandsverschillen bij TG127 bij de maximaal toelaatbare overstromingskans.

Hydraulisch Belasting Niveau (HBN)

Het HBN van de *HR Waal 2015* en de *HR Waal 2017* is vergeleken bij de faalkanseis op doorsnedeniveau die volgt uit de maximaal toelaatbare overstromingskans (1/41.667 per jaar), een overslagdebiet van 5 l/s/m en een standaard 1 op 3 profiel in de zichtjaren 2015 en 2100. Het HBN is weergegeven in Tabel 5 en de verschillen zijn weergegeven in Tabel 6.

Achtereenvolgens zijn de volgende verschillen beschouwd:

1. Overstap van Hydra-Zoet naar Hydra-NL;
2. Toepassing van een andere database fysica;
3. Overstap van de windstatistiek Schiphol naar Deelen;
4. Toepassen van een fysisch maximum;
5. Omgang met onzekerheden;

	2015		2100	
	TG075	TG127	TG075	TG127
HR Waal 2015 [NAP+m]	11,30	10,70	12,04	11,54
HR Waal 2017[NAP+m]	11,20	10,50	11,63	11,07

Tabel 5: *HBN in de HR Waal 2015 en de HR Waal 2017 bij de maximaal toelaatbare overstromingskans, een overslagdebiet van 5 l/s/m en een standaard 1-op-3 profiel.*

	2015		2100	
	TG075	TG127	TG075	TG127
Hydra-Zoet – Hydra-NL [m]	> 0,01	> 0,01	> 0,01	> 0,01
Database Fysica [m]	-	-	-0,02	-0,06
Schiphol – Deelen WBI2017 [m]	-0,03	-0,16	-0,05	-0,20
Fysisch Maximum [m]	0,00	0,00	-0,23	-0,14
Onzekerheden [m]	-0,06	-0,04	-0,13	-0,07
Totaal [m]	-0,09	-0,20	-0,41	-0,47

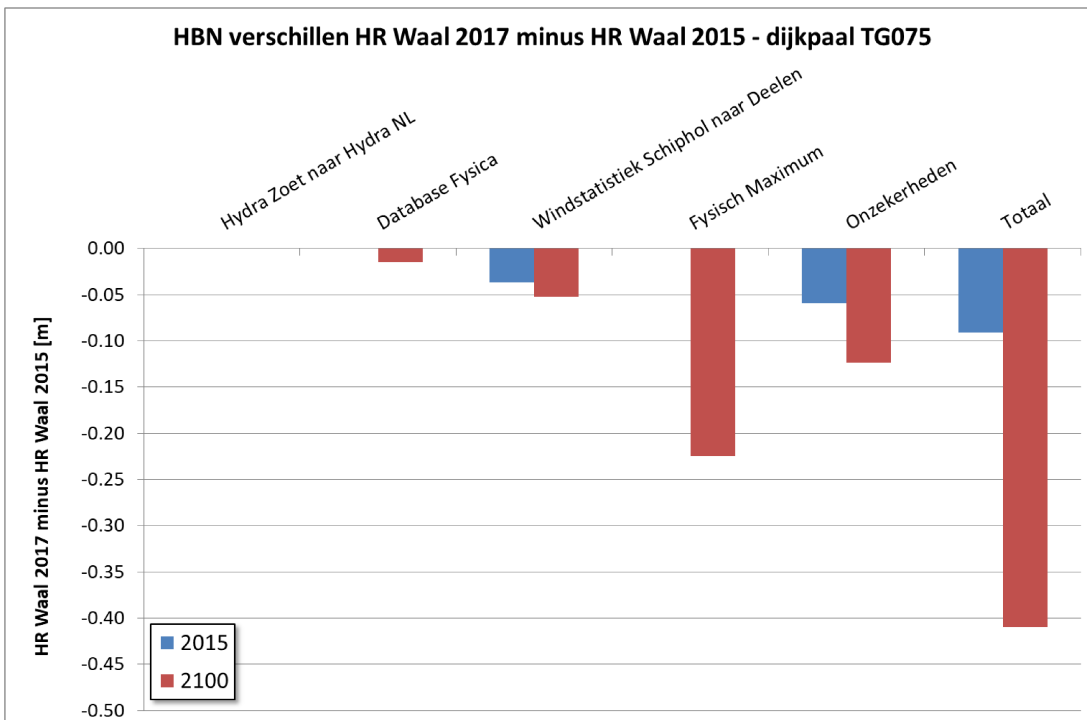
Tabel 6: *Verschillen tussen het HBN in de HR Waal 2015 en de HR Waal 2017 bij de maximaal toelaatbare overstromingskans, een overslagdebiet van 5 l/s/m en een standaard 1-op-3 profiel.*

Over de verschillen in de HBN's wordt het volgende opgemerkt:

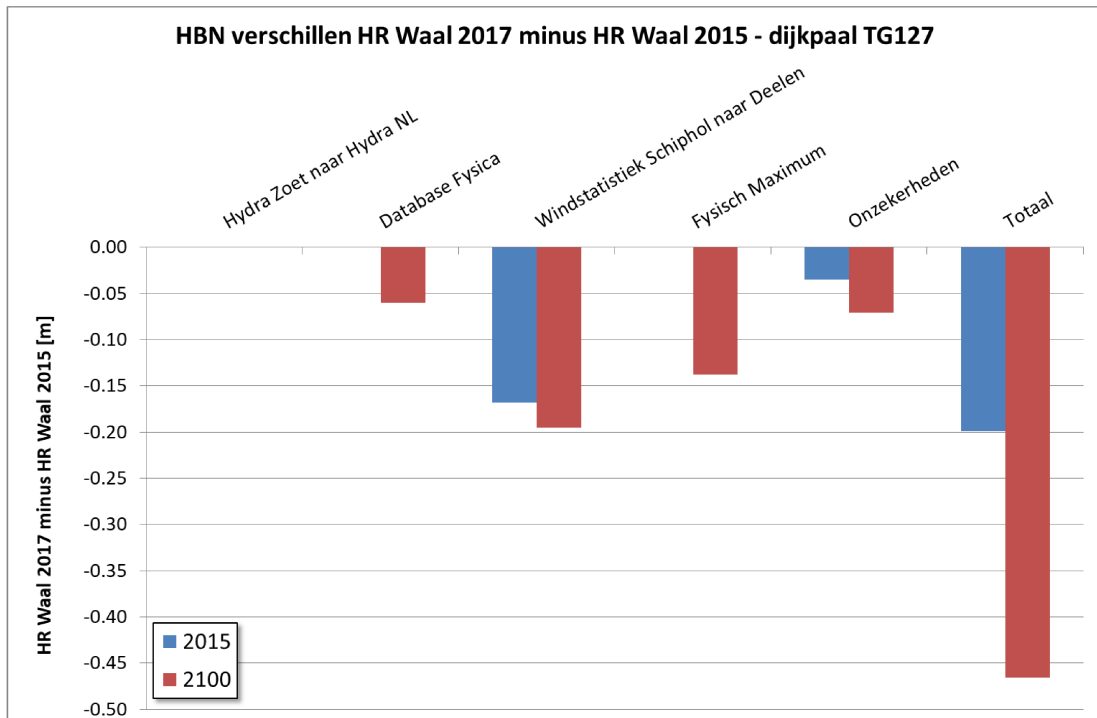
- De overgang van Hydra – Zoet versie 1.6.3. naar Hydra NL resulteert niet tot nauwelijks in een verandering van het HBN.
- Door vast te houden aan de afvoerverdeling in 2015 en geen zeespiegelstijging toe te passen (door alleen de database fysica van 2015 te gebruiken) neemt het HBN in toekomst scenario's met enkele centimeters af⁸.
- Door wijziging van de windstatistiek (station Schiphol naar Deelen) neemt het HBN met 5 - 20 cm af. Het effect is het grootste voor locaties met lange strijklengtes en een westelijke oriëntatie.
- Door toepassing van een fysisch maximum van de afvoer van 18.000 m³/s bij Lobith daalt het HBN vooral in de toekomst scenario's. Het effect kan oplopen tot 25 cm in 2100. Dit effect is het grootst op locaties waar afvoer een relatief belangrijke rol speelt in de berekening (korte strijklengtes en oostelijke oriëntatie)

⁸ In deze studie is geen rekening gehouden met zeespiegelstijging. Voor de meest benedenstroomse locaties (Gorinchem) kan dit voor het zichtjaar 2100 tot een onderschatting van de HR leiden in de orde van 5-10 centimeter (in een ongunstige situatie). Dit effect neemt snel af voor de meer bovenstroomse locaties.

- Door toepassing van statistische en modelonzekerheden conform de methode in het WBI2017 daalt het HBN. In de *HR Waal 2015* was de onzekerheidstoeslag 30 cm. In de *HR2017* is de toeslag door het uitintegreren van onzekerheden in 2015 ongeveer 25 cm en in 2100 ongeveer 20 cm. Hierdoor neemt het HBN in de *HR Waal 2015* met 5 – 10 cm af ten opzichte van het HBN in de *HR Waal 2017*. Bij locaties met een beperkte windinvloed (zoals bijv. TG075) is de daling sterker dan bij locaties met relatief veel windinvloed (bijv. TG127).
- Het gecombineerde effect van de veranderingen in de uitgangspunten resulteert in een lager HBN in de *HR Waal 2017* in vergelijking met de *HR Waal 2015*. De *HR Waal 2017* is voor het zichtjaar 2015 tussen de 10 – 20 cm lager dan de *HR Waal 2015*. Voor het zichtjaar 2100 is de *HR Waal 2017* 40 – 50 cm lager dan de *HR Waal 2015*.



Figuur 20: HBN verschillen bij TG075 bij de maximaal toelaatbare overstromingskans, een overslagdebiet van 5 l/s/m en een standaard 1-op-3 profiel.



Figuur 21: HBN verschillen bij TG127 bij de maximaal toelaatbare overstromingskans, een overslagdebiet van 5 l/s/m en een standaard 1-op-3 profiel.

6 Conclusies

In deze studie zijn de hydraulische randvoorwaarden langs de Waal afgeleid. In deze studie is het OI2014 versie 4 gevolgd en is voorgesorteerd op de nieuwe versie van het Ontwerp Instrumentarium, hetgeen later is opgenomen in het "Rekenrecept afleiden ontwerprandvoorwaarden Bovenrivieren Rijntakken met Hydra-NL". De uitgangspunten die zijn gehanteerd bij de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden zijn daarom vastgesteld in een gezamenlijke sessie met WSRL, RWS - WVL, KPR, Deltares en HKV. Via *Hydra-as-a-Service* (<http://hydra-as-a-service.hkvservices.nl/wsrl/>)⁹ zijn de resulterende hydraulische randvoorwaarden online te bekijken.

6.1 Waterstand

In voorliggende studie zijn de waterstanden bepaald bij de maximaal toelaatbare overstromingskans. De resultaten laten zien dat:

- De verwachte waterstandstijging door klimaatverandering bedraagt 8-10 cm per 10 jaar tussen 2015 en 2050. Door het effect van aftoppen neemt de verwachte waterstandstijging door klimaatverandering af tot 3-6 cm per 10 jaar in de periode 2050 en 2100.
- Aftoppen van de rivierafvoer bij Lobith heeft vooral in het zichtjaar 2100 invloed op de berekende waterstand. Dit omdat de relevante afvoer dan hoger is dan het aftopniveau van 18.000 m³/s bij Lobith. Uitzondering is traject 40-2 omdat de maximaal toelaatbare overstromingskans gelijk is aan 1/30.000 per jaar. Hier is eerder sprake van invloed door aftoppen.
- Wanneer modelonzekerheden uitgeïntegreerd worden en een fysiek maximum voor de afvoer wordt toegepast (aftoppen op 18.000 m³/s), is geen sprake van een maximale waterstand. De berekende waterstand kan nog steeds toenemen als de maximale afvoer is bereikt. Dit omdat de bijdragen en dus meest waarschijnlijke waarde modelfout (zoals weergegeven in het illustratiepunt) groter wordt als de afvoer zijn maximum heeft bereikt.

6.2 Hydraulisch belasting niveau

Het HBN is bepaald bij de eis op doorsnedeniveau die volgt uit de maximaal toelaatbare overstromingskans. Het HBN is in deze studie afgeleid bij een overslagdebiet van 1, 5, 10 en 50 l/s/m. De resultaten laten zien dat:

- De verwachte stijging van het HBN door klimaatverandering bedraagt 7-10 cm per 10 jaar. Dit geldt voor de hele geanalyseerde periode (2015 – 2100). Naarmate het zichtjaar verder in de toekomst ligt neemt de snelheid iets af omdat het effect van aftoppen van de rivierafvoer sterker wordt. Dit effect is minder sterk dan bij een waterstandsberekening.
- Het HBN is in belangrijke mate afhankelijk van de oriëntatie van de dijk, de taludhelling van de dijk en de rivierbedgeomtrie. Waar de waterstanden stroomafwaarts langs de rivier geleidelijk aflopen hoeft dit bij het HBN niet zo te zijn. Bij veranderende oriëntatie kan het HBN stroomafwaarts ook toenemen.
- Bij een overslagdebiet van 50 l/s/m is praktisch sprake van een overloopsituatie in plaats van een golfoverslagsituatie.

⁹ Bijbehorende inloggegevens zijn opgeleverd aan Martin Groenewoud en Chris Sevink.

6.3 Conclusies over de verschillen met voorgaande hydraulische randvoorwaarden

De uitgangspunten zoals toegepast in voorliggende studie wijken (deels) af van uitgangspunten zoals deze zijn toegepast bij de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden in 2015 (HKV, 2016). Deze belangrijkste verschillen betreffen:

- De Nederrijn - Lek wordt ontzien bij afvoeren van 16.000 m³/s of hoger. De consequentie is dat de afvoer op de Nederrijn - Lek niet hoger wordt dan 3.384 m³/s, ongeacht welk klimaatscenario en welke maatgevende afvoer worden gehanteerd. Dit is verwerkt door voor de zichtjaren 2015, 2050 en 2100 gebruikt te maken van de maken Deltamodel 2015 database fysica.
- Onzekerheden (model en statistisch) worden op een scherpere manier meegenomen door deze "uit te integreren" (conform de methode in WBI2017), in plaats van toepassing van een onzekerheidstoetslag.
- De rivierafvoer bij Lobith wordt afgetopt bij 18.000 m³/s en hogere afvoerniveaus.
- Voor de windstatistiek wordt gebruik gemaakt van de statistiek bij Deelen (in plaats van Schiphol). Door deze verandering van statistiek wordt aangesloten bij WBI2017 en deze statistiek geeft de windkarakteristieken van landinwaartse gebieden beter weer.

Waterstanden

Toepassing van de nieuwe uitgangspunten leidt tot een lagere waterstand in vergelijking met de waterstand zoals deze is afgeleid in voorgaande studies:

- Langs de trajecten met een maximaal toelaatbare overstromingskans van 1/3.000 per jaar daalt de waterstand in 2015 met ongeveer 15 cm. Langs de trajecten met een maximaal toelaatbare overstromingskans van 1/10.000 per jaar daalt de waterstand met ongeveer 10 cm. Deze daling wordt hoofdzakelijk vooral veroorzaakt door het uitintegreren van onzekerheden.
- In 2100 daalt de waterstand respectievelijk 25 cm (langs trajecten met een max. toelaatbare overstromingskans van 1/3.000 per jaar) en 35 cm (langs trajecten met een max. toelaatbare overstromingskans van 1/10.000 per jaar). De daling in 2100 is groter dan in 2015 omdat het aftoppen van de rivierafvoer boven de 18.000 m³/s de waterstanden verder verlaagd.
- Traject 40-1 wijkt af van dit beeld omdat hier de maximaal toelaatbare overstromingskans is bijgesteld van 1/10.000 per jaar naar 1/30.000 per jaar (de maximaal toelaatbare overstromingskans is voor dit traject gelijk gesteld aan de signaalwaarde van de norm). De waterstand voor het zichtjaar 2015 is stijgt daarom met 20 cm. In 2100 neemt de waterstand bijna 20 cm af. Dit wordt vooral veroorzaakt door het effect van aftoppen.

Hydraulisch belasting niveau

Het HBN is bepaald bij de faalkanseis op doorsnedeniveau die volgt uit de maximaal toelaatbare overstromingskans. Dit is gedaan voor verschillende zichtjaren, verschillende overslaggebieden en verschillende profielschematisaties. Toepassing van de nieuwe uitgangspunten leidt tot een lager HBN in vergelijking met het HBN zoals deze is afgeleid in voorgaande studies:

- Het HBN daalt tussen de 10 en 20 cm voor het zichtjaar 2015 bij een overslagdebiet van 5 l/s/m en een standaard 1 op 3 profiel. De maximaal toelaatbare overstromingskans (1/3.000 of een 10.000 per jaar) zorgt niet voor significante verschillen. In het zichtjaar 2100 is deze daling 40 -50 cm. De verschillen worden vooral veroorzaakt door het aftoppen van de afvoer bij Lobith bij 18.000 m³/s, het uitintegreren van onzekerheden en het toepassen van een andere windstatistiek.
- Door de wijziging van de maximaal toelaatbare overstromingskans van traject 40-1 van 1/10.000 per jaar naar 1/30.000 per jaar neemt het HBN voor het zichtjaar 2015 met 10 - 30 cm toe. Voor het zichtjaar 2100 daalt het HBN met 10 - 30 cm (voor het zichtjaar 2015 bij een overslagdebiet van 5 l/s/m en een standaard 1-op-3 profiel). Dit wordt vooral veroorzaakt door het effect van aftoppen.
- De mate waarin het HBN afneemt hangt o.a. af van de dijk oriëntatie, de strijklengte, het profiel en het overslagdebiet. De daling van het HBN neemt toe bij een steiler talud of een lager overslagdebiet. De daling neemt af bij een flauwer talud en een hoger overslagdebiet.

7 Referenties

[HKV, 2016]

Werkelijke Profielen en Hydraulische Randvoorwaarden Waal. Bob Maaskant en Geerten Horn. HKV, Lelystad, Mei 2016.

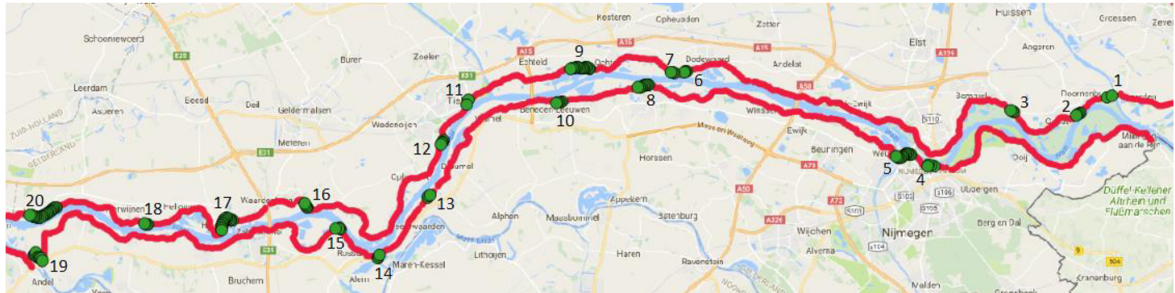
[RWS – WV, 2017]

OI2014 versie 4. Rijkwaterstaat –Water, Verkeer en Leefomgeving. Februari 2017

Bijlagen

Bijlage A: Opgevulde locaties

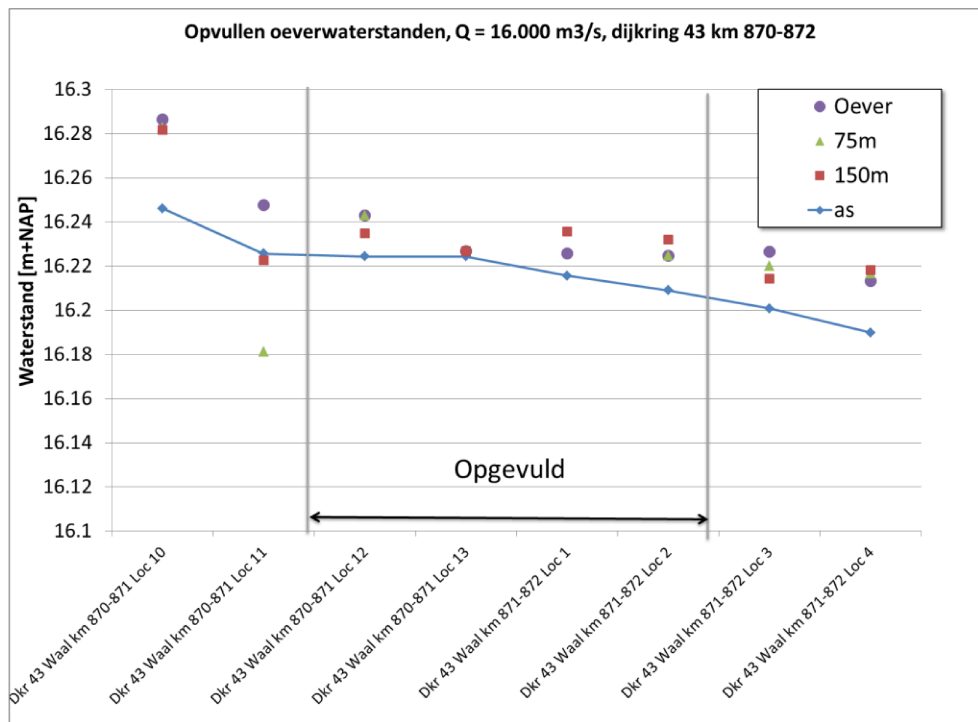
Het resultaat van het opvullen van de missende waterstanden in de databases is weergegeven in Bijlage A. Zones 1, 4 en 11 (respectievelijk: Pannerden, Nijmegen Centrum en Tiel) zijn separaat toegelicht Bijlage A.18, omdat er bij deze locaties is gekozen om aanvullende oeverlocaties te definiëren. De verschillende zones zijn weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 22: Gaten in de uitvoerlocaties zijn ontbrekende Hydra-locaties in database Referentie 2015.

A.1 Zone 2: Hulhuizen

De verschillen tussen de waterstanden op de as van de Waal en uitvoerlocaties 75 m en 150 m uit de oever zijn dusdanig klein dat de waterstand uit de nabij gelegen locatie is overgenomen als nieuwe waterstand voor de oeverlocatie.



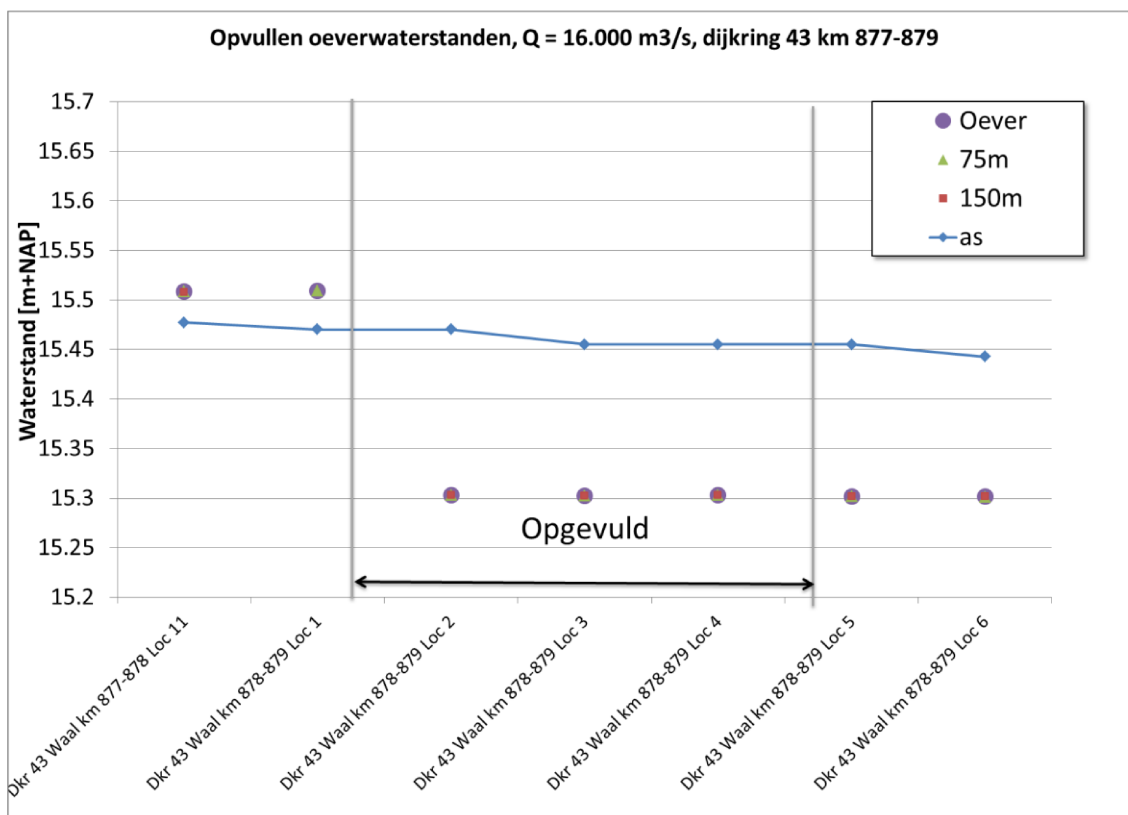
Figuur 23: Opgevulde punten bij zone 2, Hulhuizen.



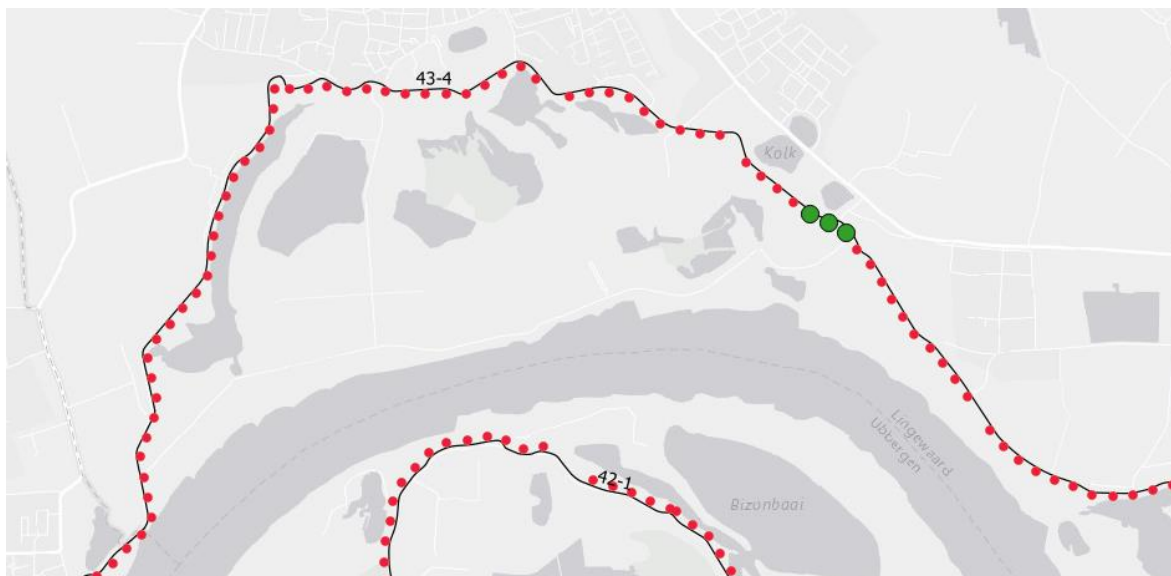
Figuur 24: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Hulhuizen.

A.2 Zone 3: Haalderen

In zone 3 zijn de uitvoerlocaties alleen aangevuld bij lagere afvoeren. Bij afvoeren vanaf 13.000 m³/s is wel een waterstand bekend en hoeven de uitvoerlocaties niet opgevuld te worden op basis van omringende waterstanden. Opvallend is wel dat de waterstand bij de oever ongeveer 15 cm lager ligt dan die op de rivier-as. Dit wordt veroorzaakt doordat deze punten achter een verhoogt element in de uiterwaard liggen. Hierdoor vallen de oeverlocaties bij lagere afvoerniveaus droog.



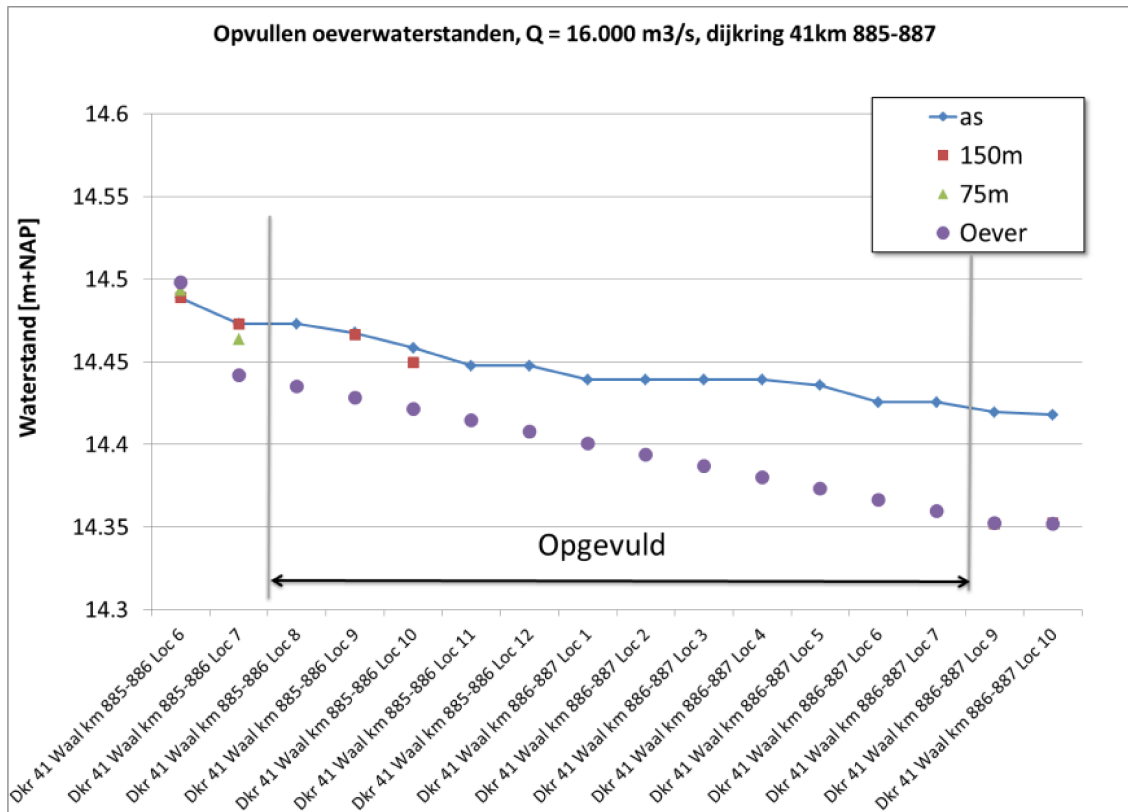
Figuur 25: Opgevlude punten bij zone 3, Haalderen.



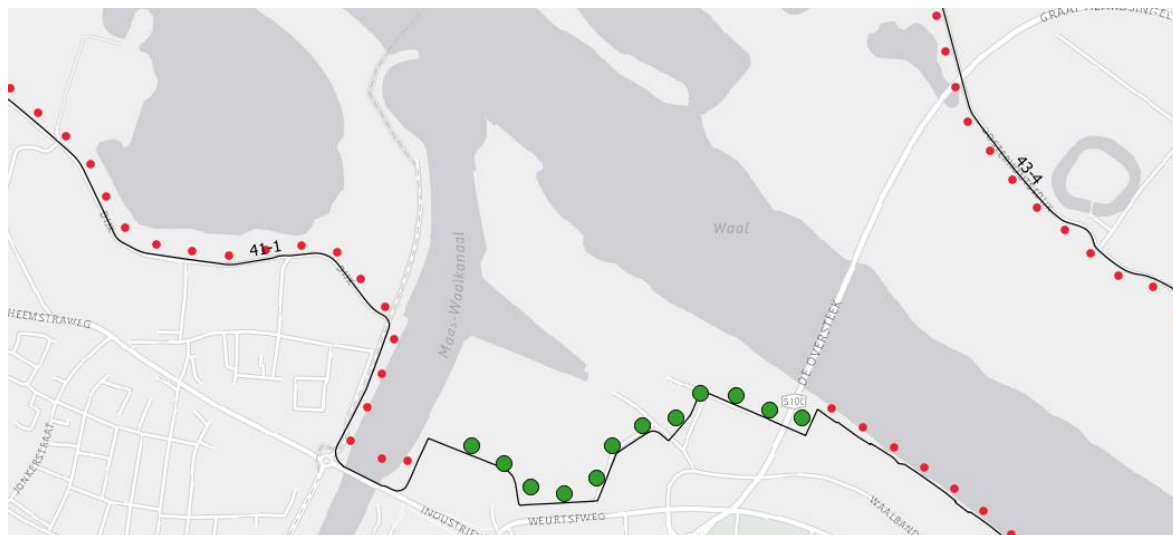
Figuur 26: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Haalderen.

A.3 Zone 5: Nijmegen-haven

Bij Nijmegen is geen waterstand beschikbaar op de omringende locaties. In plaats daarvan zijn de waterstanden langs de oever geïnterpoleerd op basis van de oeverlocaties aan weerszijden van het ontbrekende deel. Dit omdat de waterstand op de as ook (nagenoeg) lineair verloopt. De waterstanden ter hoogte van de eerste stroomafwaartse locatie met bekende waterstanden (Dkr 41 Waal 886-887 – Loc 9 en Loc 10, rechts in Figuur 27) zijn lager dan de as omdat deze locaties bij de ingang het Maas-Waal kanaal liggen. Dit is te verklaren doordat de oeverlocaties beschut liggen ten opzichte van de stroomrichting van de rivier.



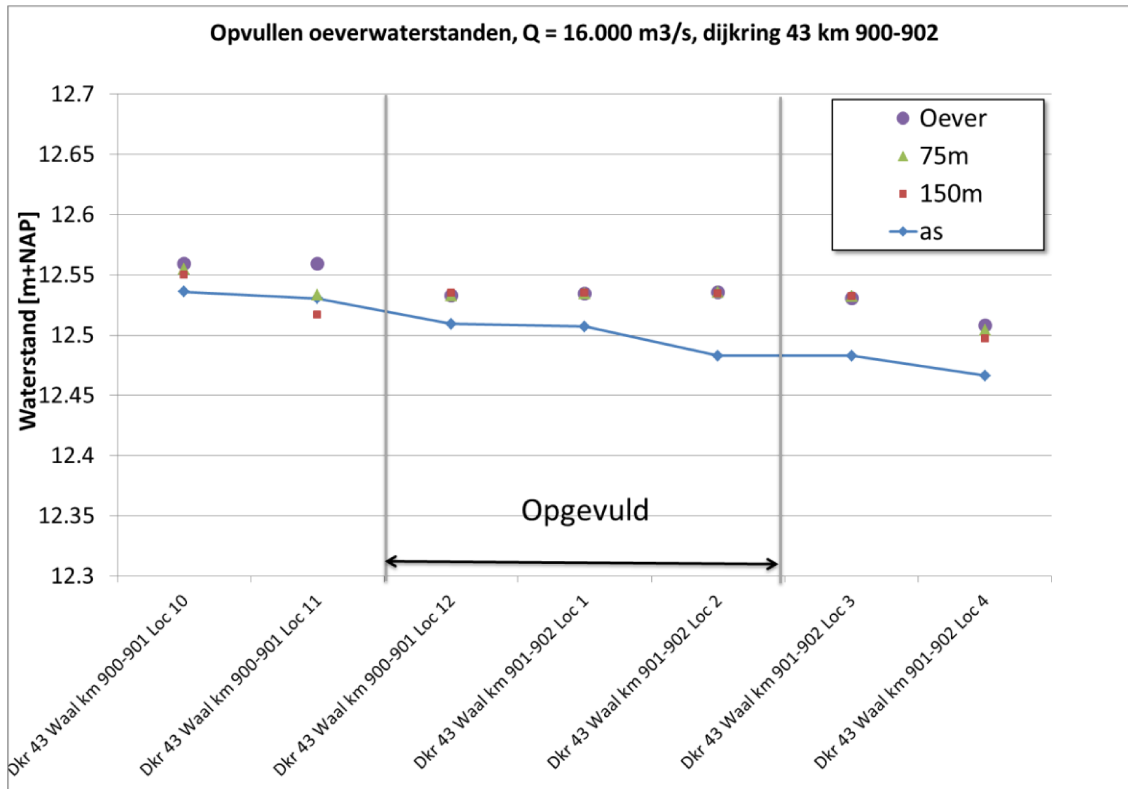
Figuur 27: Opgevulde punten bij zone , Nijmegen-haven.



Figuur 28: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Nijmegen Haven.

A.4 Zone 6: Dodewaard – Oost

De verschillen tussen de waterstanden op de as van de Waal en uitvoerlocaties 75 m en 150 m uit de oever zijn dusdanig klein dat de waterstand uit de nabij gelegen locatie is overgenomen als nieuwe waterstand voor de oeverlocatie. De waterstand aan de oever is een paar centimeter hoger dan op de rivieras. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door enige opstuwung voor de dijk.



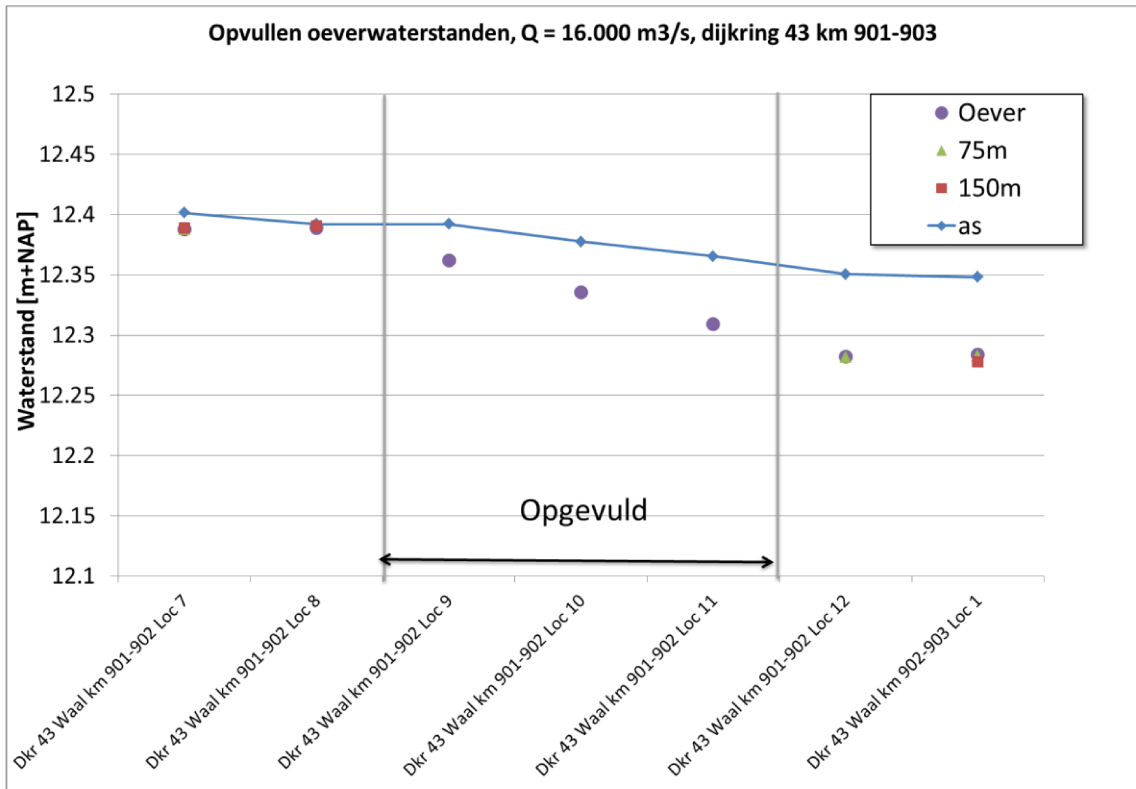
Figuur 29: Opgevulde punten bij zone 6, Dodewaard – Oost.



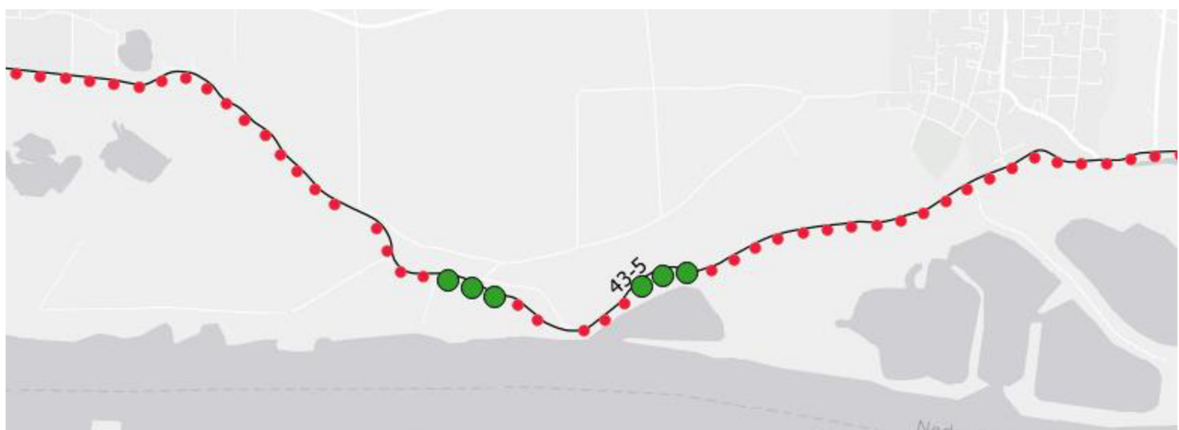
Figuur 30: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Dodewaard West en Dodewaard Oost.

A.5 Zone 7: Dodewaard – West

Bij Dodewaard - West is geen waterstand beschikbaar op de omringende locaties. In plaats daarvan zijn de waterstanden langs de oever geïnterpoleerd op basis van de oeverlocaties aan weerszijden van het ontbrekende deel. De geïnterpoleerde waterstanden liggen lager dan de rivier as, dit is te verklaren doordat de ontbrekende punten door de oriëntatie van de dijk beschut liggen ten opzichte van de stroomrichting van de rivier.



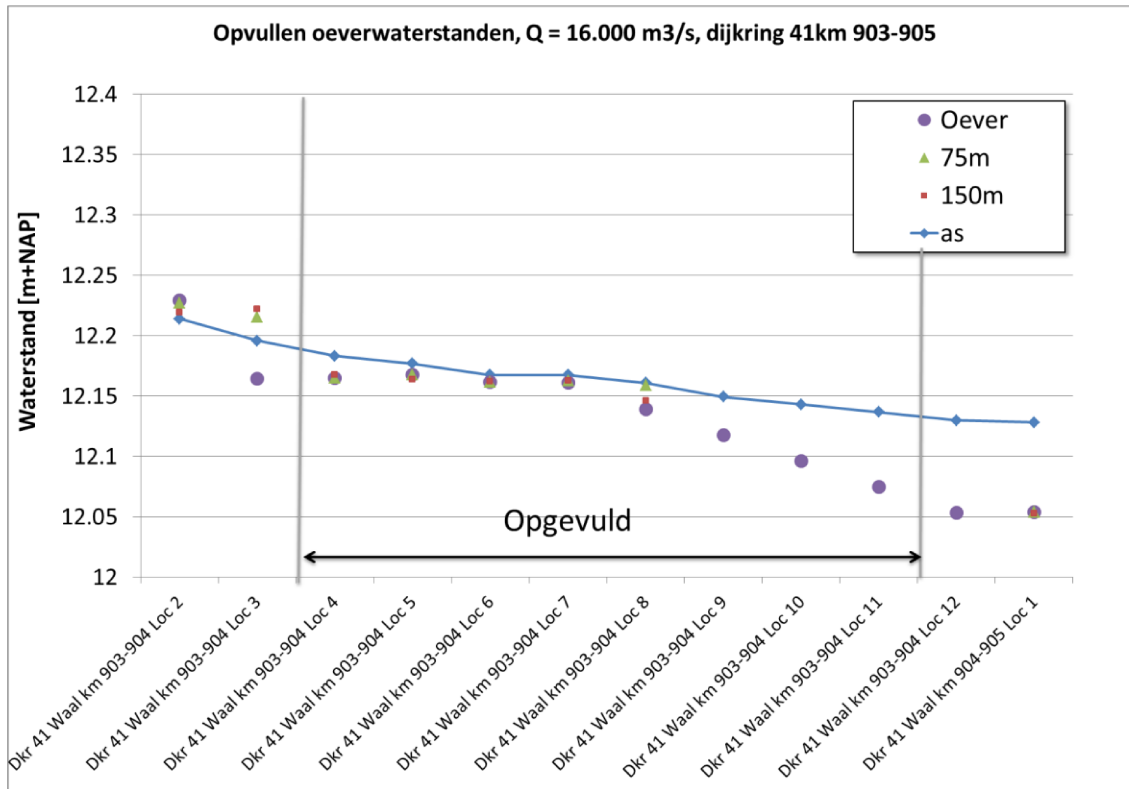
Figuur 31: Opgevlude punten bij zone 7: Dodewaard – West.



Figuur 32: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Dodewaard West en Dodewaard Oost.

A.6 Zone 8: Druten

Bij de drie missende uitvoerlocaties die het meest stroomopwaarts liggen zijn de verschillen met de omliggende locaties, 75 m en 150m voor de dijk, dusdanig klein dat de waterstand op deze locaties is overgenomen als oever waterstand. De vier stroomafwaartse uitvoerlocaties zijn bepaald door interpolatie. Dit levert lagere waterstanden lagere waterstanden dan op de as van de rivier. Dit is realistisch omdat de uitvoerlocaties beschut liggen ten opzichte van de stroomrichting van de rivier. De locatie 'Dkr 41 Waal km 903-904 Loc 7' is alleen opgevuld bij afvoerniveaus lager dan 16.000 m³/s. Bij hogere afvoerniveaus valt deze locatie niet droog en kan de waterstand direct worden overgenomen uit WAQUA.



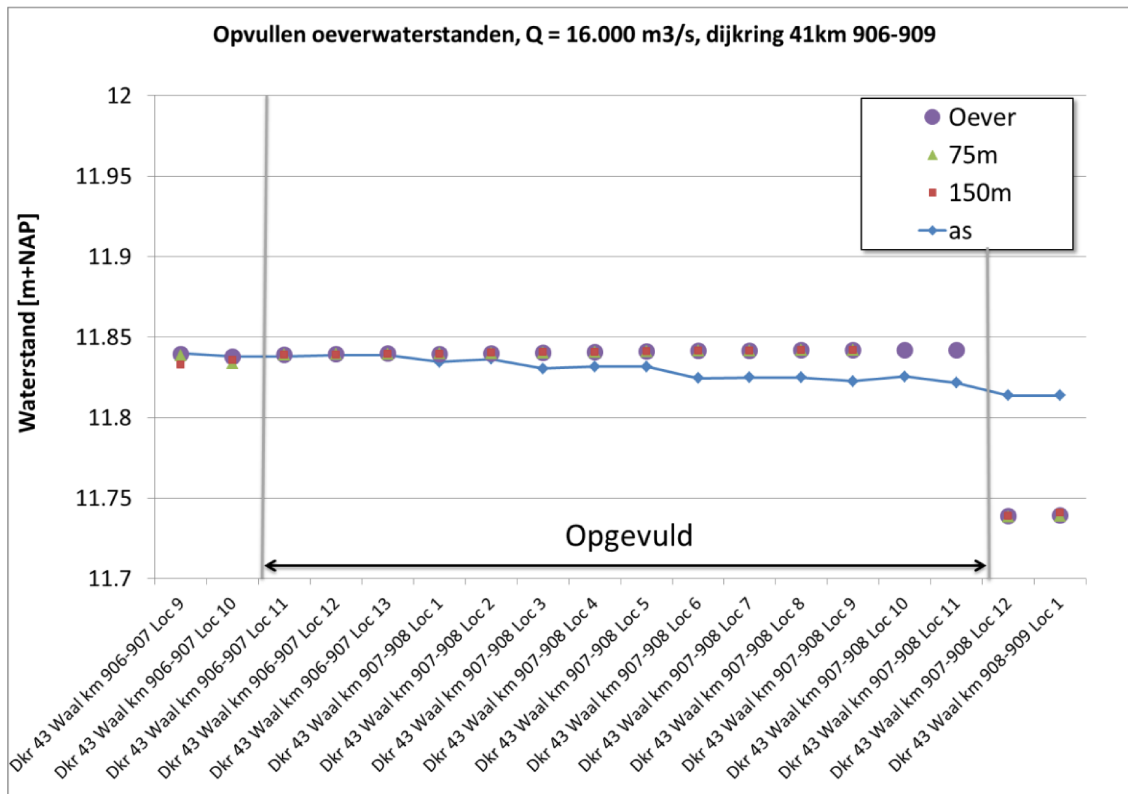
Figuur 33: Opgevulde punten bij zone 8, Druten.



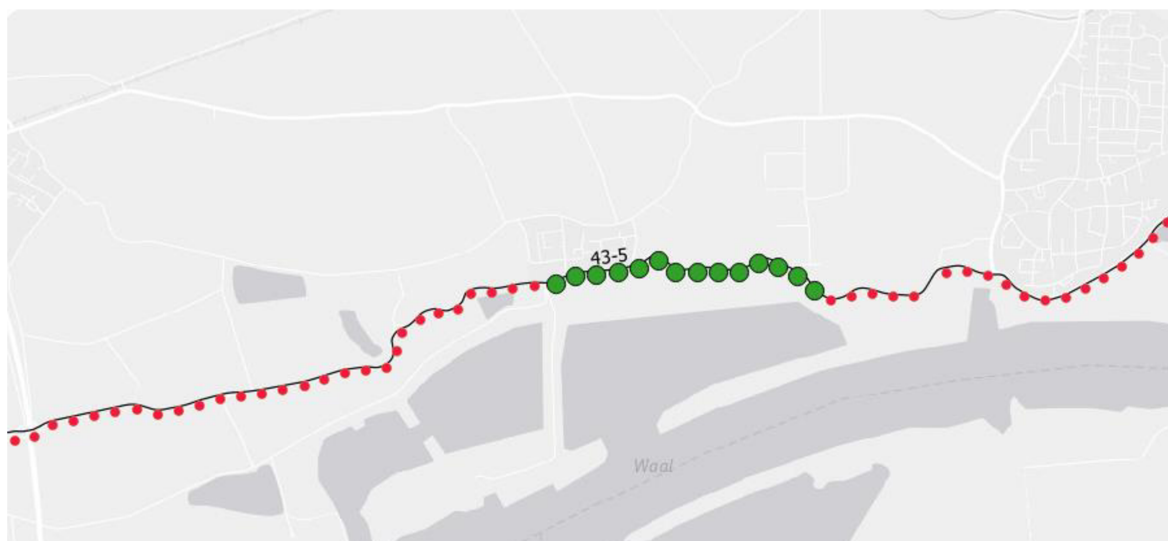
Figuur 34: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Druten.

A.7 Zone 9: IJzendoorn

Bij een afvoer van 16.000 m³/s of hoger staan de oeverlocaties bij IJzendoorn onder water. De database fysica is daarom bij lagere afvoerniveaus opgevuld met nieuwe waterstanden. Bij de lagere afvoerniveaus is de waterstand uit de as representatief gesteld voor de oeverlocatie, omdat de verschillen tussen as en oever beperkt zijn. De locaties stroomafwaarts van de opgevulde sectie hebben een lagere waterstand door de aanwezigheid van een hoog gelegen weg tussen locaties 11 en 12. Hierdoor is hier sprake van een sprong in de waterstanden



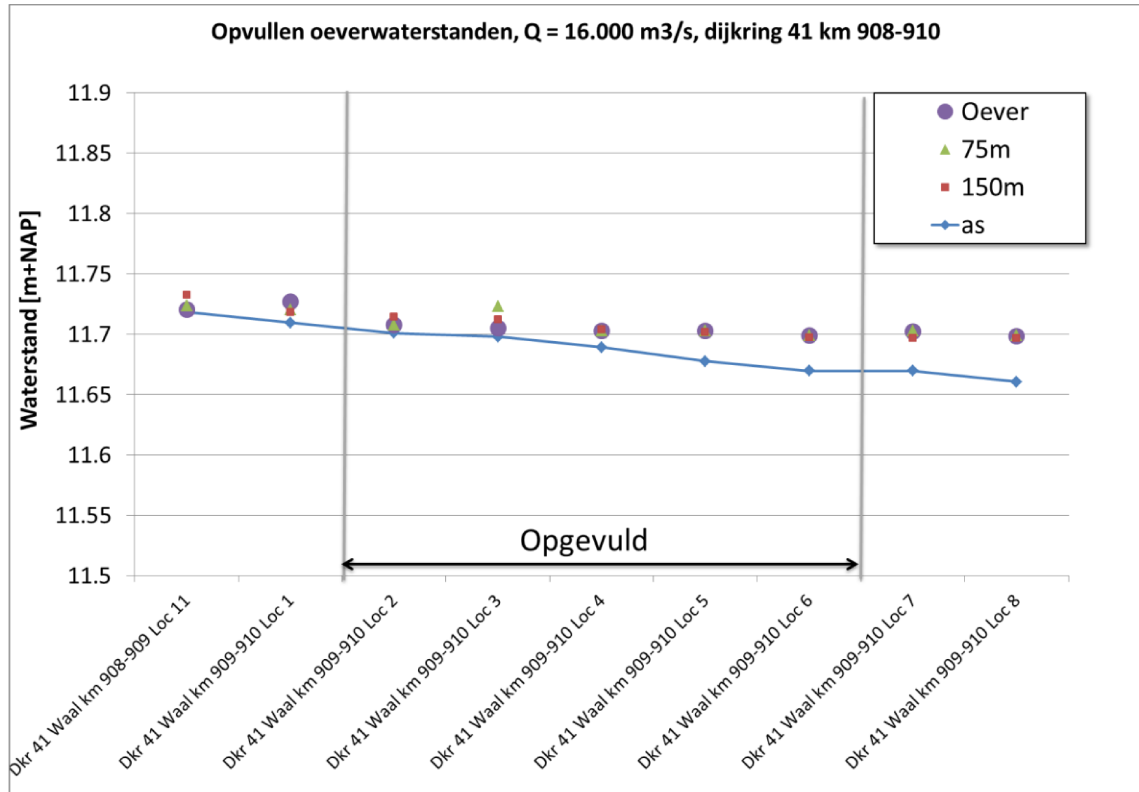
Figuur 35: Opgevulde punten bij zone 9, IJzendoorn.



Figuur 36: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Beneden - Leeuwen.

A.8 Zone 10: Beneden-Leeuwen

Bij de drie missende uitvoerlocaties die het meest stroomopwaarts liggen, zijn de verschillen met de omliggende locaties, 75 m en 150m voor de dijk, dusdanig klein dat de waterstand op deze locaties is overgenomen als oever waterstand. De waterstand ligt iets hoger dan in de as van de rivier. Dit komt doordat de punten in de buitenbocht liggen.



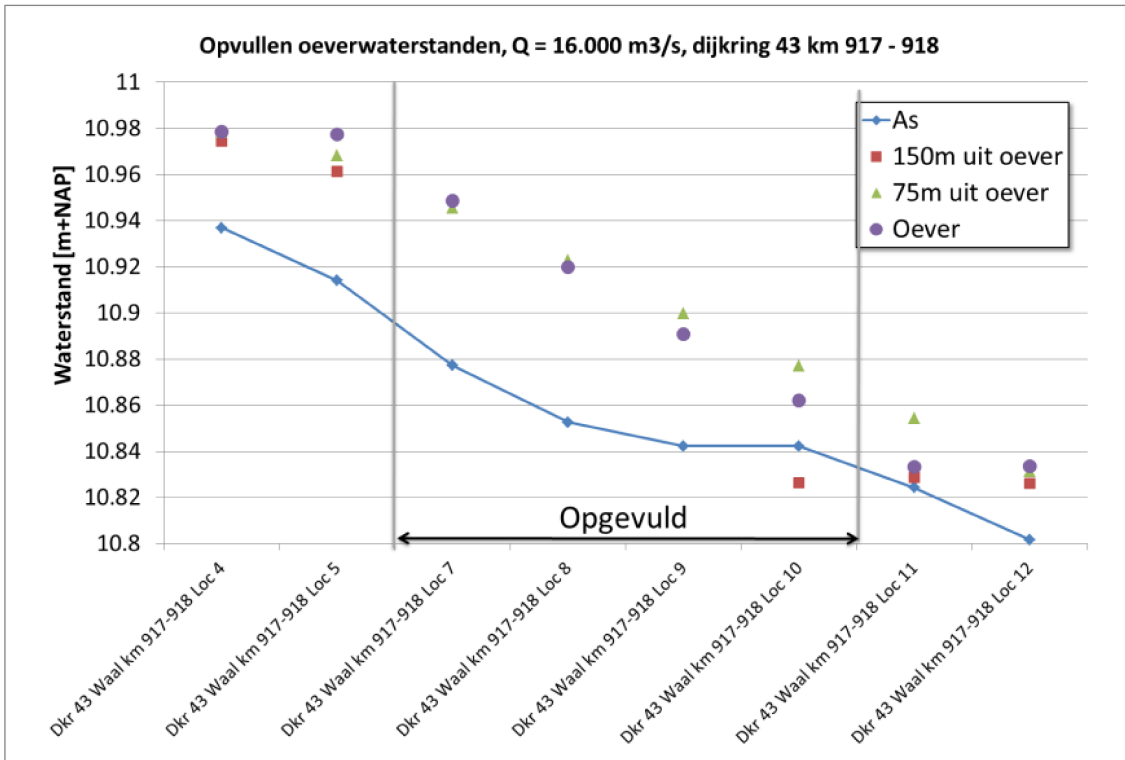
Figuur 37: Opgevulde punten bij zone 10, Beneden-Leeuwen.



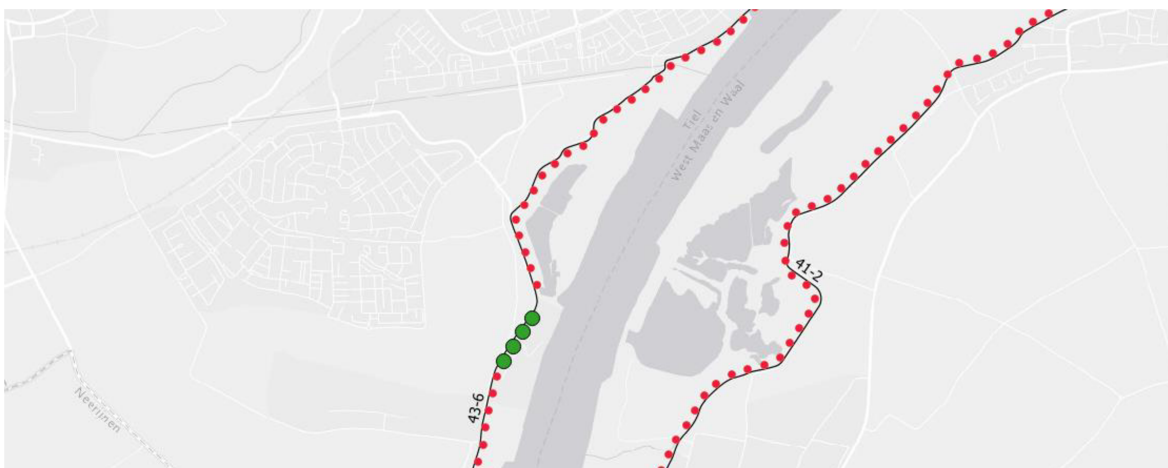
Figuur 38: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Beneden-Leeuwen.

A.9 Zone 12: Passewaaij

De waterstanden bij de oever zijn geïnterpoleerd tussen de locaties met bekende waterstanden aan weerszijden van het opgevulde deel. De waterstanden zijn hoger dan op de as, omdat de locaties in de buitenbocht van de rivier liggen.



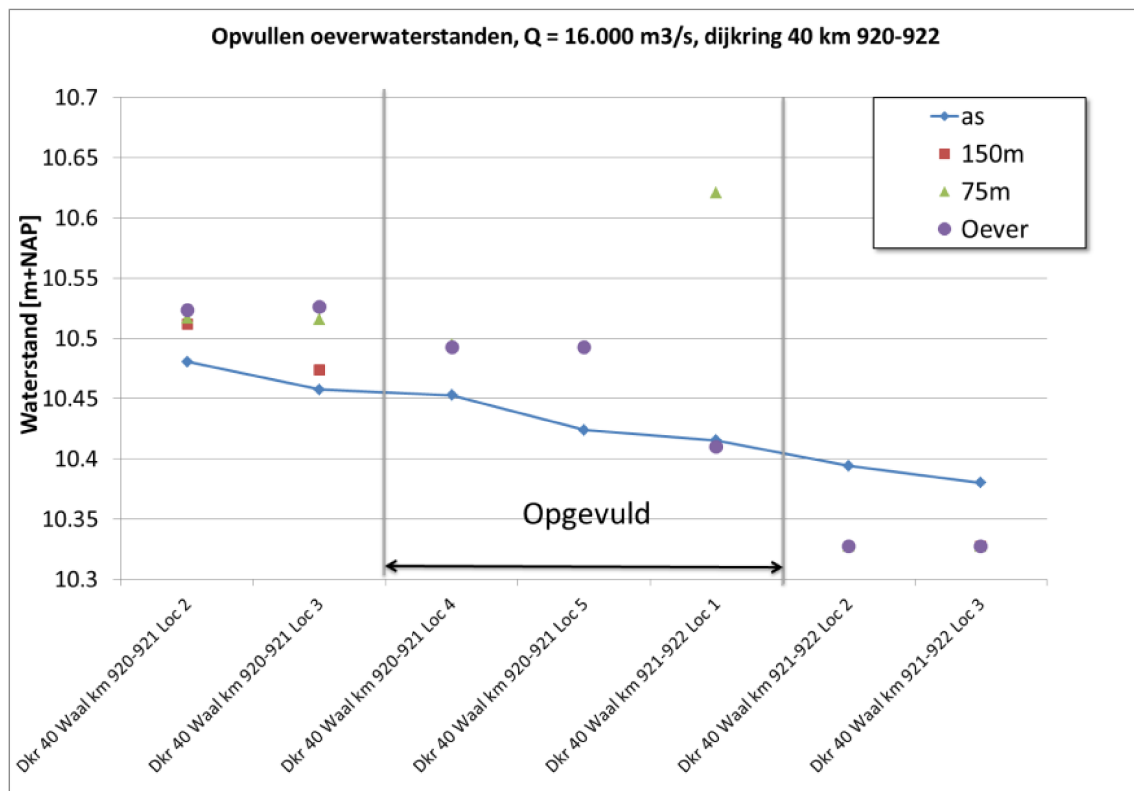
Figuur 39: Opgevulde punten bij zone 12, Passewaaij.



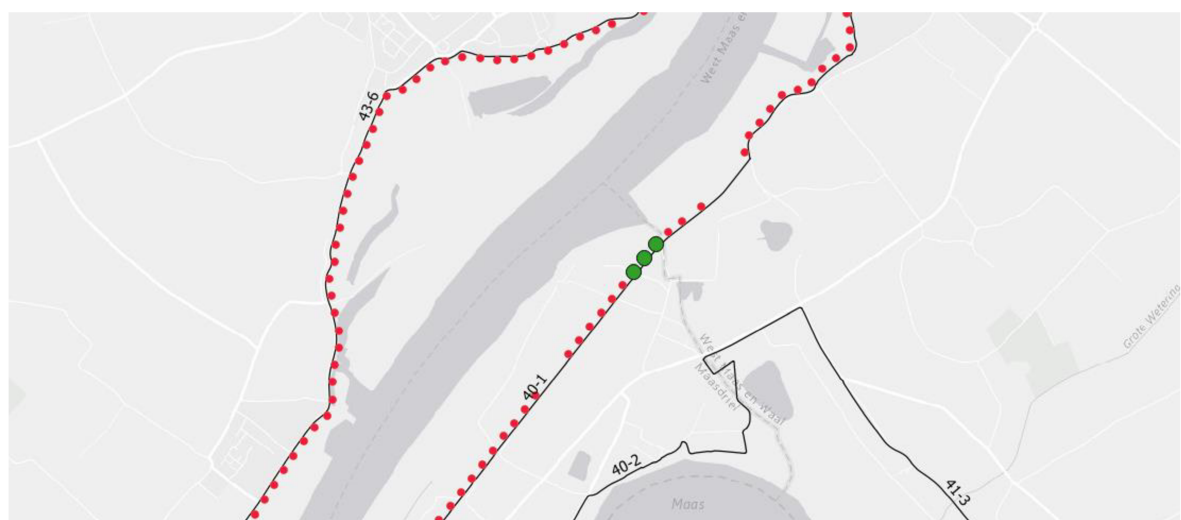
Figuur 40: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Passewaaij.

A.10 Zone 13: Oude Maasdijk

Bij de afvoerniveaus van 16.000 m³/s of hoger is alleen de waterstand op locatie 'Dkr 40 Waal 921 – 922 Loc 1' onbekend. Door te interpoleren tussen de twee direct naastgelegen oeverlocaties (920-921 Loc 5 en 921-922 Loc 2). De oeverwaterstanden liggen iets boven de as waterstanden, dit wordt veroorzaakt door opstuwung tegen een dijk dit benedenstrooms van deze punten ligt. Bij afvoerniveaus lager dan 16.000 m³/s vallen alle oeverlocaties binnen het opgevlude deel droog. In dat geval is de aswaterstand aangehouden.



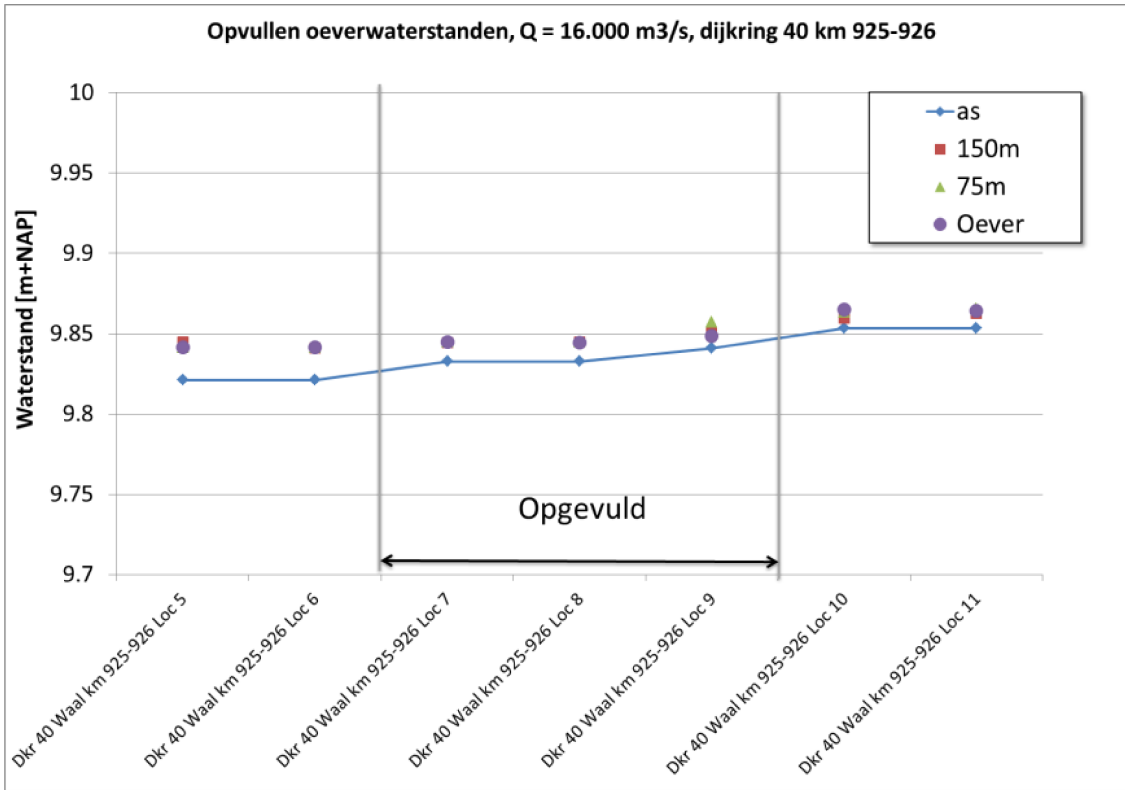
Figuur 41: Opgevlude punten bij zone 13, Oude Maasdijk.



Figuur 42: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Oude Maasdijk.

A.11 Zone 14: Sint Andries

De uitvoerlocaties op dit tracé liggen ter hoogte van de toegangsweg naar Nieuw fort Sint Andries. Omdat de toegangsweg hoger ligt, vallen deze locaties bij lagere afvoerniveaus droog. Bij deze afvoerniveaus is de waterstand bepaald door interpolatie tussen de naastgelegen oeverlocaties.



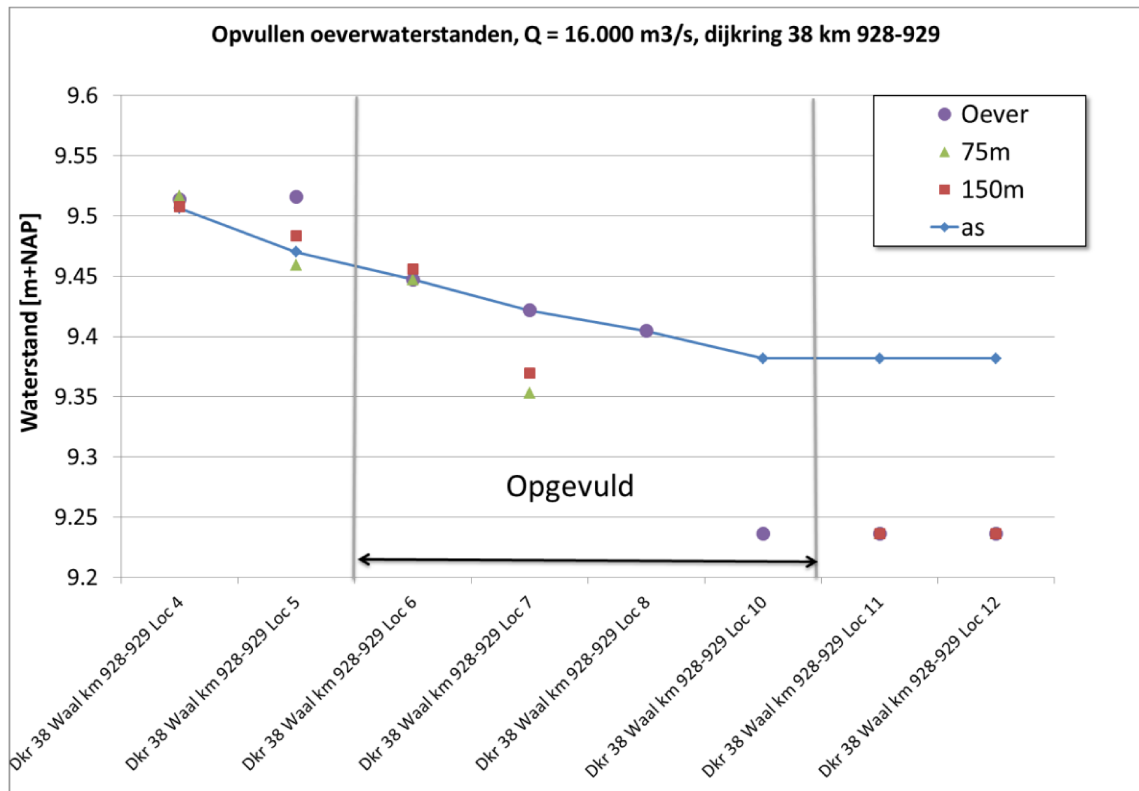
Figuur 43: Opgevulde punten bij zone 14, Sint Andries.



Figuur 44: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Sint-Andries.

A.12 Zone 15: Hurwenen

De uitvoerlocaties liggen nabij een hoog element in het voorland. Voor de waterstanden op de uitvoerlocaties Dkr 38 Waal km 928 – 929 Loc 6 t/m 8 is de waterstand op de as van de rivier overgenomen. De waterstand bij Dkr 38 Waal km 928 – 929 Loc 10 ligt stroomafwaarts van het hoge element in het rivierbed. Dit veroorzaakt de sprong in de waterstanden ter hoogte van deze locatie. De waterstand bij Dkr 38 Waal km 928 – 929 Loc 10 is gelijk verondersteld aan de naastgelegen (bekende) waterstand bij de uitvoerlocatie Dkr 38 Waal km 928 – 929 Loc 11.



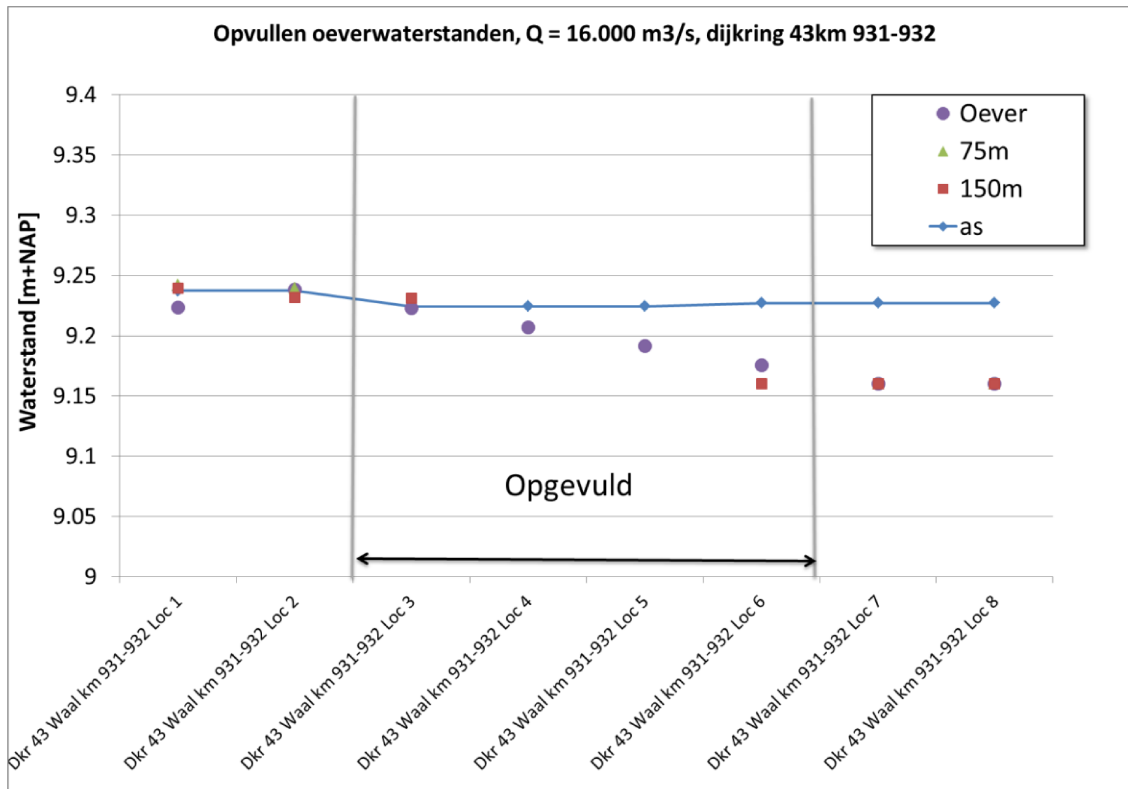
Figuur 45: Opgevlude punten bij zone 15: Hurwenen.



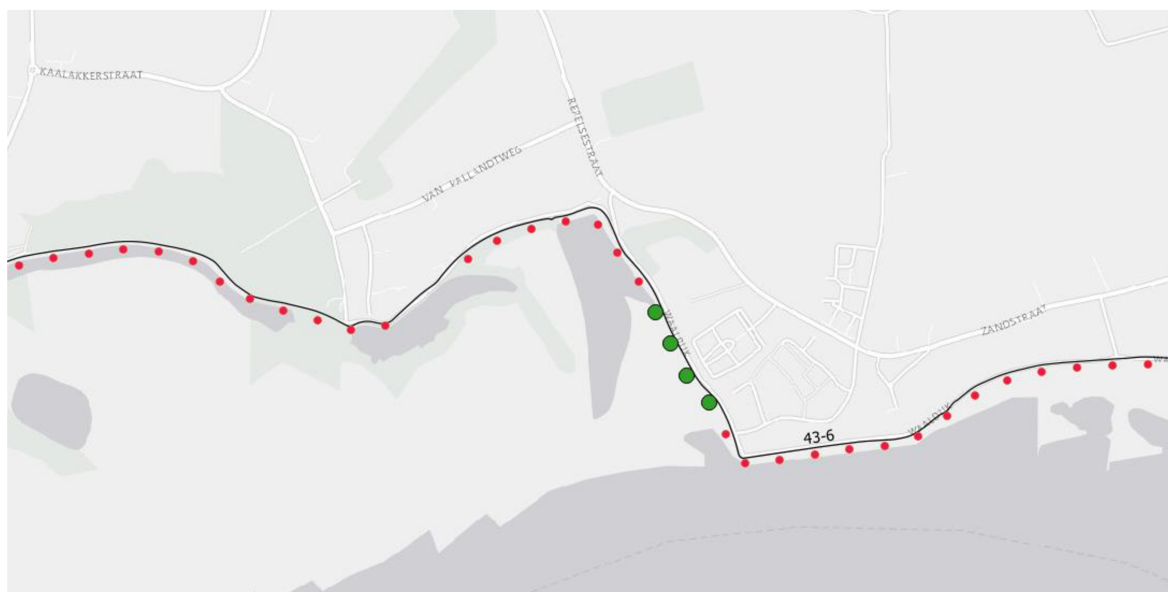
Figuur 46: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Hurwenen.

A.13 Zone 16: Opijnen

De waterstanden bij de oever zijn geïnterpoleerd tussen de locaties met bekende waterstanden aan weerszijden van het opgevlude deel. De waterstanden op deze locaties liggen enkele centimeters lager dan op de rivieras. Dit komt omdat de uitvoerlocaties enigszins beschut liggen ten opzichte van de stroomrichting van de rivier.



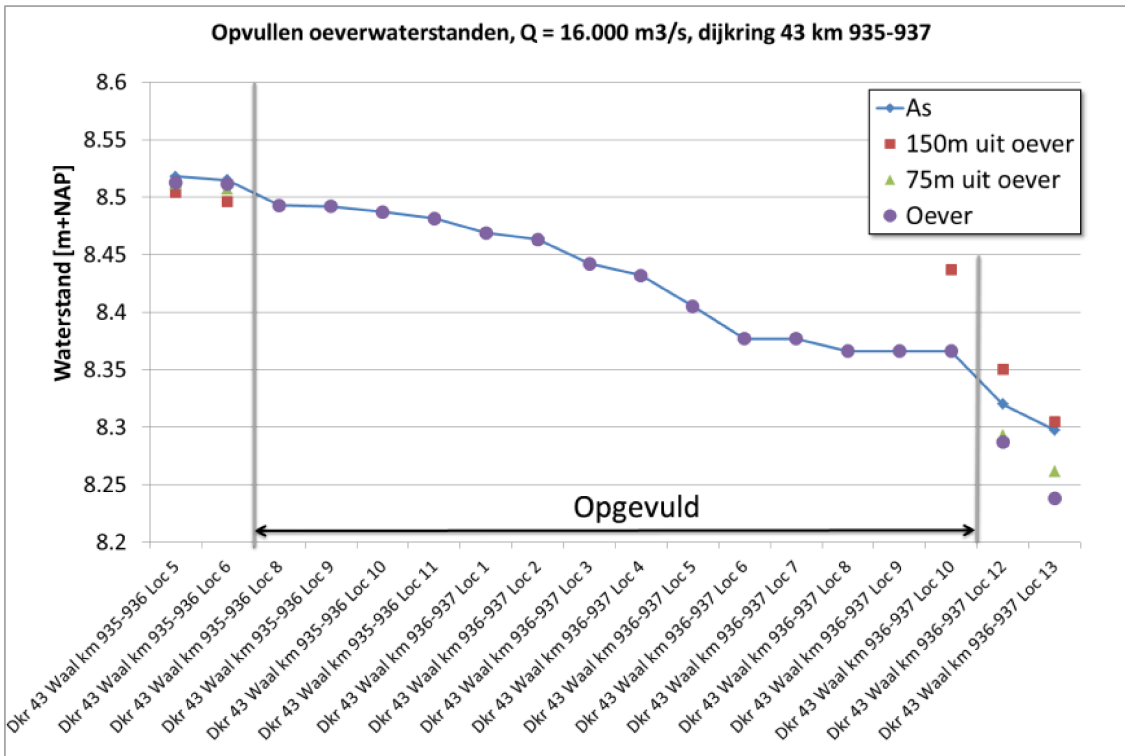
Figuur 47: Opgevulde punten bij zone 16, Opijnen.



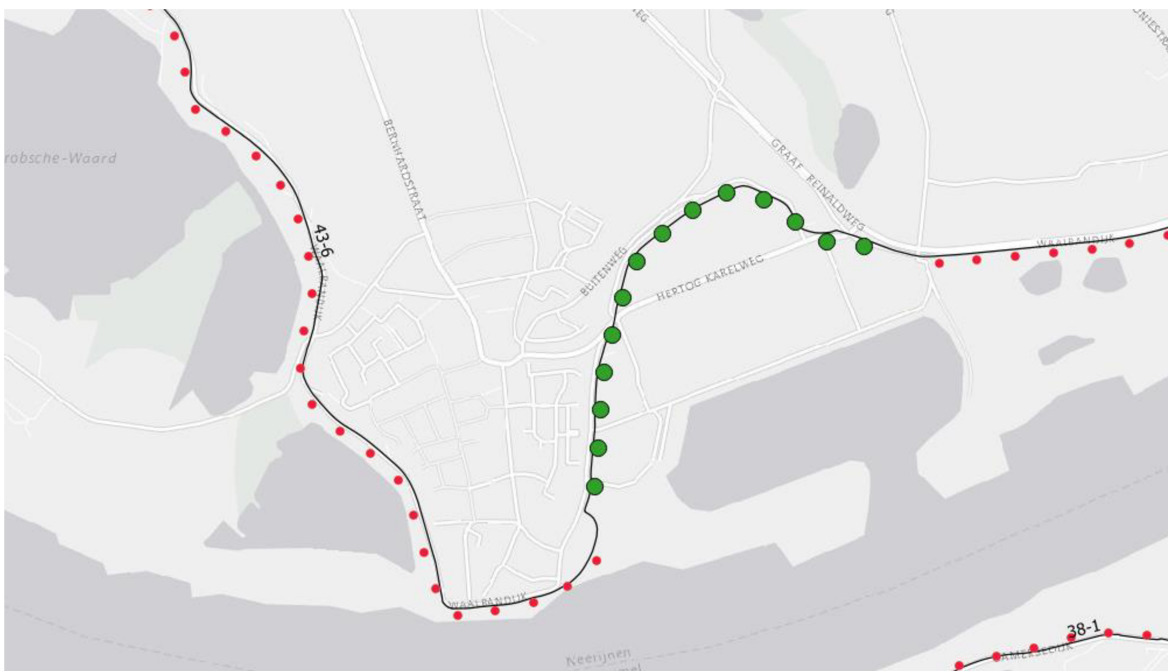
Figuur 48: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Opijnen.

A.14 Zone 17: Haaften

Bij Haaften is de waterstand op de as van de rivier representatief gesteld voor de oeverlocaties, omdat over een vrij groot traject geen waterstanden bekend zijn aan de oever of op de extra locaties 75 en 150 m voor de oever. Op de twee voorgaande en opvolgende locaties is de oeverwaterstand lager dan de as waterstand. Het aanhouden van de aswaterstand kan dus worden gezien als een conservatieve benadering.



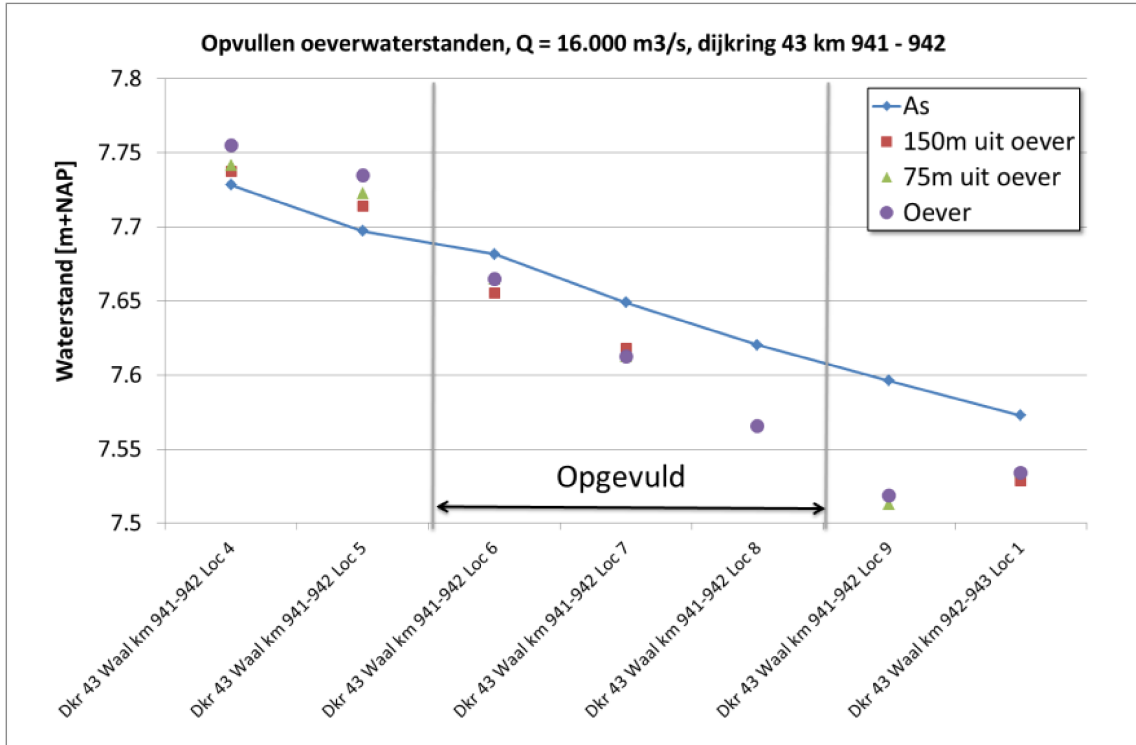
Figuur 49: Opgevlude punten bij zone 17: Haaften.



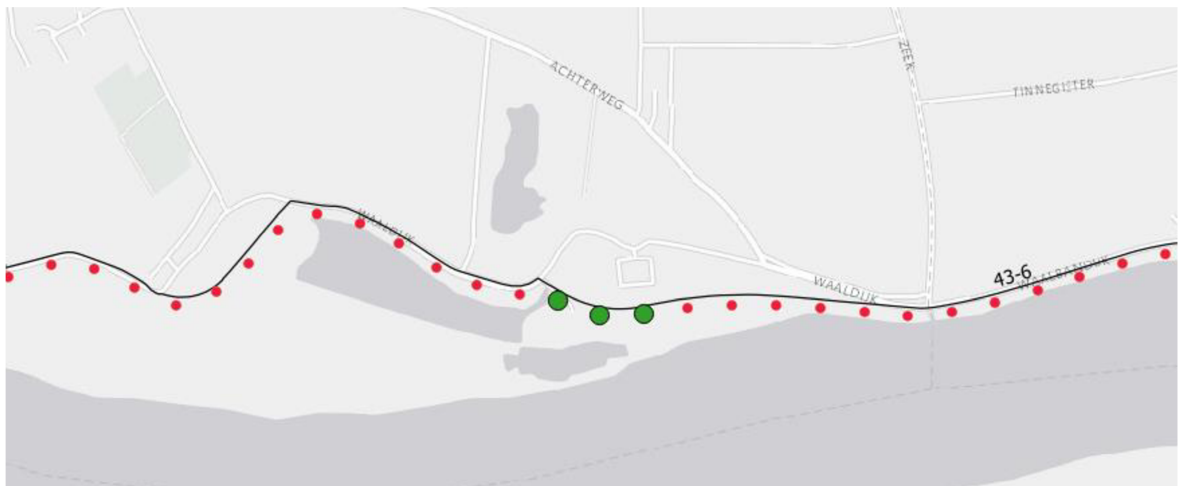
Figuur 50: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Haaften.

A.15 Zone 18: Boveneind

De waterstanden bij de oever zijn geïnterpoleerd tussen de locaties met bekende waterstanden aan weerszijden van het opge vulde deel, omdat de waterstanden op de as van de rivier ook lineair verlopen.



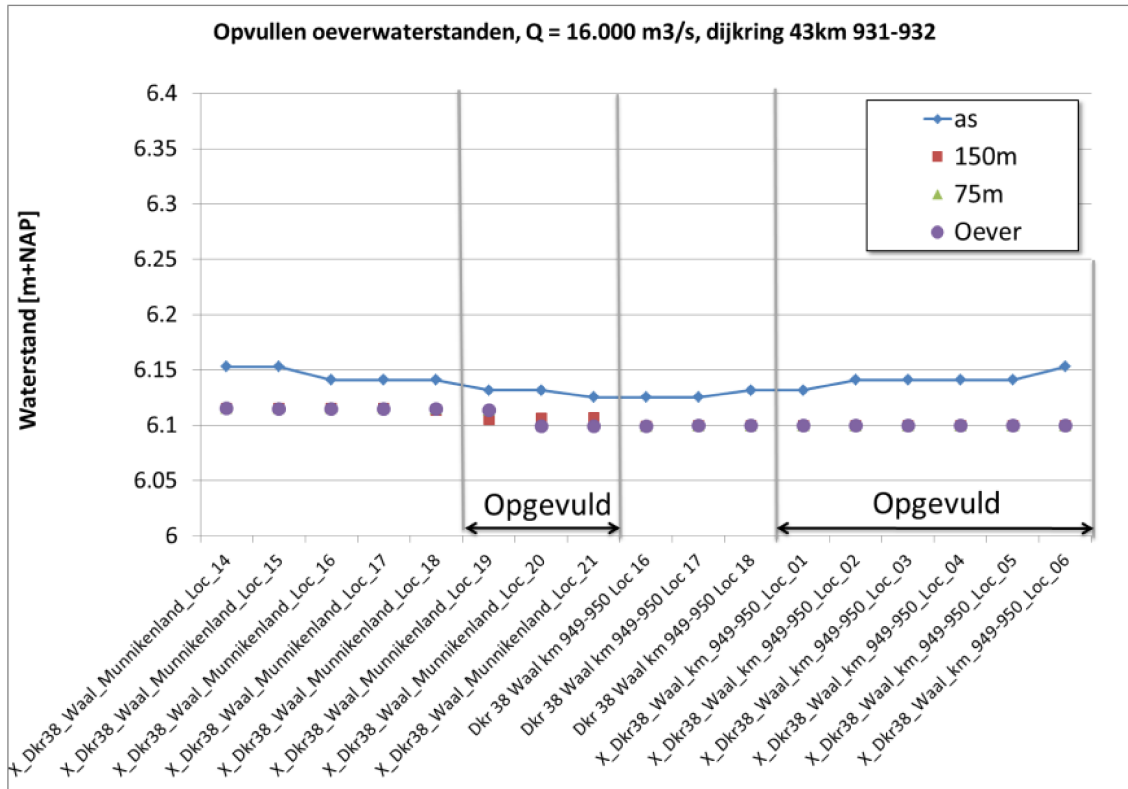
Figuur 51: Opgesvulde punten bij zone 18: Boveneind.



Figuur 52: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Boveneind.

A.16 Zone 19: Munnikenland

De waterstanden op de oeverlocaties zijn gelijk gesteld aan de waterstand op de bekende locaties 'Dkr 38 Waal km 949 -950 Loc 16 t/m18', omdat de waterstanden rondom de ontbrekende oeverlocaties bij het Munnikenland relatief weinig variatie vertonen.



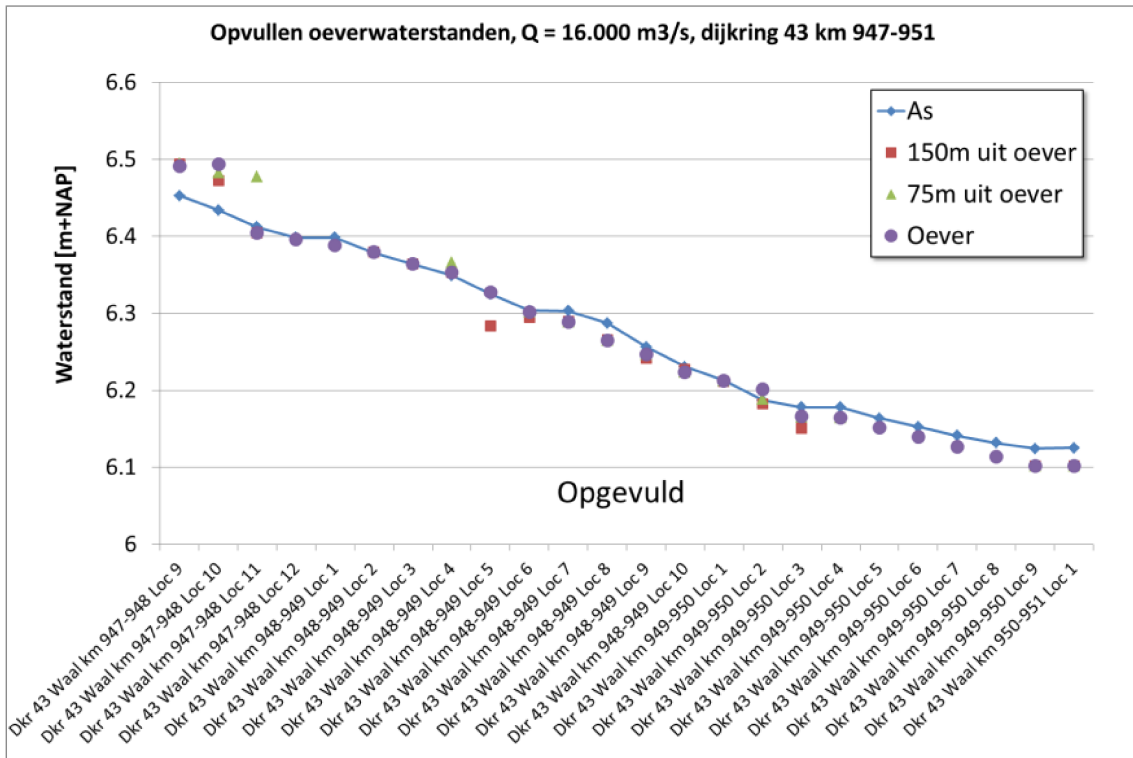
Figuur 53: Opgevulde punten bij zone 19: Munnikenland.



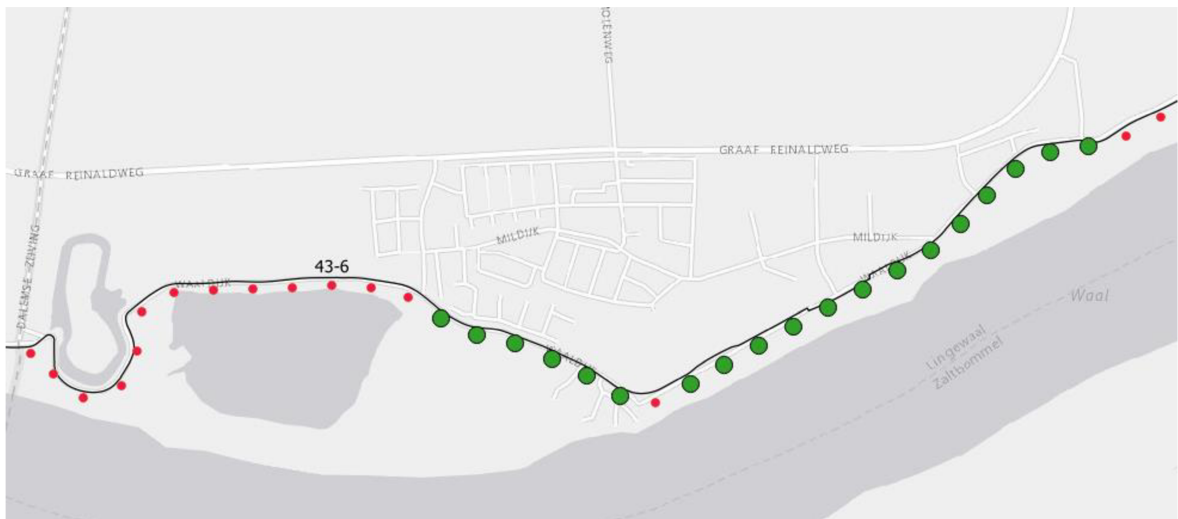
Figuur 54: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van het Munnikenland.

A.17 Zone 20: Vuren

De verschillen tussen de waterstanden op de as van de Waal en uitvoerlocaties 75 m en 150 m uit de oever zijn dusdanig klein dat de waterstand uit de nabij gelegen locatie is overgenomen als nieuwe waterstand voor de oeverlocatie. Ter hoogte van de locaties *Dkr Waal kmk 947 - 948 Loc 11 en 12* is sprake van een sprong in de waterstand. Dit komt omdat hier sprake is van opstuwung tegen het hoger gelegen element in het rivierbed (stuwwal).



Figuur 55: Opgevulde punten bij zone 20: Vuren.



Figuur 56: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en missende uitvoerlocaties (groen) ter hoogte van Vuren.

A.18 Zones 1, 4 en 11

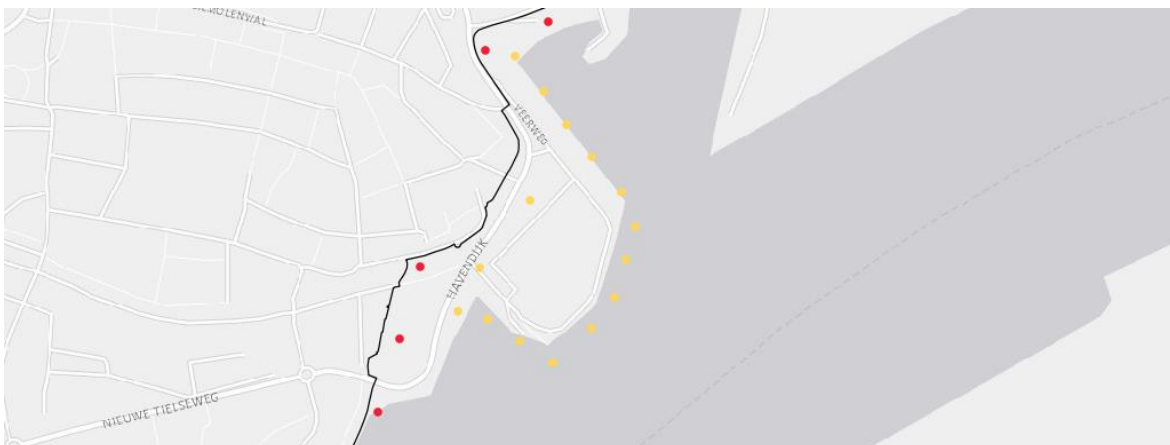
Bij de Pannerdensche Kop (Zone 1), Nijmegen (Zone 4) of Tiel (Zone 11) zijn de uitvoerlocaties opnieuw gedefinieerd. Dit gaf een beter beeld van de waterstanden ter plaatse van de dijkpalen dan de waterstanden op te vullen. Zo is het rivierbed bij de Pannerdensche Kop dusdanig hoog dat hier bij een afvoer van 20.000 m³/s nog geen water komt te staan tegen de Waaldijk. Daarom zijn de uitvoerlocaties hier richting de Waal verplaatst, zodat er wel water komt te staan. Bij Nijmegen en Tiel zijn aanvullende uitvoerlocaties gedefinieerd, omdat sprake is van een complexe lokale geometrie. Met deze uitvoerlocaties kan aanvullende inzichten worden verkregen in het effect van de hoge vooroevers op de waterstanden en het HBN.



Figuur 57: Aanwezige uitvoerlocaties (rood), missende uitvoerlocaties (groen) en aanvullende gedefinieerde uitvoerlocaties (geel) ter hoogte van de Pannerdensche Kop.



Figuur 58: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en aanvullende gedefinieerde uitvoerlocaties (geel) ter hoogte van Nijmegen.

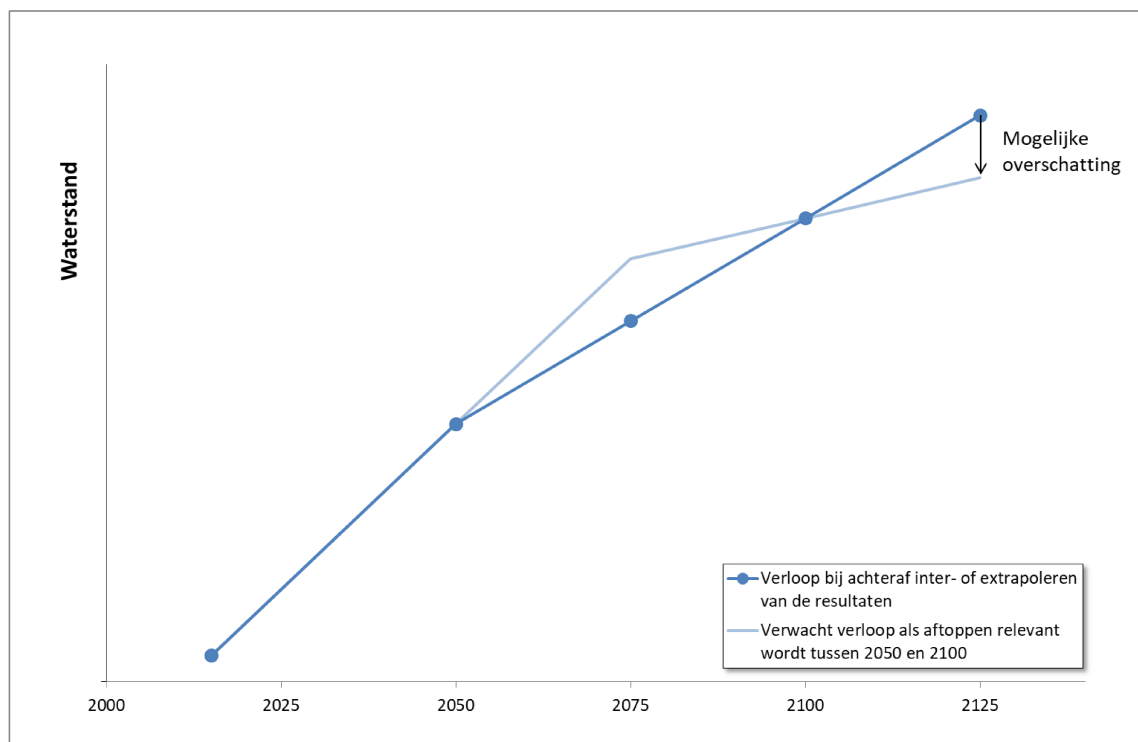


Figuur 59: Aanwezige uitvoerlocaties (rood) en aanvullende gedefinieerde uitvoerlocaties (geel) ter hoogte van Tiel.

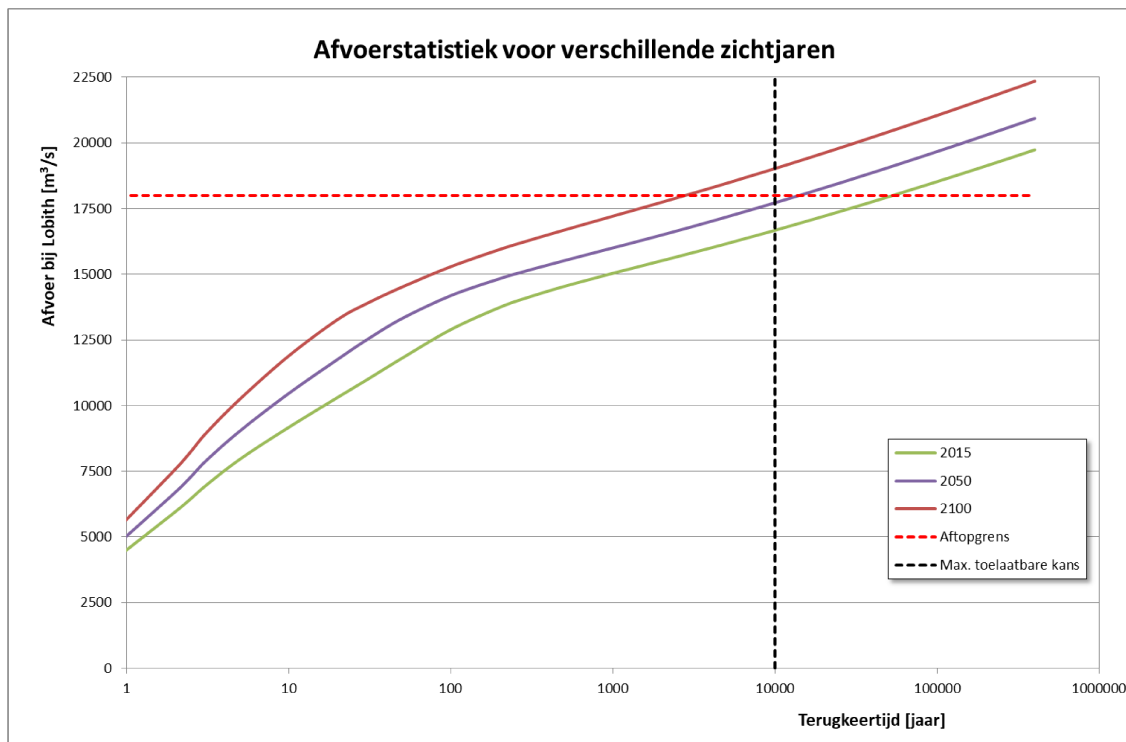
Bijlage B: Fout bij interpoleren van tussenliggende zichtjaren

De waterstanden en HBN's zijn met Hydra-NL bepaald voor de zichtjaren 2015, 2050 en 2100. De waterstanden en HBN's de zichtjaren in 2025, 2075 en 2125 worden bepaald door de Hydra resultaten in de zichtjaren 2015, 2050 en 2100 te inter- of extrapoleren naar de gevraagde zichtjaren (2025, 2075 en 2125).

Door deze werkwijze en de invloed van het aftoppen worden de waterstanden en HBN's voor de geïnterpoleerde zichtjaren mogelijk niet correct weergegeven. Dit komt omdat mogelijk een knippunt ontstaat op het moment dat aftoppen van invloed is op het berekeningsresultaat. Als voorbeeld, extrapolatie van de waterstand in 2050 (niet afgetopt) en 2100 (wel afgetopt) leidt mogelijk tot overschatting van de waterstanden in 2125 (zie Figuur 60). Tussen 2050 en 2100 wordt namelijk een 'trendbreuk' in de waterstandstoename verwacht omdat de afvoer waarbij wordt afgetopt in deze periode wordt bereikt (Figuur 61). De gemiddelde waterstandsstijging (per jaar) tussen 2050 en 2100 is daarom niet representatief voor de periode 2100 en 2125. Door lineair te extrapoleren wordt dit effect dus niet meegenomen en de waterstand in 2125 dus overschat.



Figuur 60: Mogelijke fout door effect van inter- of extrapoleren van resultaten in combinatie met aftoppen.



Figuur 61: Afvoerstatistiek voor verschillende zichtjaren, tussen 2050 en 2100 wordt de 1/10.000 per jaar afvoer groter dan de aftopgrens van 18.000 m³/s.

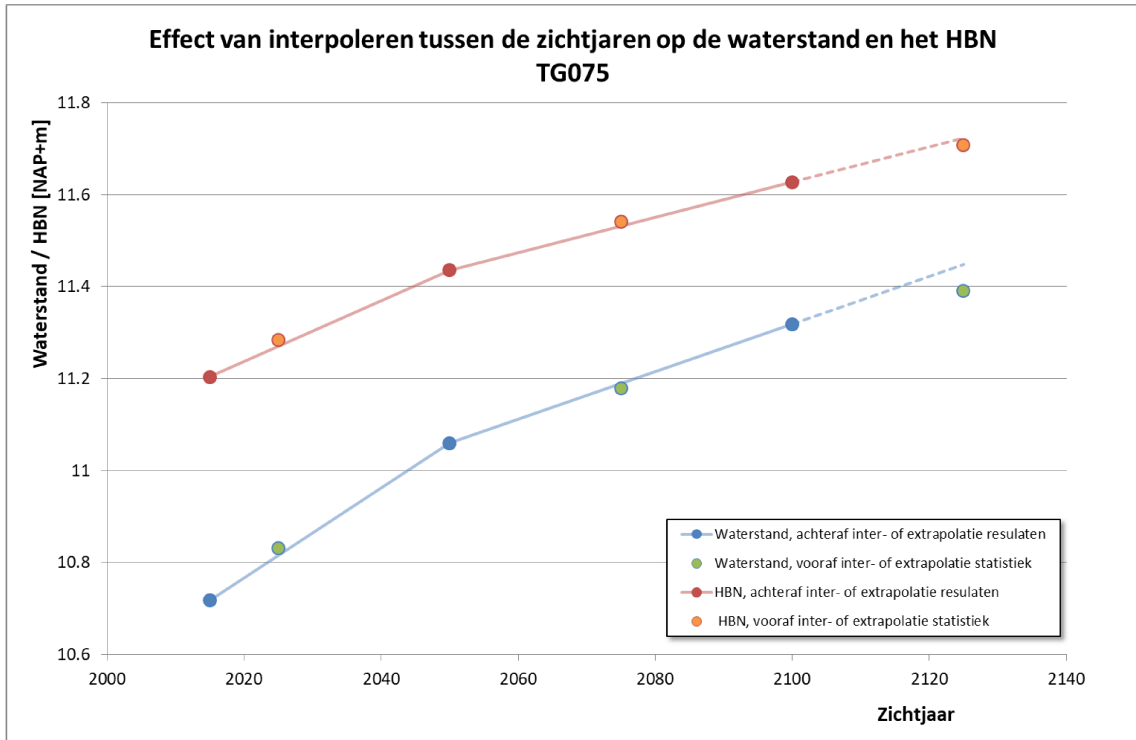
In deze bijlage wordt de invloed van het achteraf interpoleren van de resultaten beschouwd. Dit is uitgewerkt door dezelfde twee locaties te beschouwen als in de detailanalyse (paragraaf 5.3), namelijk dijkpaal TG075 en TG127. In de analyse zijn de volgende twee werkwijzen beschouwd:

1. Het inter- of extrapoleren van de waterstand of het HBN voor de zichtjaren 2025, 2075 en 2125 op basis van de Hydra-NL resultaten voor de zichtjaren 2015, 2050 en 2100 (zoals toegepast in deze studie).
2. Het inter- of extrapoleren van de afvoerstatistiek. De waterstand en het HBN voor de zichtjaren 2025, 2075 en 2125 wordt dan direct berekend met Hydra-NL. Met deze werkwijze wordt het effect van aftoppen in 2025, 2075 en 2125 nauwkeuriger meegenomen¹⁰.

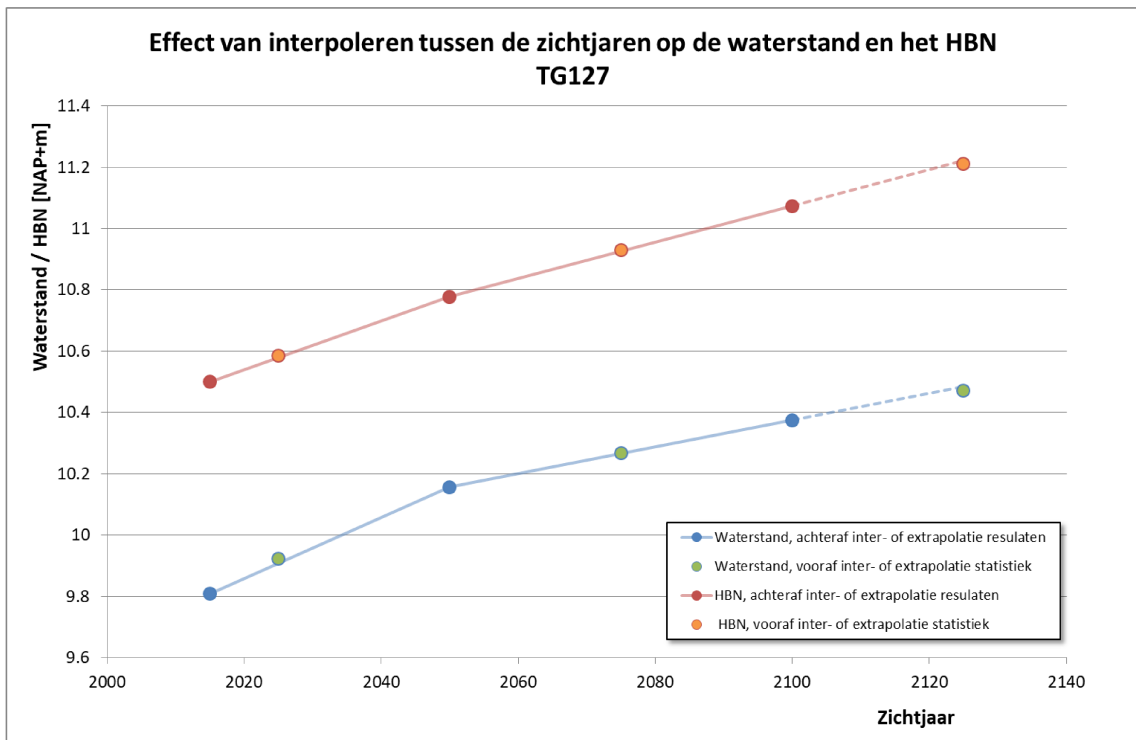
In Figuur 62, Figuur 63 en Tabel 7 is het resultaat van deze twee verschillende werkwijzen weergegeven. Hierin is te zien dat de verschillen tussen de twee werkwijzen over het algemeen beperkt zijn (max 2 cm). Alleen in de waterstandsberekening in 2125 bij TG075 wordt de waterstand met 6 cm overschat. Dit komt omdat dit een relatief smal deel van de Waal betreft en afvoerveranderingen dus relatief sterk doorwerken in de waterstand.

Het verschil is zo klein, omdat wanneer gerekend wordt met uitgeïntegreerde modelonzekerheden de waterstand nog steeds toe kan nemen als de maximale waarde van de afvoer (van 18.000 m³/s) bereikt is (zie paragraaf 4.1.1 voor een nadere toelichting hierop). Hierdoor is geen sprake meer van een waterstand die niet kan stijgen nadat het aftopniveau bereikt is, waardoor de gemaakte fout door interpolatie beperkt is.

¹⁰ Hierbij wordt nog steeds verondersteld dat klimaatverandering tussen de 2015, 2050 en 2100 lineair verloopt. Alleen het effect van aftoppen wordt nauwkeuriger in beeld gebracht.



Figuur 62: Waterstanden en HBN voor verschillende zichtjaren op basis van vooraf inter- of extrapoleren van de statistiek (oranje / groene bolletjes) en achteraf inter- of extrapoleren van de uitkomsten (rode / blauwe lijn) bij dijkpaal TG075.



Figuur 63: Waterstanden en HBN voor verschillende zichtjaren op basis van vooraf inter- of extrapoleren van de statistiek (oranje / groene bolletjes) en achteraf inter- of extrapoleren van de uitkomsten (rode / blauwe lijn) bij dijkpaal TG127.

	Waterstandsverschil [m]			HBN verschil [m]		
	2025	2075	2125	2025	2075	2125
TG075	0.02	-0.01	-0.06	0.01	0.01	-0.02
TG127	0.01	0.00	-0.01	0.01	0.00	-0.01

Tabel 7: Waterstands- en HBN-verschil bij verschillende inter- of extrapolatie wijzen (voorafgaand in de statistiek of na interpolatie van de resultaten van de Hydra-NL berekening).

Bijlage C: Invoer bij Hydra – NL berekening

In deze bijlage is de invoer van Hydra-NL beschreven om de uitgevoerde berekeningen te reproduceren. Hiervoor moet gebruik worden gemaakt van de 'testmodus' van Hydra-NL. Daarnaast is gebruikt gemaakt van:

Afvoerstatistiek (zie ook het opleverdossier):

- GRADE 2015 - Lobith - incl. onzekerheden.txt
- GRADE 2050 - Lobith - incl. onzekerheden.txt
- GRADE 2100 - Lobith - incl. onzekerheden.txt

Database Fysica: *Referentie_2015_Aangevuld.mdb*

In de uitgangspunten is beschreven dat vanwege de gevraagde doorlooptijd in dit project voor de stapgrootte van de hulpdijkhoogte is afgeweken van de standaardinstellingen. Voor de waterstandsberekeningen is 5cm toegepast van en voor de HBN-berekeningen 10 cm. De standaard stapgrootte in Hydra-NL is 1 cm (bij toepassen van aftoppen). Dit betekent dat de resultaten uit deze studie niet tot op de millimeter kunnen worden gereproduceerd met de versie van Hydra-NL die beschikbaar wordt gesteld via Helpdesk Water. Het is de verwachting dat de gereproduceerde resultaten tot ongeveer 1 cm afwijken van de resultaten in deze studie (en de opgeleverde Excel database). Incidenteel kan het verschil groter zijn.

The screenshot shows the 'Algemeen' (General) tab of the Hydra-NL input interface. It contains the following elements:

- Navigation tabs: Algemeen, Criterium, Gegevensblokken, Uitsplitsingen, Modelonzekerheid.
- Input fields for peak discharge:
 - Laagste piekwaarde afvoertrapezia: 750 m³/s
 - Hoogste piekwaarde afvoertrapezia: 25000 m³/s
 - Stapgrootte piekwaarde afvoertrapezia: 50 m³/s
 - Gehanteerde fysische bovengrens afvoer: 18000 m³/s
- Input field for discretization step: Discretisatiestap afvoertrapezia: 12 uur
- Input field for wind speed: Bovengrens windsnelheid: 45 m/s
- Checkbox: Aftoppen afvoertrapezia
- Section: Waterstanden en andere belastingniveaus indien nodig repareren langs:
 - Checkbox: Afvoer
- Input field for water level rise: Verhoging waterstand: 0 m
- Checkbox: Berekenen illustratiepunten
- Checkbox: Wegschrijven tussentijdse uitvoer naar bestanden

Figuur 64: Invoer tabblad algemeen – testmodus Hydra-NL

Algemeen **Criterion** Gegevensblokken Uitsplitsingen Modelonzekerheid

Type berekening

- Waterstand
- Significante golfhoogte
- Piekperiode
- Hydraulisch belastingniveau Alleen rekenen met kruinhoogte uit profiel
 - 2%-Golfoploop
 - Golfoverslag Kritiek overslagdebiet

l/s/m
 l/s/m
- Overloop
- Overslagdebiet
- Golfcondities bekledingen

Windinvloed bij damwand

Frequenties Aantal frequenties:

		Frequentie [1/jaar]	
1	1/	100	^
2	1/	300	
3	1/	1000	
4	1/	3000	
5	1/	10000	
6	1/	30000	
7	1/	417	
8	1/	1250	
9	1/	4167	v

Aantal extra steunpunten:

Kruinhoogtes Aantal kruinhoogtes:

Kruinhoogte [m+NAP]

Hulpdijkhoogtes opgeven in bestand

Transformatiebestand wind:

Figuur 65: Invoer tabblad criterium – testmodus Hydra-NL

Algemeen Criterium **Gegevensblokken** Uitsplitsingen Modelonzekerheid

Aantal verschillende gegevensblokken: 1

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Aantal keer dit gegevensblok: 6

Bestand met overschrijdingskansen piekafvoer: 2015 - Lobith - incl. onzekerheden.txt Bladeren

Bestand met overschrijdingskansen windsnelheid: nswind_Deelen_2017_metOnzHeid.txt Bladeren

Bestand met momentane kansen op de windrichting: len\Richtingskansen_Deelen_2017.txt Bladeren

Parametrische weergave van (geknikte) afvoertrapezia

Tabel met het afvoerloop

Tabel met topduren van de afvoertrapezia: jpduur\Lobith\Topduur_Lobith_v01.txt Bladeren

Basisduur trapezium: 30 dagen

Blokduur wind: 12 uur

Insnoeringsfactor hoogte afvoertrapezia: 100 %

Insnoeringsfactor horizontale breedte afvoertrapezia: 100 %

Figuur 66: Invoer tabblad gegevensblokken – testmodus Hydra-NL

Algemeen	Criterion	Gegevensblokken	Uitsplitsingen	Modelonzekerheid
----------	-----------	-----------------	----------------	-------------------------

Onzekerheid in de waterstand

Rekenen met onzekerheid in de waterstand

Verwachtingswaarde: m

Standaarddeviatie: m

Aantal door te rekenen waarden: -

Onzekerheid in de golfhoogte

Rekenen met onzekerheid in de golfhoogte

Verwachtingswaarde factor: -

Standaarddeviatie factor: -

Aantal door te rekenen waarden: -

Onzekerheid in de golfperiode

Rekenen met onzekerheid in de golfperiode

Verwachtingswaarde factor $T_m-1,0$: -

Standaarddeviatie factor $T_m-1,0$: -

Verwachtingswaarde factor T_p : -

Standaarddeviatie factor T_p : -

Aantal door te rekenen waarden: -

Percentage afhankelijke blokken in afvoertrapezia: %

Figuur 67: Invoer tabblad Modelonzekerheid – testmodus Hydra-NL



HKV IJN in water BV

Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Botter 11-29
8232 JN Lelystad

0320 29 42 42
info@hkv.nl
www.hkv.nl