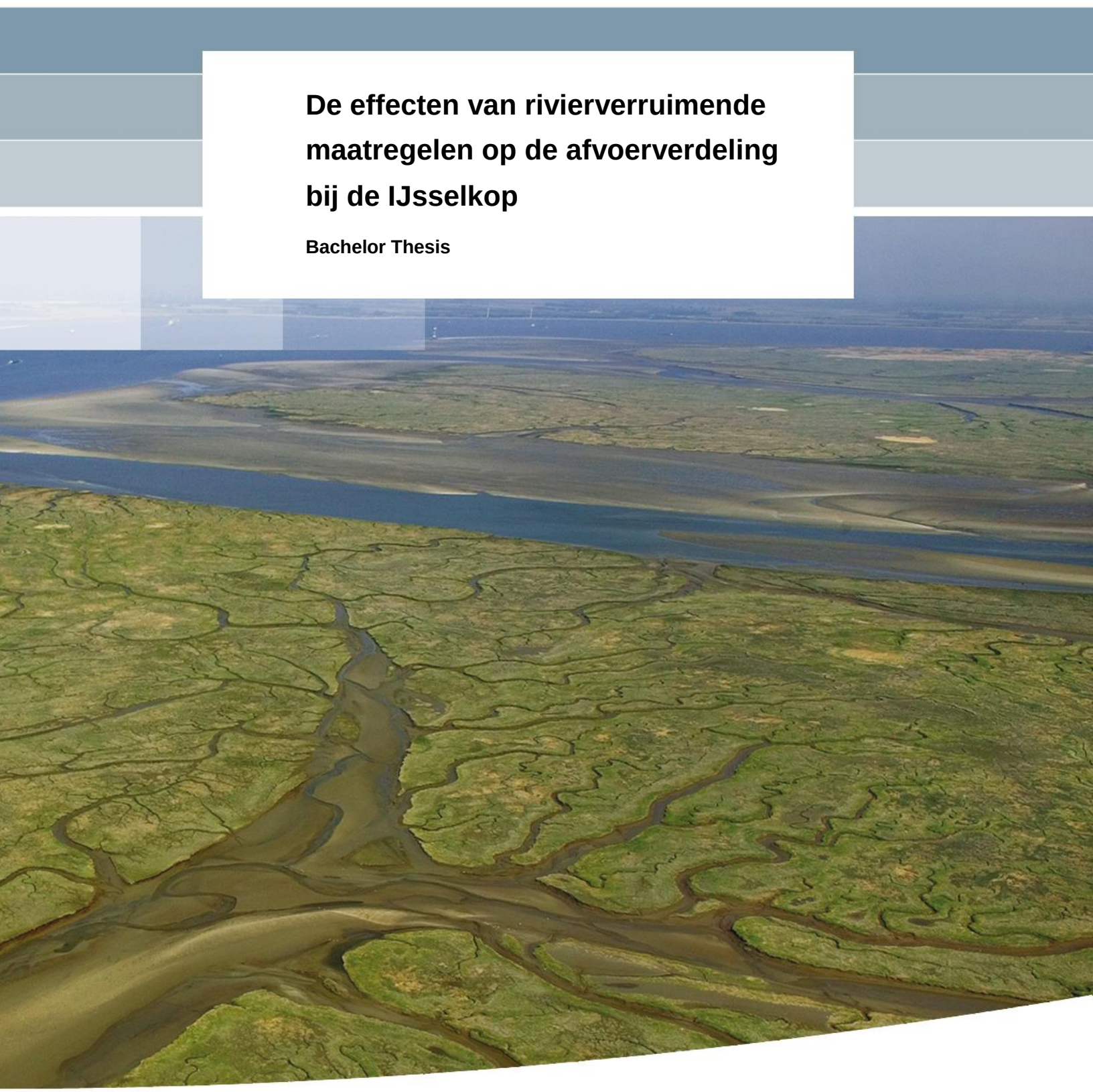


**De effecten van rivierverruimende
maatregelen op de afvoerverdeling
bij de IJsselkop**

Bachelor Thesis



De effecten van rivierverruimende maatregelen op de afvoerverdeling bij de IJsselkop

Bachelor Thesis
Universiteit Twente

Maarten Overduin
s1500988
maarten.overduin@deltares.nl
m.j.overduin@student.utwente.nl

Begeleider Deltares

Drs. Otto Levelt
Otto.Levelt@deltares.nl

Begeleider Universiteit Twente

Dr. Ralph Schielen
ralph.schielen@rws.nl

Tweede beoordelaar

Drs. Wilma Bobbink
m.l.bobbink@utwente.nl

1230044-000

© Deltares, 2016, B

Titel

De effecten van rivierverruimende maatregelen op de afvoerverdeling bij de IJsselkop

Opdrachtgever
Rijkswaterstaat

Project
1230044-000

Kenmerk
1230044-000-ZWS-0018

Pagina's
61

Trefwoorden

Afvoerverdeling, rivierverruiming, maatregelen, middenafvoeren, splitsingspunt, waterstandsdaling, regelwerk, Hondsbroeksche Pleij, IJsselkop, Klimaatpark IJsselpoort, Stadsblokken-Meinerswijk, Voorkeursstrategie, Deltaprogramma

Samenvatting

De Voorkeursstrategie IJssel binnen het Deltaprogramma bevat een grootschalige rivierverruimende maatregel aan het begin van de IJssel: Klimaatpark IJsselpoort. Deze maatregel heeft ingrijpende gevolgen op de waterhuishouding in het splitsingspuntengebied. Zowel het regelbereik van het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij als de afvoerverdeling bij de IJsselkop worden bij middenafvoeren negatief beïnvloed. In dit rapport wordt het onderzoek naar maatregelen die deze negatieve effecten kunnen tegengaan beschreven. Dit onderzoek bestaat uit vier onderdelen.

Allereerst worden de effecten van Klimaatpark IJsselpoort op het regelbereik van het genoemde regelwerk en op de afvoerverdeling bij middenafvoeren geanalyseerd. De conclusie van dit onderdeel is dat de effecten fors zijn. Het regelwerk wordt volledig gesloten in de situatie met Klimaatpark IJsselpoort. Daarnaast verschillen de afvoerverdelingen bij middenafvoeren met enkele procenten. Dit zijn grote effecten die niet wenselijk zijn.

Ten tweede wordt gezocht naar een geschikte locatie in de Nederrijn om een extra rivierverruimende maatregel, die de genoemde effecten kan verminderen of tenietdoen, uit te voeren. Deze locatie is gevonden in het uiterwaardengebied Stadsblokken-Meinerswijk. Dit uiterwaardengebied biedt veel mogelijkheden om rivierverruimende maatregelen uit te voeren. Na uitvoering van verschillende maatregelen binnen dit gebied wordt een maximale waterstandsdaling van ruim zeventien centimeter bereikt.

Het derde onderdeel bestaat uit het analyseren van de effecten van deze extra maatregel op het regelbereik van het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij. Het regelbereik neemt met 33 cm toe wanneer de genoemde waterstandsdaling wordt bereikt. Daarnaast worden in het laatste onderdeel de effecten van de extra maatregel op de afvoerverdeling bij middenafvoeren geanalyseerd. De afvoerverdelingen bij middenafvoeren verbeteren met een aantal promille bij de genoemde waterstandsdaling. Voor zowel het regelbereik als de afvoerverdeling bij middenafvoeren geldt dat de referentievariant niet benaderd wordt, maar dat de negatieve effecten van Klimaatpark IJsselpoort in zekere mate worden afgezwakt.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0.2	jun. 2016	Maarten Overduin					
1.0	jun. 2016	Maarten Overduin					

Status
definitief

Voorwoord

Voor u ligt het resultaat van de Bachelor Eindopdracht, onderdeel van de Bachelor Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. De eindopdracht is uitgevoerd bij Deltares en bestond uit het onderzoeken van de effecten van rivierverruimende maatregelen op de afvoerverdeling bij de IJsselkop. Het rapport geeft inzicht in de achtergrond van het project, de onderzoeksmethodes die zijn gebruikt en de onderzoeksresultaten. Gebaseerd op deze resultaten zijn enkele conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan die verdere onderzoeken en toekomstige beleidsbeslissingen kunnen ondersteunen en onderbouwen.

Via deze weg wil ik iedereen bedanken die deel heeft uitgemaakt van of mij heeft ondersteund tijdens de uitvoering van het onderzoek en het schrijven van dit rapport. In het bijzonder zijn dit Otto Levelt, mijn begeleider bij Deltares, en Ralph Schielen, mijn begeleider op de Universiteit Twente. Beiden hebben ze bijgedragen aan een vlotte uitvoering van het onderzoek. Tevens hebben zij input voor de verslaglegging en nuttige feedback op tussenrapporten gegeven. Daarnaast wil ik Remi van der Wijk, collega bij Deltares, bedanken voor de begeleiding wat betreft de software en modellen. Als laatste wil ik alle collega's en medestagiairs bij Deltares bedanken voor de goede tijd die ik op de kantoren in zowel Delft als Utrecht heb gehad.

Delft, juni 2016
Maarten Overduin

Leeswijzer

Dit rapport bestaat uit een korte inleiding, een negental hoofdstukken en bijlagen. In hoofdstuk 1 wordt het onderzoeksproject gedefinieerd en worden de belangrijkste probleemonderdelen geanalyseerd. Hoofdstuk 2 zet de gebruikte methodes uiteen en geeft de uitgangspunten van het onderzoek weer. De hoofdstukken 3 tot en met 6 houden zich bezig met de uitwerking van de onderzoeksvragen en het analyseren van de resultaten. De hoofdstukken 7 tot en met 9 bestaan respectievelijk uit de discussie, conclusie en aanbevelingen. In deze hoofdstukken worden de resultaten kritisch geïnterpreteerd en samengevat. Bijlage A gaat in op enkele veelgebruikte termen binnen dit rapport. De overige bijlagen zijn ter ondersteuning van de hoofdstukken 1 tot en met 6. Naar deze bijlagen wordt in de tekst verwezen wanneer dit aan de orde is.

Inhoudsopgave

Samenvatting	ii
Voorwoord	iii
Leeswijzer.....	iii
Inleiding.....	1
1. Projectdefinitie.....	2
1.1. Klimaatpark IJsselpoort.....	2
1.2. Hondsbroeksche Pleij.....	3
1.3. Afvoerverdeling.....	4
2. Methodologie.....	7
2.1. Onderzoeksvragen	7
2.2. Software, modellen en data.....	8
2.3. Algemene uitgangspunten	11
3. De effecten van Klimaatpark IJsselpoort op de afvoerverdeling bij de IJsselkop.....	12
3.1. Studieanalyse	12
3.2. Resultatenanalyse	14
3.3. Conclusies	18
4. De mogelijkheden voor een extra maatregel in de Nederrijn	19
4.1. Potentieel gebied voor extra maatregelen	19
4.2. Effectiviteit maatregelen	22
5. De effecten op het regelbereik	25
5.1. Regelwerk Hondsbroeksche Pleij.....	25
5.2. Afvoerverdeling bij 17.000 m ³ /s	26
6. De effecten op middenafvoeren.....	27
6.1. Afvoerverdeling bij middenafvoeren	27
6.2. Waterstanden	27
7. Discussie.....	29
8. Conclusies	30
9. Aanbevelingen	32
Bibliografie	33
Bijlagen.....	35

Inleiding

De Nederlandse rivierdelta is een dynamisch gebied dat blijft uitbreiden op sociaaleconomisch en ruimtelijk gebied. Doordat er schoon water, vruchtbare grond en voldoende transportmogelijkheden zijn, kunnen steden blijven groeien. Dit veroorzaakt een groeiende vraag naar industrie- en woongebieden. Deze trends zorgen ervoor dat de rivier in Nederland steeds minder ruimte heeft, wat de overstromingskansen vergroot. Daarnaast zal het klimaat naar verwachting veranderen. Voor de Rijntakken is de verwachting dat hierdoor de maximale afvoer zal toenemen van 16.000 m³/s tot 18.000 m³/s in 2100 (Herik, 2013). Hoewel dit ver weg en onzeker klinkt, is het zeer belangrijk dat hierop tijdig wordt geanticipeerd. Het Deltaprogramma Rivieren is gestart om hier invulling aan te geven. Dit programma streeft naar een duurzame en lange termijn aanpak van overstromingsbeheersing en watermanagement in Nederland (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2009).

De Voorkeursstrategie (VKS) voor het rivierengebied is onderdeel van dit Deltaprogramma en is per regio ontwikkeld door onder meer provincies, waterschappen, gemeenten en Rijkswaterstaat. De strategie bestaat onder andere uit het onderhouden en behouden van de dijken, het creëren van ruimte voor de rivieren om hiermee te anticiperen op klimaatveranderingen, die zeer waarschijnlijk hogere rivierafvoeren zullen veroorzaken (Botterhuis & Stijnen, 2015). Aan de hand van deze strategie geeft de VKS een voorzet van maatregelen. Klimaatpark IJsselpoort is één van deze maatregelen uit de VKS voor de IJssel¹ (Provincies Overijssel en Gelderland, 2014).

Royal HaskoningDHV is door Deltares en het ministerie van Infrastructuur en Milieu gevraagd om een aantal verschillende combinaties van VKS-maatregelen, in de situatie van 2050, te analyseren. De effecten van deze combinaties, waaronder Klimaatpark IJsselpoort, op de afvoerverdeling bij de splitsingspunten van de Rijn zijn onderzocht. Een conclusie van deze studie was dat het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij voldoende ruimte biedt om bij aanleg van Klimaatpark IJsselpoort de beleidsmatige afvoerverdeling over de IJssel en Nederrijn bij de IJsselkop te behouden (Driessen & Waart, 2016). Echter, hierbij wordt het limiet van het regelwerk bereikt en blijft er onvoldoende controleruimte over. Er wordt feitelijk een soort stuw gecreëerd waarmee de controlefunctie van het regelwerk verdwijnt. Daarnaast geeft het rapport enkele conclusies over de waterhoogtes bij andere afvoeren dan de beleidsmatige afvoer. Het blijkt dat als gevolg van rivierverruimende maatregelen er bij middenafvoeren² incorrecte afvoerverdelingen optreden (Driessen & Waart, 2016).

Deze problematiek rondom het Klimaatpark IJsselpoort en het regelwerk Hondsbroeksche Pleij vormt de aanleiding tot dit onderzoek, in opdracht van Deltares en Rijkswaterstaat. Het doel van dit onderzoek is uit te zoeken of genoemde effecten op zowel de ontwerpafvoer van 17.000 m³/s van de Rijn bij Lobith in 2050 als andere middenafvoeren kunnen worden verkleind of uitgeschakeld door het toevoegen van extra rivierverruimende maatregelen in de Nederrijn die nog niet zijn opgenomen in het Deltaprogramma. De verwachting is dat deze extra maatregelen voor de Nederrijn een vergelijkbaar effect zullen hebben als het effect van Klimaatpark IJsselpoort voor de IJssel, namelijk dat er meer water over de Nederrijn afgevoerd zal worden, waardoor het systeem zich stabiliseert.

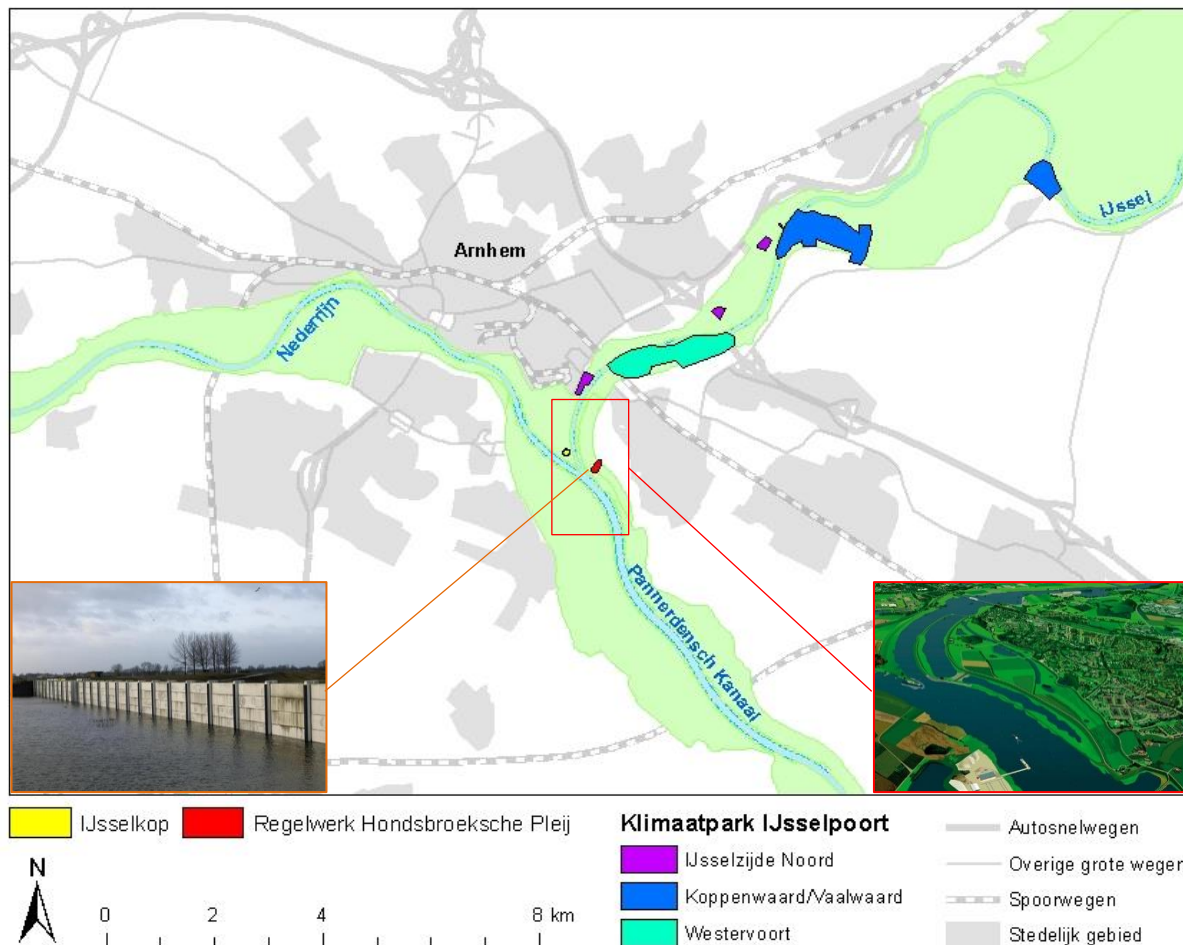
¹ De VKS is een advies en is daarmee niet definitief. Deze studie houdt zich bezig met het diepgaander onderzoeken van in de VKS voorgestelde maatregelen.

² Onder middenafvoeren worden alle afvoeren vanaf 6000 m³/s en onder 17000 m³/s bij Lobith verstaan

1. Projectdefinitie

In dit hoofdstuk worden de onderdelen van het probleem geanalyseerd. De probleemcontext wordt gevormd door Klimaatpark IJsselpoort en het regelwerk Hondsbroeksche Pleij. Verder heeft de geschiedenis van en het beleid rondom de afvoerverdeling een grote invloed op de behandeling en eventuele oplossingen van dit probleem. In figuur 1-1 is een overzichtskaart weergegeven van alle voor dit onderzoek belangrijke gebieden, waaronder het Klimaatpark en het regelwerk.

Overzichtskaart



Figuur 1-1: Overzichtskaart + impressie splitsingspunt en regelwerk (zie voor impressie Klimaatpark bijlage B, bron impressies: Beeldbank Rijkswaterstaat)

1.1. Klimaatpark IJsselpoort

Rivierklimaatpark IJsselpoort is van oorsprong een initiatief van Natuurmonumenten en Staatsbosbeheer (Voorsluijs, 2013). Deze partijen hebben met de gemeenten Arnhem, Rheden, Westervoort en Zevenaar en de provincie Gelderland samengewerkt om een ontwikkelingsvisie te ontwikkelen. Het resultaat hiervan is te zien in figuur 1-1 en in detail in figuur B-1 (zie bijlage B). De belangrijkste invalshoek wat betreft het ontwerp van het park is klimaatadaptatie¹. Het doel is door middel van een ruimtelijke koers mee te groeien in het tempo waarmee de klimaatverandering zich ontwikkelt. Het park probeert allerlei thema's samen te voegen, zowel op het gebied van

¹ Klimaatadaptatie betekent in deze context: aanpassing aan klimaatverandering

waterveiligheid als op recreatief en economisch vlak. Daarbij worden reeds lopende initiatieven meegenomen (Voorsluijs, 2013). Klimaatpark IJsselpoort is een combinatie van een aantal verschillende maatregelen (zie ook Bestuurlijk Platform Rijn, 2015):

- Velperwaarden: maaiveldverlaging, aanpassing vegetatie, kadeverlaging
- Westervoort Noord: obstakelverwijdering, maaiveldverlaging, hoogwatergeul
- Koppenwaard: ontwerpen van groene rivier, verwijderen van obstakels en verlagen van bodem
- Hondsbroeksche Pleij: zie paragraaf 1.2: Dit is een afgerond Ruimte voor de Rivier-project
- Vaalwaard / Rhederlaag: uiterwaardverlaging

In figuur 1-1 is weergegeven waar deze gebieden zich bevinden in het onderzoeksgebied.

1.2. Hondsbroeksche Pleij

Onder andere in de PKB Ruimte voor de Rivier (2002) en het Nationaal Waterplan (2009) is besloten dat, bij een toename van de maatgevende afvoer bij Lobith van 16.000 m³/s naar 18.000 m³/s in 2100, de Nederrijn-Lek wordt ontzien. Dit betekent dat het extra water dan wordt afgevoerd via de Waal en IJssel (zie ook tabel 1-1). De keuze om de Nederrijn-Lek te ontzien is gebaseerd op de fysieke beperkingen van de Lek, omdat dijken versterken of ruimte voor de rivier maken hier bijna onmogelijk is (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2009). Een voorbeeld van een verschijnsel waar de beslissing om de Nederrijn-Lek te ontzien op is gebaseerd, is lintbebouwing op de dijken. Het is hierdoor erg duur en soms bijna onmogelijk om de dijken te versterken. Door het verlagen van de ontwerpwaterhoogtes op de Nederrijn-Lek is er minder noodzaak om de dijken van de rivier te versterken. Tegelijkertijd hebben de Waal en de IJssel door deze beslissing te maken met een toename in afvoer en daarmee een grotere uitdaging wat betreft rivierverruiming en dijkversterking.

Deze beslissing is de oorzaak van het bouwen respectievelijk vernieuwen van de regelwerken Hondsbroeksche Pleij en Pannerdensche Overlaat (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2014). Figuur C-1 (zie bijlage C) geeft een schematisering van de activiteiten rondom het Ruimte voor de Rivier-project 'Hondsbroeksche Pleij'.

Het regelwerk bestaat uit een betonnen constructie met schotten die functioneert als een kraan die open en dicht gedraaid kan worden (zie impressies figuur 1-1). Wanneer er minder schotten in het regelwerk geplaatst worden, stroomt er meer water naar de IJssel door de nieuwe hoogwatergeul. Het regelbereik van de drempel van het Regelwerk Hondsbroeksche Pleij is gelimiteerd tussen 11,00 m+NAP en 15,20 m+NAP (Driessen & Waart, 2016).

Volgens het bedieningsprotocol van het regelwerk zijn er enkele functies of functie-eisen van het regelwerk te onderscheiden (Havinga, 2009). Hieronder vallen het corrigeren van de afvoerverdeling en het beïnvloeden van de afvoer. Deze genoemde functies zijn verreweg het belangrijkste voor dit onderzoek. Daarom zullen deze twee functies uitgebreider worden toegelicht.

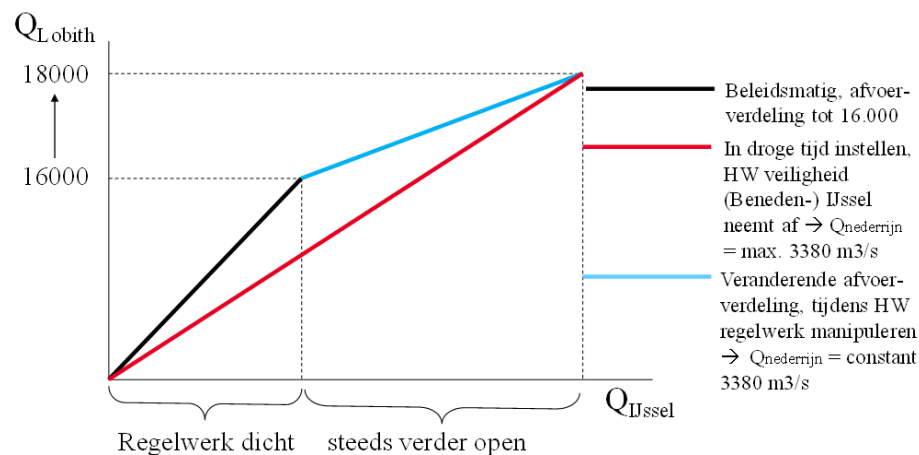
Corrigeren van de afvoerverdeling

Een belangrijke functie van het regelwerk is het kunnen corrigeren van de afvoerverdeling. Dit is nodig om effecten van Ruimte voor de Rivier projecten of andere ingrepen in het rivierengebied te kunnen neutraliseren. Een aantal jaren geleden was dit vooral aan de orde door rivierverruimende ingrepen in de bovenloop van de Nederrijn. Deze zorgen voor waterstandsverlaging, waardoor de Nederrijn meer water krijgt. Door middel van het openen van het regelwerk, krijgt de IJssel ook meer water (Havinga,

2009). Vanzelfsprekend is het regelwerk ook bedoeld om de effecten van toekomstige maatregelen, waar het in dit onderzoek om draait, te neutraliseren.

Beïnvloeden van de afvoer

Zoals genoemd is besloten om vanaf 16.000 m³/s bij Lobith de Nederrijn te ontzien. Om dit te sturen en correct te regelen is het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij gebouwd. Wat betreft het bedienen van het regelwerk zijn er twee verschillende opties overwogen. De eerste optie was het ontzien van de Nederrijn-Lek vanaf een afvoer van 16.000 m³/s en daaronder de afvoerverdeling hetzelfde te houden. Hierdoor moet het regelwerk tijdens topafvoeren ingesteld worden (bij 16.000 m³/s en hoger, zie zwarte en blauwe lijn in figuur 1-2). De tweede optie is de gebruikelijke afvoerverdeling tot aan 16.000 m³/s loslaten. Dit heeft als effect dat de afvoerverdeling tot aan 18.000 m³/s min of meer lineair toeneemt en dus dat de afvoer van de Nederrijn lineair oploopt tot aan de ontwerpafvoer van 3380 m³/s in plaats van gelijk blijft tussen 16.000 m³/s en 18.000 m³/s bij Lobith. Het voordeel hierbij is dat het regelwerk tijdens



laagwaterperioden kan worden ingesteld (Havinga, 2009).

Uiteindelijk is besloten dat de Nederrijn-Lek pas vanaf 16.000 m³/s wordt ontzien. Hiermee valt optie twee af (de rode lijn in de grafiek).

Figuur 1-2: Illustratie opties bediening regelwerk. Gebaseerd op Havinga, 2009.

1.3. Afvoerverdeling

Vanuit de geschiedenis is de afvoerverdeling op een natuurlijke manier bepaald door de geografie. Dit is een proces van enkele eeuwen geweest. Begin 16^e eeuw splitste de Bovenrijn al bij Lobith, in de Waal en de Nederrijn. In die tijd voerden de Nederrijn en de IJssel een groot deel van de totale Rijnafoer af, waardoor de IJssel goed bevaarbaar was en de 'Hanzesteden' langs de IJssel daarvan profiteerden. In de loop van de tijd ging de Waal steeds meer afvoeren, waardoor de Nederrijn en de IJssel steeds minder afvoerden. Dit verschijnsel werd steeds erger, zelfs zo dat de Waal in de 17^e eeuw 90% van het totale Rijnwater afvoerde. Hierdoor ontstonden overstromingen bij de Waal en verdroging bij de Nederrijn en de IJssel. Vooral vanwege de handelsbelangen is in de 18^e eeuw het Pannerdensch Kanaal gegraven om deze verschijnselen tegen te gaan (Brinke, 2004).

Omdat de Nederrijn door het graven van dit kanaal halverwege de 18^e eeuw te veel water afvoerde, zijn er aanvullende maatregelen doorgevoerd waarna bij een groot bereik van afvoeren een stabiele afvoerverdeling werd bereikt. Deze verdeling is sindsdien gehandhaafd en bepaalt in grote mate de waterhuishouding van Nederland. Hieronder vallen drinkwater, irrigatie en tegengaan van verzilting, overstromingsbeheersing en bevaarbaarheid. Het is daarom van groot belang dat de afvoerverdeling geen ongewenste veranderingen ondergaat (Brinke, 2004).

Toen de Nederlandse delta in steeds grotere mate bevolkt werd groeide de vraag naar wegen, woongebieden en industrieterreinen. Deze trends zijn de oorzaak van het feit dat de Nederlandse rivier steeds minder plek heeft gekregen in de afgelopen decennia, wat de kansen op een overstroming doet toenemen. Dit verschijnsel vroeg om ingrijpen van de overheid om de Nederlandse delta leefbaar en veilig te houden. De twee periodes van extreme afvoeren in 1993 en 1995 waren de aanleiding voor het verhogen van de ontwerpafvoer naar 16.000 m³/s (Schielen, Jesse, & Bolwidth, 2007). Door de hoge afvoeren in deze jaren bleken de herhalingstijden van ontwerpafvoeren groter dan gedacht, waardoor er maatregelen nodig waren.

In 2007 liet een studie van Rijkswaterstaat zien dat deze maatregelen, indien uitgevoerd nabij de splitsingspunten, zouden kunnen zorgen voor het verschijnsel dat het water anders wordt verdeeld over de riviertakken (Rijkswaterstaat, 2007). Een relatief hogere afvoer op een bepaalde riviertak resulteert in hogere waterstanden, wat niet acceptabel geacht wordt. Tijdens frequente afvoeren kan een verkeerde verdeling tevens leiden tot overlast of schade aan andere functies en eigendommen van particulieren. Daarnaast kan een verkeerde verdeling leiden tot overlast in de gebieden waar naast de afvoer, ook zeewaterstand, windrichting en windsterkte invloed hebben op het overstromingsrisico (Brinke, 2013).

Rijkswaterstaat heeft naar aanleiding van deze gegevens besloten dat de beleidsmatige afvoerverdeling op de Pannerdensche Kop en IJsselkop moet worden gehandhaafd. Alle toekomstige ingrepen moeten worden beoordeeld op hun impact op de afvoerverdeling (Rijkswaterstaat, 2007). In de onderstaande tabel is de beleidsmatige afvoerverdeling gegeven.

Tabel 1-1: Afvoerverdeling over de verschillende Rijntakken (Rijkswaterstaat, 2007)

Riviertak	Afvoer in 2015 (m ³ /s)	Afvoer in 2050 (m ³ /s)	Afvoer in 2100 (m ³ /s)
Bovenrijn (Lobith)	16000	17000	18000
Waal	10165	10970	11758
Nederrijn-Lek	3380	3380	3380
IJssel	2461	2656	2868

De reden dat niet alleen de ontwerpafvoer, maar ook middenafvoeren worden beschouwd is uitgelegd door Schielen, Bomers & Kroekenstoel (2014). Hoe dichterbij de rivier bij de zee komt, hoe belangrijker de invloed van wind en zeespiegelniveau wordt en hoe minder belangrijk de afvoergrootte wordt voor de bepaling van de ontwerphoogtes van dijken. Dit is de voornaamste reden waarom het zo belangrijk is om niet alleen de ontwerpafvoer te onderzoeken. Samen met een bepaalde wind en een hoog zeeniveau kunnen ook middenafvoeren risicovol zijn. Een andere reden is het effect van een wijziging van de afvoerverdeling op de instroomfrequenties van bepaalde gebieden. Een voorbeeld van een afspraak die hierover is gemaakt is bij Cortenoever en Voorsterklei. Dit project bestond uit dijkverleggingen waardoor er nieuwe buitendijkse gebieden ontstonden die gemiddeld met een kans van 1/25 per jaar zullen instromen (Cuperus, 2013). Dit is overeengekomen met de bewoners en agrariërs in het gebied. Voor alle partijen is het van belang, ter voorkoming van schade, overlast en onnodige evacuatie, dat deze frequentie niet hoger wordt dan nu overeengekomen. De ontwerphoogte van de kades is op deze frequentie gebaseerd. Ook bij deze afspraak werd benadrukt dat veranderingen

elders in het riviersysteem als gevolg zouden kunnen hebben dat de instroomfrequentie wijzigt (Cuperus, 2013). Daarom is zeer van belang dat de effecten van een eventuele wijziging in de verdeling van de afvoer getoetst en kritisch geanalyseerd wordt.

Tevens kan een scheve verdeling risicovol zijn voor het bezwijken van dijken door piping. Piping is een dijkfaalmechanisme, hierbij stroomt er water onder de dijk door waardoor de dijk wordt ondermijnd. Door de scheve verdeling stroomt er door de ene rivier constant veel meer water dan gebruikelijk, waardoor de kans op piping toeneemt. Dit verschijnsel is niet nader onderzocht in deze studie.

In het kader van de Hydraulische Randvoorwaarden 2001 is geconstateerd dat de afvoerverdeling in 2015 niet conform de beleidsmatige verdeling zal zijn (Rijkswaterstaat, 2007). De Planologische Kernbeslissing Ruimte voor de Rivier (PKB RvdR) is mede gestart om voor een oplossing voor dit probleem te zorgen. Dit is gebeurd door het bedenken van een uitgebalanceerde combinatie van maatregelen. Projecten van het PKB-maatregelenproject, inclusief een aantal lopende projecten, hebben een balancerend effect op de afvoerverdeling, waardoor in 2015 de verdeling weer goed zou moeten zijn (Rijkswaterstaat, 2007).

Deze oplossing werd ook gesuggereerd door Schielen, Jesse & Bolwidth (2007). Zij suggereerden twee dingen: Ten eerste werd geadviseerd om twee maatregelen op hetzelfde moment uit te voeren, zodat de effecten in balans zijn. Ten tweede werd er een oplossing met een overlaat gesuggereerd. Dit zou er voor kunnen zorgen dat de Nederrijn nooit meer afvoer te verwerken zou krijgen dan de rivier aankan. Een vergelijkbare oplossing is enkele jaren geleden geïmplementeerd, namelijk met de aanleg van het regelwerk Hondsbroeksche Pleij.

In 2014 is, naar aanleiding van de vraag of een andere afvoerverdeling wellicht economisch aantrekkelijker zou zijn, opnieuw overwogen om de afvoerverdeling over de Rijntakken te wijzigen (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2014). Het onderzoeksbureau Stratelligence heeft daarop een quick scan naar de kosteneffectiviteit van eventuele wijzigingen in de afvoerverdeling uitgevoerd. Dit betreft niet alleen de piekafvoeren, maar ook lage en (middel)hoge afvoeren. Eén van de conclusies van de quick scan was dat de wijziging van de afvoerverdeling bij lage afvoeren niet kosteneffectief is, vanwege de noodzakelijke aanleg van extra regelwerken. Daarnaast zijn er voor de (middel)hoge afvoeren nog teveel onzekerheid en te weinig gegevens beschikbaar om hier gegronde uitspraken over te doen.

De afvoerverdeling bij piekafvoeren wijzigen kan op twee manieren. De eerste, inmiddels definitief afgefallen, optie is om het gehele extra debiet vanaf 2050 te gaan afvoeren over de IJssel en daarmee de Nederrijn/Lek en de Waal te ontzien. De IJsselafoer zou hierdoor bijna verdubbelen, wat ingrijpende gevolgen heeft voor dijken, uiterwaarden en steden langs deze rivier. De tweede optie is om al het extra water af te voeren over de Waal. Dit is een minder ingrijpende optie, maar ook hier is een extra regelwerk nodig om dit correct te kunnen sturen (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2014). De optie om bij piekafvoeren al het extra debiet via de Waal af te voeren werd wel als kosteneffectief aangemerkt in de quick scan. In 2017 moet er een definitief besluit worden genomen of er, naast de beslissing om de Nederrijn/Lek te ontzien, verdere aanpassingen aan de afvoerverdeling nodig zijn. Daartoe wordt aanvullend onderzoek uitgevoerd om het nut, de noodzaak en de gevolgen te onderzoeken van het handhaven of wijzigen van de afvoerverdeling na 2050.

2. Methodologie

Het doel van dit onderzoek is uit te vinden of de effecten op zowel het regelbereik van het regelwerk Hondsbroeksche Pleij bij de ontwerpafvoer van 17.000 m³/s van de Rijn bij Lobith als de afvoerverdeling bij middenafvoeren kunnen worden verminderd of tenietgedaan door het toevoegen van extra rivierverruimende maatregelen in de Nederrijn die nog niet zijn opgenomen in het Deltaprogramma. Het doel hiervan is om de afvoerverdeling te behouden conform het beleid en daarbij extra regelbereik te creëren in het regelwerk Hondsbroeksche Pleij.

2.1. Onderzoeksvragen

Om invulling aan het doel te geven is de volgende hoofdvraag geformuleerd:

Wat zijn locaties voor extra maatregelen en wat zijn de effecten van deze maatregelen op het regelbereik van het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij bij een afvoer van 17.000 m³/s en op middenafvoeren?

Om een antwoord op deze vraag te verkrijgen zullen er eerst enkele deelvragen worden gesteld. Deze deelvragen zijn bedoeld om de hoofdvraag in verschillende onderdelen te splitsen, om zo alle componenten van het probleem te begrijpen en te analyseren. De deelvragen zijn als volgt:

1. *Wat zijn de effecten van Klimaatpark IJsselpoort op de afvoerverdeling bij de IJsselkop?*
2. *Wat zijn de mogelijkheden voor extra maatregelen in de Nederrijn?*
3. *Wat zijn de effecten van deze maatregelen op het regelbereik van het regelwerk bij een afvoer van 17.000 m³/s bij Lobith?*
4. *Wat zijn de effecten van deze maatregelen op de middenafvoeren?*

De eerste vraag is bedoeld om een goed beeld te vormen van de effecten die geneutraliseerd moeten worden. Deze vraag wordt voornamelijk beantwoord door de voor dit onderzoek relevante resultaten uit het rapport van Driessen & Waart (2016) van Royal HaskoningDHV te analyseren.

Met het beantwoorden van de tweede vraag zal gezocht worden naar een geschikt gebied en geschikte maatregelen die in staat zijn de gewenste effecten te behalen. Deze vraag wordt beantwoord door onder andere literatuur- en modelonderzoek om geschikte locaties te vinden. Tevens zal modelleren van deze maatregelen in Baseline (zie paragraaf 2.2) een onderdeel vormen. Daarnaast zullen er enkele stationaire berekeningen (zie subparagraaf 2.2.2) worden uitgevoerd. Deze berekeningen zijn relatief snel en eenvoudig uit te voeren en geven een goede indicatie van effectiviteit. Ook kan er met een stationaire berekening een vectorveld van de stroomsnelheden gecreëerd worden waarmee knelpunten in het stroomgebied kunnen worden getraceerd. Nieuwe maatregelen kunnen erop gericht zijn deze knelpunten te verwijderen. Indien de maatregel voldoende effectief blijkt te zijn zal deze worden meegenomen naar deelvraag 3 en 4. Voldoende effect betekent in deze context dat de drempelhoogte van het regelwerk Hondsbroeksche Pleij de referentievariant benaderd en er dus voldoende regelbereik overblijft in het regelwerk.

In de derde en vierde vraag zal met deze maatregelen uitgebreider gerekend worden en zullen de gevraagde resultaten gepresenteerd worden. Deze berekeningen bestaan uit dynamische berekeningen (zie subparagraaf 2.2.2).

2.2. Software, modellen en data

In deze paragraaf worden de software en de modellen die gebruikt worden in deze software uitgelegd. Deze modellen bevatten enkele basisprincipes welke hier ook worden uitgelegd. De algemene uitgangspunten, gebruikt in deze modellen, worden beschreven in de volgende paragraaf. In tabel 2-1 is een overzicht gegeven van de belangrijkste software die gebruikt is gedurende het onderzoek.

ArcGIS is een Geo-Informatie Systeem en Baseline is een tool binnen ArcGIS die specifiek voor rivierdata is gemaakt. WAQUA is een tweedimensionaal hydraulisch simulatieprogramma. Zie bijlage D voor een uitgebreide beschrijving van deze software.

Tabel 2-1: Gebruikte software en versie

Software	Versie
ArcGIS	10.1.3035
Baseline	5.2.4
SIMONA WAQUA	2015

2.2.1. Aangeleverde varianten en maatregelen

Binnen Baseline wordt gewerkt met varianten en maatregelen. Aangezien Royal HaskoningDHV de voorgaande studie heeft uitgevoerd, zijn de varianten en maatregelen die in die studie gebruikt zijn aangeleverd aan Deltares. Binnen ArcGIS is een variant een gebiedsdekkende beschrijving van het rivierbed. Een variant is de basis voor een conversie naar modellen, zoals WAQUA. Een maatregel is een mutatie op een variant (CSO & HKV Lijn in water, 2012). In dit onderzoek is dit bijvoorbeeld een rivierverruimende maatregel. De varianten en maatregelgroepen die onderdeel zijn van Klimaatpark IJsselpoort zijn weergegeven in tabel 2-2. Vanaf nu zal de variant waarin Klimaatpark IJsselpoort is opgenomen 'variant A' worden genoemd, om eenduidig te blijven met de voorgaande studie van Royal HaskoningDHV.

Tabel 2-2: Aangeleverde varianten en maatregelen

Variant/maatregel	Beschrijving	Codenaam
Variant	Referentie	splpstud_r-v2
Variant	Referentie + Klimaatpark IJsselpoort	splpstud_A-v2
Maatregel	IJsselzijde Noord	ij_ijnoord_a3
Maatregel	Koppenwaard en Vaalwaard, gezamenlijk Rhederlaag	ij_kopwmax_a2
Maatregel	Westervoort	ij_wvoortg_a2

2.2.2. Basisprincipes modellen

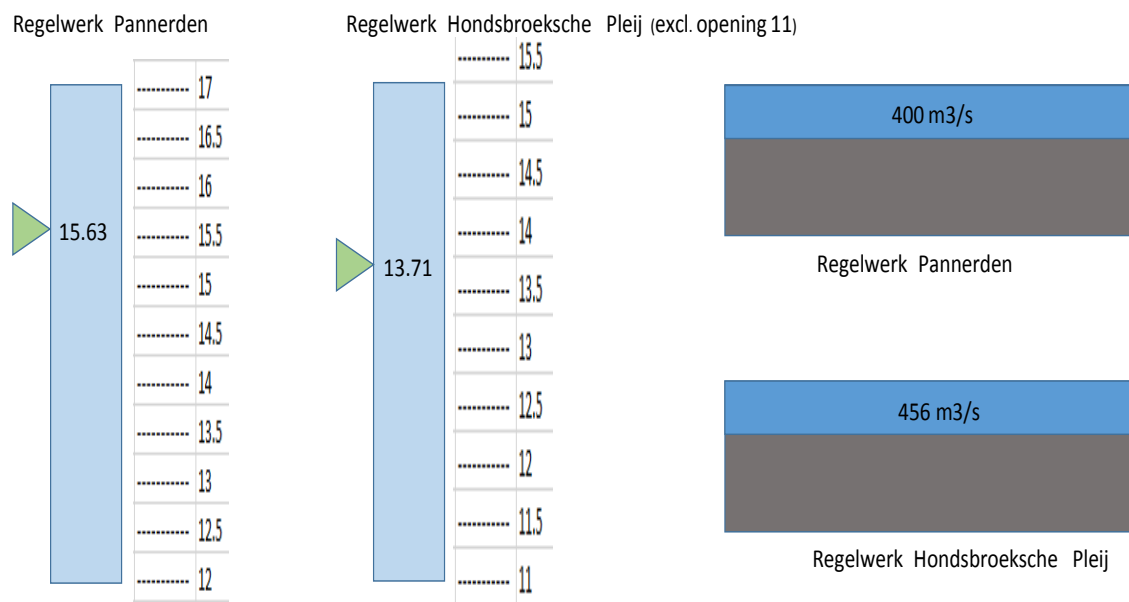
In de modellen zijn enkele principes verwerkt die de werkelijkheid op een zo goed mogelijke wijze nabootsen. WAQUA gebruikt deze principes tijdens de berekeningen. Twee van deze principes zijn de werking van de regelwerken en het gebruiken van stationaire en dynamische afvoergolven. Deze fenomenen zijn van belang voor de interpretatie van de resultaten en zullen in deze subparagraaf worden uitgelegd aan de hand van voorbeelden uit de studie.

Actieve sturing regelwerk Hondsbroeksche Pleij

Het regelwerk is zo gemodelleerd dat er actief gestuurd kan worden in de afvoerverdeling tussen de Nederrijn en de IJssel. De instellingen van het regelwerk in de referentiesituatie zijn als volgt (Driessen & Waart, 2016; Havinga, 2009):

- | | |
|---|---|
| 1. $Q_{Lobith} < 10.000 \text{ m}^3/\text{s}$ | → Vertical slot instelling |
| 2. $10.000 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{Lobith} < 16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ | → Regelwerk is geheel gesloten |
| 3. $Q_{Lobith} > 16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ | → Afvoer Nederrijn maximaal $3380 \text{ m}^3/\text{s}$ |

Het regelwerk bestaat uit een aantal 'slots'. Dit zijn openingen die gesloten kunnen worden. De vertical slot instelling van het regelwerk betekent dat de 11^e opening open blijft en alle andere openingen gesloten zijn. Instelling 3 houdt de afvoer van de Nederrijn op maximaal $3380 \text{ m}^3/\text{s}$ door middel van het gedeeltelijk openen van het regelwerk waardoor er meer water richting de IJssel afgevoerd wordt. Figuur 2-1 laat de situatie zien zoals gemodelleerd in de referentiesituatie (de situatie zoals die in 2050 verwacht wordt te zijn; zie paragraaf 2.3). Zoals in het figuur aangegeven is het regelwerk Hondsbroeksche Pleij geschematiseerd zonder opening 11. Deze is echter wel gemodelleerd in Baseline met de instellingen zoals hierboven weergegeven. In figuur 2-2 is weergegeven hoe het regelwerk zich gedraagt tijdens een dynamische afvoergolf. Om deze volledig te begrijpen wordt eerst kort de betekenis van en het verschil tussen een stationaire en een dynamische afvoergolf uitgelegd.



Figuur 2-1: Schematisering regelwerken zoals gemodelleerd, in referentiesituatie (Driessen & Waart, 2016)

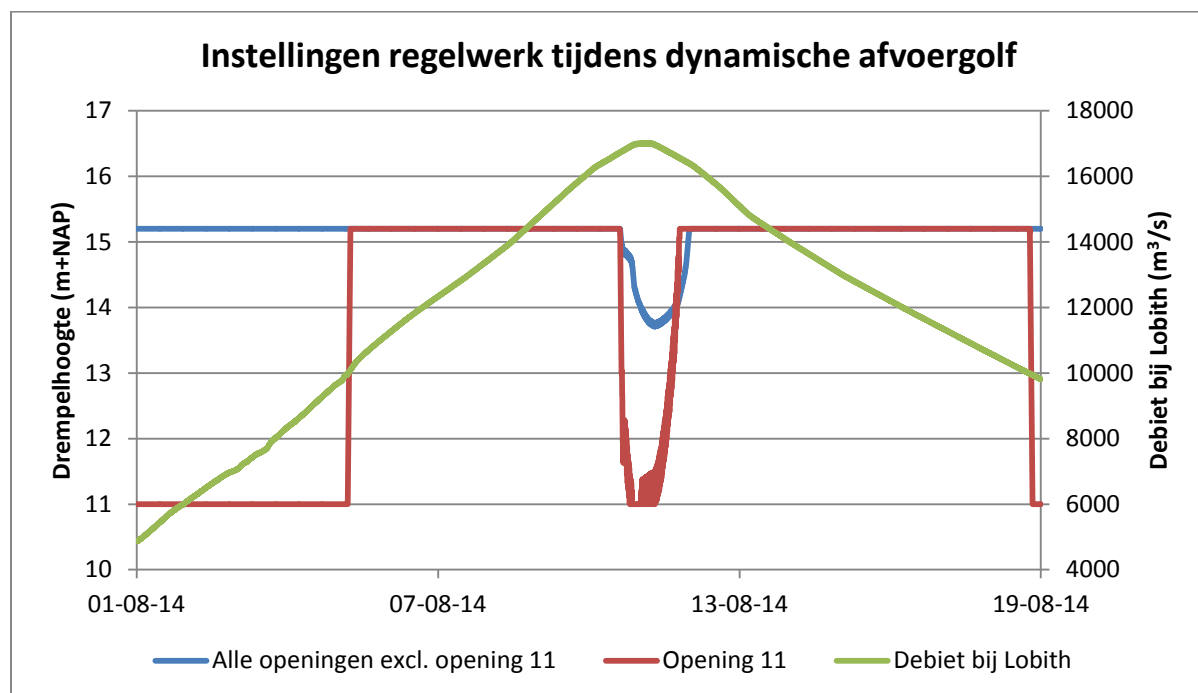
Stationaire en dynamische afvoergolf

Een stationaire afvoergolf houdt in dat er met één constante afvoer wordt gerekend. Deze rekenmethode wordt gebruikt om het regelwerk Pannerden in te stellen zodat deze goed afgesteld staan voor een correcte verdeling over de riviertakken van een afvoer van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith. De uitvoer van de berekening bestaat uit een reeks getallen, waarvan de laatste 25 worden gebruikt als representatieve waarde. Er wordt aangenomen dat het watersysteem dan gestabiliseerd is en daardoor het meest betrouwbaar wordt geacht. Deze gemiddelde waarde over de laatste 25 wordt in tabellen en grafieken aangeduid met *last25*.

Een voorbeeld van een dynamische afvoergolf is weergegeven in figuur 2-2. Het voordeel van een berekening met een dynamische afvoergolf is dat het veel dichterbij de werkelijkheid ligt dan een stationaire golf. In werkelijkheid bouwt een hoogwatergolf zich langzaam op tot aan het maximum.

Nadat het maximum is bereikt daalt de afvoer weer langzaam. Een afvoergolf van $17000 \text{ m}^3/\text{s}$ komt dus geleidelijk en niet in één keer Nederland binnen. In de berekeningen kan in dit geval vanzelfsprekend niet gerekend worden met *last25*. In plaats daarvan wordt hier gerekend met de grootste waarde, aangeduid met *max*. Ook wordt vaak gerekend met het gemiddelde over een aantal maximale waarden, bijvoorbeeld *max25* of *max13*. Deze maximale waarden kunnen soms misleidend werken bij de resultaten van de debieten door het regelwerk Hondsbroeksche Pleij. Het kan namelijk voorkomen dat er bij hoge afvoeren geen afvoer door het regelwerk is, maar wel bij lagere afvoeren als het vertical slot open gaat. Dit is tijdens de berekening de hoogste waarde, waardoor deze waarde wordt weergegeven als *max*, *max13* of *max25*. Dit lijkt dan tijdens hoogwater geweest te zijn, maar dit is niet het geval. Voor een voorbeeld van een situatie waarin dit het geval is, zie tabel H-1. Zie voor verduidelijking tevens figuur 5-2 (variant A).

De voordelen van een stationaire berekening is dat deze relatief snel uit te voeren is en er geen initiële berekening aan vooraf hoeft te gaan. Hierdoor kan er in korte tijd een goede indicatie van de waterstandsdeling verkregen worden. Tevens heeft de stationaire berekening als voordeel dat er een vectorveld van de stroomsnelheden gemaakt kan worden waarin de knelpunten van het stroomgebied zichtbaar zijn. Dit is alleen mogelijk bij een stationaire berekening aangezien hier het debietniveau constant is.



Figuur 2-2: Dynamische afvoergolf (debiet bij Lobith in m^3/s) en bijbehorende instellingen regelwerk Hondsbroeksche Pleij

In het bovenstaande figuur wordt een situatie geschetst waarin in achttien dagen een hoogwatergolf door de Nederlandse Rijntakken komt en hoe het regelwerk daarbij ingesteld wordt. In de modellen wordt gerekend met een willekeurig gekozen periode van 1 augustus tot 19 augustus 2014. Zodra de grens van $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$ bereikt wordt gaat opening 11 volledig dicht en is hiermee het gehele regelwerk gesloten. Zodra de afvoer de grens van $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ bereikt gaat opening 11 na verloop van tijd weer geheel open en worden alle andere openingen tevens deels geopend zodat er meer water richting de

IJssel stroomt en de grens van 3380 m³/s op de Nederrijn, die wordt bereikt zodra de afvoer bij Lobith 16.000 m³/s is, gehandhaafd blijft. Zodra de afvoerpiek van 17.000 m³/s voorbij is en de afvoergrootte weer daalt, wordt het regelwerk, inclusief opening 11, weer geheel gesloten. Als de grens van 10.000 m³/s weer in zicht is gaat opening 11 van het regelwerk weer geheel open.

2.3. Algemene uitgangspunten

In de modellen, beschreven in de voorgaande paragraaf, zijn enkele uitgangspunten verwerkt. Tevens bevat het onderzoek in het algemeen enkele uitgangspunten. De modeltechnische uitgangspunten zijn te vinden in bijlage E. De onderzoekstechnische uitgangspunten zijn belangrijk voor de interpretatie van de resultaten en worden hieronder opgesomd en uitgelegd.

- Alle varianten en de referentie beschrijven de situatie zoals in 2050; dat wil zeggen de huidige situatie na uitvoering van Ruimte voor de Rivier en uitvoering van de VKS-maatregelen exclusief de maatregelen in het splitsingspuntengebied (zie figuur P-9)
- Dit onderzoek beperkt zich tot de hydraulica van de rivieren. Andere aspecten, zoals morfologie, zullen geen onderdeel van dit onderzoek zijn.
- Er zullen maar enkele maatregelen worden beschouwd, terwijl er veel meer mogelijkheden op andere locaties zijn om de afvoerverdeling te herstellen, zowel met andere extra maatregelen (extra of vernieuwde regelwerken) als met het aanpassen van geplande maatregelen (verkleining maatregelen Klimaatpark IJsselpoort).
- Dit onderzoek beperkt zich tot de huidige, bestaande regelwerken en andere infrastructuur. Een andere mogelijkheid zou zijn om de huidige situatie te negeren en opnieuw te beginnen. Dat is hier niet het geval, alle infrastructuur zal meegenomen worden in de analyses.
- Op dit moment worden nieuwe concepten wat betreft regelgeving en normering uitgewerkt door de overheid. Er wordt bijvoorbeeld gewerkt aan nieuwe methode wat betreft overstromingsnormen, deze worden opnieuw vastgesteld door gebruik te maken van nieuwe technologieën en methoden. Dit onderzoek zal de bestaande regels en normen aanhouden.
- De sturing van het regelwerk Hondsbroeksche Pleij is in het model zeer nauwkeurig en wordt continu gedaan. In de praktijk zal de sturing veel minder secuur zijn, zowel in de momenten van afstelling als in de mate van bijsturing, omdat maar een (paar) keer tijdens de afvoerpiek schotten getrokken zullen worden. Tevens berekent WAQUA de drempelhoogte tot op de centimeter nauwkeurig, terwijl de schotten in het regelwerk 105 centimeter hoog zijn. Indien er uit de berekening komt dat de drempelhoogte met 30 centimeter verlaagd moet worden zullen er dus enkele schotten uitgehaald worden waarmee de gemiddelde daling op ongeveer 30 centimeter uitkomt.
- Vaak zijn er bij rivierverruiming veel beperkingen in aanpassingsmogelijkheden. Bijvoorbeeld door vervuilde grond en oude afvalstortplaatsen ondergronds en een aantal monumenten in deze gebieden is het aantal mogelijkheden zeer beperkt. Tevens krijgt elk project te maken met de verschillende stakeholders, waar absoluut rekening mee gehouden moet worden. Dit zal ook in onderzoeken naar de haalbaarheid van nieuwe maatregelen in het gebied moeten worden meegenomen. Om in de toekomst over voldoende informatie te beschikken om goede beleidsbeslissingen te nemen is het belangrijk dat wel alle opties worden doorgerekend, ook de mogelijkheden waarvan de toekomst zeer onwaarschijnlijk is. In dit onderzoek zullen de resultaten vooral worden gebruikt om een idee te krijgen in welke orde grootte een maatregel moet zijn om een rol te kunnen spelen in het corrigeren van de afvoerverdeling.

3. De effecten van Klimaatpark IJsselpoort op de afvoerverdeling bij de IJsselkop

In dit hoofdstuk volgt de beantwoording van de eerste deelvraag: *Wat zijn de effecten van Klimaatpark IJsselpoort op de afvoerverdeling bij de IJsselkop?* Nadat deze effecten in kaart zijn gebracht kunnen er passende tegenmaatregelen worden opgesteld en is er bekend welke effecten tegengegaan moeten worden.

3.1. Studieanalyse

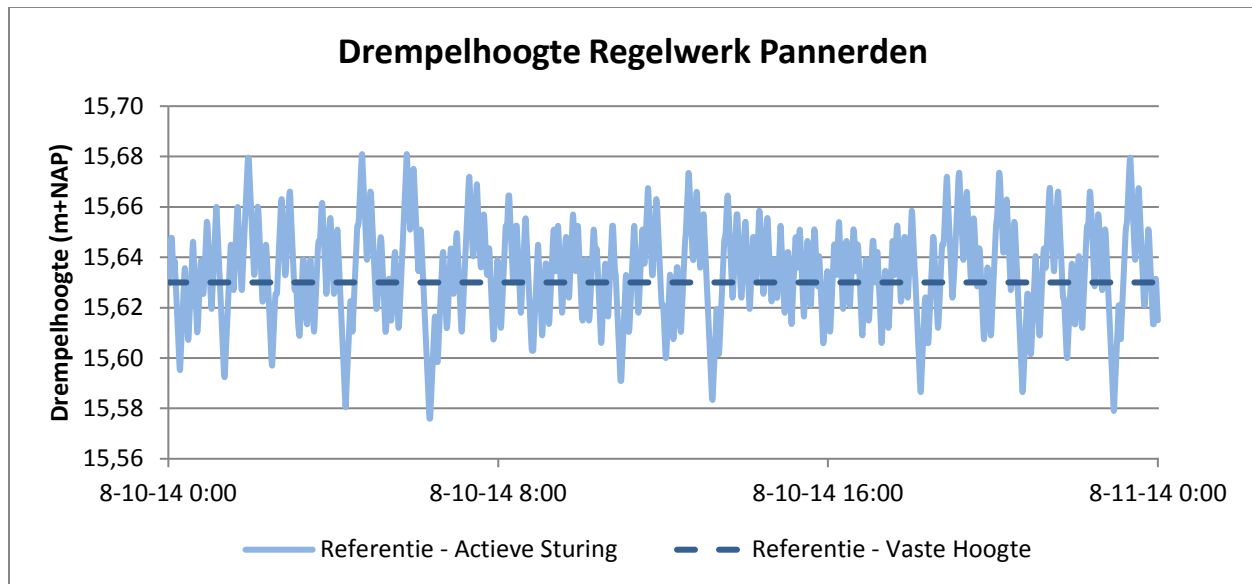
Deze paragraaf zal de studie, uitgevoerd door Driessen en Van der Waart van Royal HaskoningDHV, analyseren. Allereerst zal de studie op zich worden beschouwd, in de volgende paragraaf zullen de resultaten geanalyseerd worden. De noodzaak van de studie werd duidelijk gemaakt door Herik (2013) in een analyse betreffende de maatregelen van de VKS IJssel. Deze analyse toonde aan dat Klimaatpark IJsselpoort invloed heeft op de afvoerverdeling bij de IJsselkop.

Zoals in tabel 2-2 weergegeven bestaat Klimaatpark IJsselpoort uit drie maatregelpakketten. Deze pakketten zijn in paragraaf 1.1 beschreven. De maatregelen zijn ingemixt (Baseline-terminologie; inpassen of samenvoegen) met Baseline in de referentievariant. De referentievariant bestaat uit de huidige situatie na uitvoering van Ruimte voor de Rivier en uitvoering van de VKS-maatregelen. De referentievariant samen met de drie maatregelpakketten vormen samen variant A. Dit is niet de enige variant die doorgerekend is, zoals te zien is in tabel P-4. De resultaten van deze andere vier varianten vormen goed vergelijkingsmateriaal voor de resultatenanalyse. Hier kan onder andere uit worden opgemaakt wat het aandeel in de effecten is van het Klimaatpark IJsselpoort. Tevens zijn in bijlage P ook de resultaten van variant F te zien, die ter oefening en als test is doorgerekend voorafgaand aan deze studie. Tevens zijn deze resultaten vergeleken met de andere varianten die Royal HaskoningDHV doorgerekend heeft. Variant F bestaat uit de maatregelcombinaties Klimaatpark IJsselpoort, langsdammen en de dijkteruglegging bij Ooij.

Deze Baseline schematisaties zijn geconverteerd naar WAQUA. Zoals al deels beschreven in bijlage E is er voor alle varianten een set berekeningen uitgevoerd. Dit bestaat uit een stationaire berekening, een initiële berekening om waterstandsvelden af te leiden en 9 dynamische berekeningen, bestaande uit de ontwerpafvoer en een reeks van middenafvoeren. Zie voor een uitgebreid overzicht tabel F-1. Deze berekeningen zijn zeer nuttig om te achterhalen wat de effecten zijn op de afvoerverdeling en waterstanden, niet alleen bij ontwerpafvoer, maar ook daaronder¹.

Het Regelwerk Pannerden verdeelt de rivierafvoer tijdens hoogwater op de Rijn over de Waal en het Pannerdensch Kanaal. In 2050 is voorzien dat bij een afvoer van de Bovenrijn van 17.000 m³/s er 10.970 m³/s naar de Waal dient te stromen en 6.030 m³/s naar het Pannerdensch Kanaal. Het regelbereik van de drempel van het Regelwerk Pannerden is gelimiteerd tussen 12,00 m+NAP en 17,00 m+NAP (Ziel, 2012), zie voor schematisatie figuur 3-2. Figuur 3-1 laat zien hoe in de referentiesituatie de drempelhoogte van het regelwerk te Pannerden is bepaald. Tijdens een stationaire afvoergolf met als afvoer de ontwerpafvoer van 17.000 m³/s schommelt de drempelhoogte tussen 15,58 m+NAP en 15,68 m+NAP. Het gemiddelde is bepaald op 15,63 m+NAP. Deze waarde is gebruikt in alle dynamische

¹ Er zijn tevens berekeningen uitgevoerd voor afvoeren van 18.000 m³/s en 20.000 m³/s bij Lobith. Deze zullen slechts onderdeel zijn van de resultaten maar zullen niet worden beschouwd in dit onderzoek.



Figuur 3-1: Drempelhoogte regelwerk Pannerden in referentiesituatie (Driessen & Waart, 2016)

Tabel 3-1: Afvoerverdeling tijdens referentiesituatie bij 17000 m³/s (Driessen & Waart, 2016)

		Beleid	Stationair	Dynamisch		
			last 25	max 25	max 13	max
			Actief	Vast	Vast	Vast
	Sturing Pannerden	-	Actief	Vast	Vast	Vast
	Sturing HPleij	-	Actief	Actief	Actief	Actief
Lobith	Q-Lobith	17000	16997,0	17001,6	17004,1	17017,5
Waal	Q-Waal	10970	10971,7	10983,1	10982,8	10992,4
Pannerdensch Kanaal	Q-Pankanaal	6030	6032,2	6019,3	6019,0	6023,9
Nederrijn/Lek	Q-Nederrijn	3380	3379,7	3382,2	3386,2	3391,5
IJssel	Q-IJssel	2656	2649,7	2625,5	2649,3	2673,1
Pannerdense overlaat	Q-RW-Pannerden	-	399,6	397,6	397,5	398,4
Hondsbroekse Pleij	Q-RW-HPleij	-	456,0	430,3	450,1	471,5

berekeningen van de referentiesituatie. De referentiesituatie is doorgerekend om goed vergelijkingsmateriaal te hebben om de verschillende varianten te kunnen analyseren. In tabel 3-1 zijn deze resultaten weergegeven. Er vallen enkele zaken op in deze tabel. Allereerst zijn de berekende waarden in de referentiesituatie niet gelijk aan de beleidsmatige afvoer, zowel de stationaire als dynamische afvoergolf geeft andere waarden. Hier zijn enkele verklaringen voor. Fluctuaties in de drempelhoogtes van de regelwerken kunnen ophoping van het water veroorzaken waardoor bovenstrooms de gemeten afvoer wat hoger ligt en benedenstrooms juist wat lager. Daarnaast kunnen verschillen ook veroorzaakt worden door afwijkingen of onzekerheden in de software.

Ten tweede valt op dat op dat de afvoer van de Nederrijn/Lek samen met de afvoer van de IJssel niet gelijk is aan de afvoer van het Pannerdensch Kanaal. Tijdsafhankelijke lokale bergingseffecten kunnen

hier een verklaring voor zijn waardoor de afvoergrootte op een meetpunt fluctueert. Daarnaast speelt topvervlakking een rol. Voortaan zullen alle resultaten van afvoerberekeningen op dezelfde manier zoals in tabel 3-1 worden weergegeven. In tabel G-1 worden de afvoerverdelingen gegeven bij verschillende berekende afvoeren. Er vallen hier dezelfde zaken op als in de resultaten bij beleidsmatige afvoer, waarbij dezelfde verklaringen gelden. De resultaten in tabel 3-1 en bijlage G worden in het vervolg gebruikt als vergelijkingsmateriaal.

3.2. Resultatenanalyse

In deze paragraaf zullen de resultaten van de studie, geanalyseerd in paragraaf 3.1, worden beschouwd. Klimaatpark IJsselpoort heeft effecten op instelling van de regelwerken, de afvoerverdeling en de waterstanden. Deze effecten zullen hier worden onderzocht. De conclusies die uit de resultaten kunnen worden getrokken zullen in paragraaf 3.3 volgen.

3.2.1. Instelling regelwerken

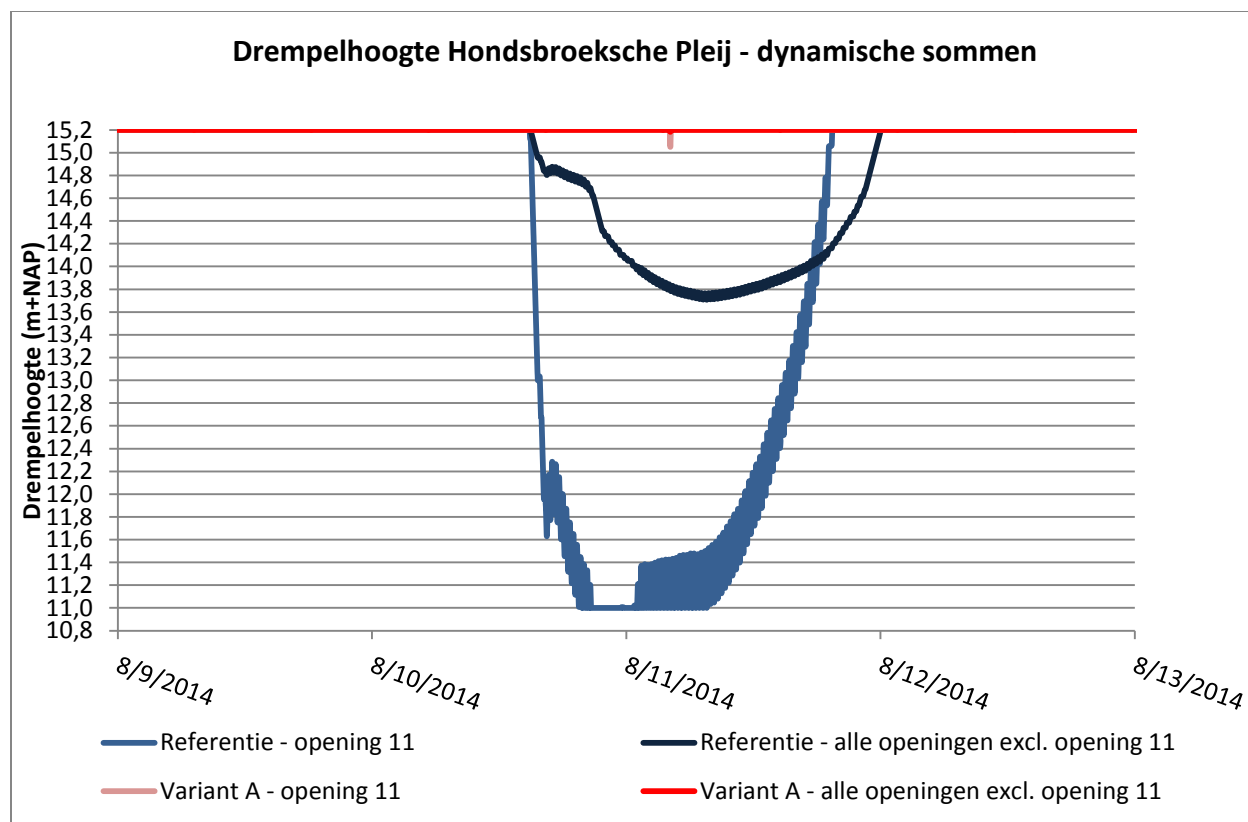
Regelwerk Hondsbroeksche Pleij

Klimaatpark IJsselpoort zorgt voor waterstandsdeling bovenstrooms van het park. Dit heeft als effect dat, zonder sturing door het regelwerk, er meer water naar de IJssel zou stromen en de afvoerverdeling scheef zou worden. Hiertoe dient het regelwerk anders ingesteld te worden. Volgens de dynamische berekeningen zou de drempelhoogte van alle openingen ongeveer 15,2 m+NAP moeten zijn, wat is gelijk aan de maximale drempelhoogte. Het regelwerk (alle openingen exclusief opening 11) gaat slechts voor vijf minuten enkele centimeters open tot 15,18 m+NAP. Opening 11 opent ook voor een paar minuten tot 15,05 m+NAP. In deze situatie is het maximum van het regelbereik bereikt, er is geen regelbereik meer over. Figuur 3-2 geeft weer hoe het regelwerk reageert bij een dynamische afvoergolf van 17.000 m³/s. Figuur 3-3 geeft een samenvattende schematisatie weer van beide regelwerken in die situatie met Klimaatpark IJsselpoort, tijdens een stationaire berekening¹.

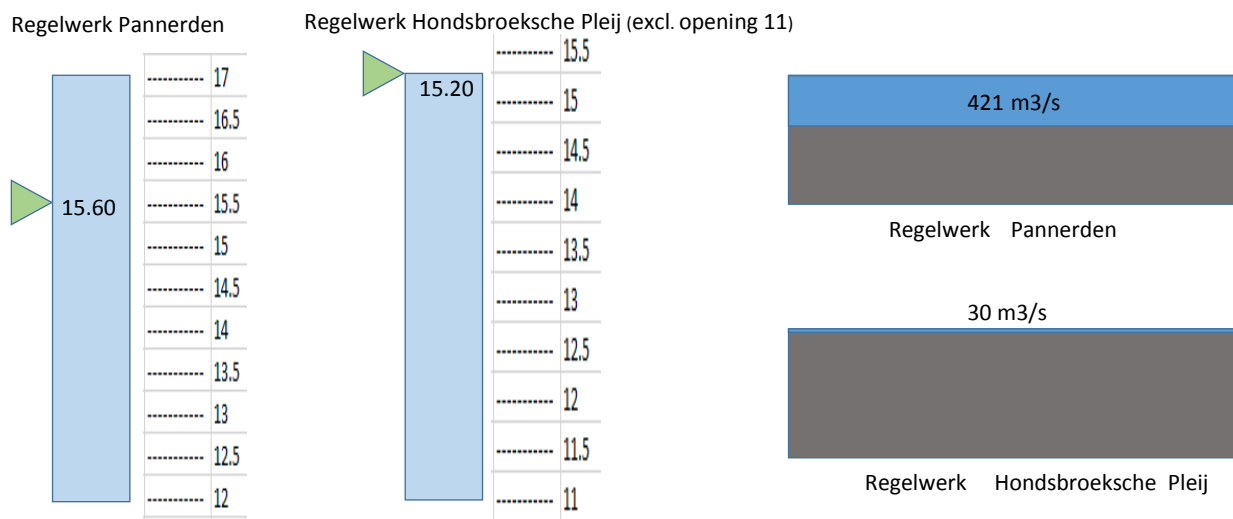
Regelwerk Pannerden

De waterstand, bij de stationaire afvoergolf, neemt op het Pannerdensch Kanaal een aantal centimeter toe ten opzichte van de referentiesituatie, als gevolg van het hogere drempelniveau van het regelwerk Hondsbroeksche Pleij. Dit heeft als gevolg dat het regelwerk bij Pannerden een aantal centimeter lager moet worden ingesteld om de juiste afvoerverdeling Waal-Pannerdensch Kanaal te behouden. Het regelwerk zou volgens de berekeningen moeten worden ingesteld op 15,60 m+NAP. Een schematisatie van beide regelwerken in de situatie met Klimaatpark IJsselpoort is gegeven in figuur 3-3.

¹ In de stationaire berekening waarvan figuur 3-3 de resultaten laat zien is een debiet van ongeveer 30 m³/s door het regelwerk te zien, omdat de beleidsmatige afvoer door de Nederrijn eerder wordt bereikt dan in de dynamische berekening. Het vertical slot is in de stationaire berekening dus deels geopend. Dit gegeven is tevens belangrijk voor de interpretatie van de tabellen die nog volgen in dit hoofdstuk.



Figuur 3-2: Drempelhoogte regelwerk Hondsbroeksche Pleij bij dynamische afvoergolf van 17.000 m³/s bij Lobith (Driessen & Waart, 2016)



Figuur 3-3: Instelling regelwerken bij situatie met Klimaatpark IJsselpoort in stationaire afvoergolf (Driessen & Waart, 2016)

3.2.2. Afvoerverdeling

Bij de instelling van de regelwerken zoals beschreven in subparagraaf 3.2.1 en de aanwezigheid van Klimaatpark IJsselpoort verandert de afvoerverdeling in kleine mate over de Rijntakken. Deze is weergegeven in tabel H-1. Tevens zijn de verschillen met de referentiesituatie weergegeven in dezelfde tabel.

Het meest opvallend uit tabel H-1 is het enorme verschil in debiet wat door het regelwerk Hondsbroeksche Pleij gaat. Dit is te verklaren door de grote toename in drempelhoogte. De kleine toename in debiet over het regelwerk bij Pannerden is te verklaren door de verlaagde drempelhoogte met enkele centimeters. Tabel H-2 laat de verschillen in afvoerverdeling bij verschillende afvoeren zien.

Wat in de tabellen H-1 en H-2 opvalt, is dat bij alle afvoergroottes de IJssel relatief veel meer debiet afvoert. Dit komt doordat de waterstandsverlaging ook al optreedt bij lage afvoeren, waardoor er in die situaties ook meer debiet naar de IJssel gaat. Het directe effect daarvan is dat de Nederrijn relatief veel minder debiet te verwerken krijgt dan in de referentiesituatie.

Tabel 3-1: Aandeel Nederrijn in afvoerverdeling IJsselpoort bij verschillende afvoergolven (in %)

	6000	8000	10000	13000	16000	16500	17000
Referentie	56,4	57,6	59,2	59,5	58,4	58,3	56,1
Variant A	54,7	53,9	54,7	56,3	56,3	56,3	56,2

Wat uit tabel 3-1 naar voren komt is een samenvatting van wat al eerder geconstateerd is: Klimaatpark IJsselpoort beïnvloedt de afvoerverdeling. Alleen bij een afvoer van 17.000 m³/s staan alle regelwerken correct afgesteld en is de referentiesituatie nagenoeg gelijk aan de situatie met Klimaatpark IJsselpoort. De beleidsmatige afvoerverdeling is 56,0% voor de Nederrijn bij 17.000 m³/s bij Lobith (tabel 1-1). Dit percentage ligt eveneens zeer dicht bij de gemodelleerde situatie met Klimaatpark IJsselpoort.

3.2.3. Waterstanden

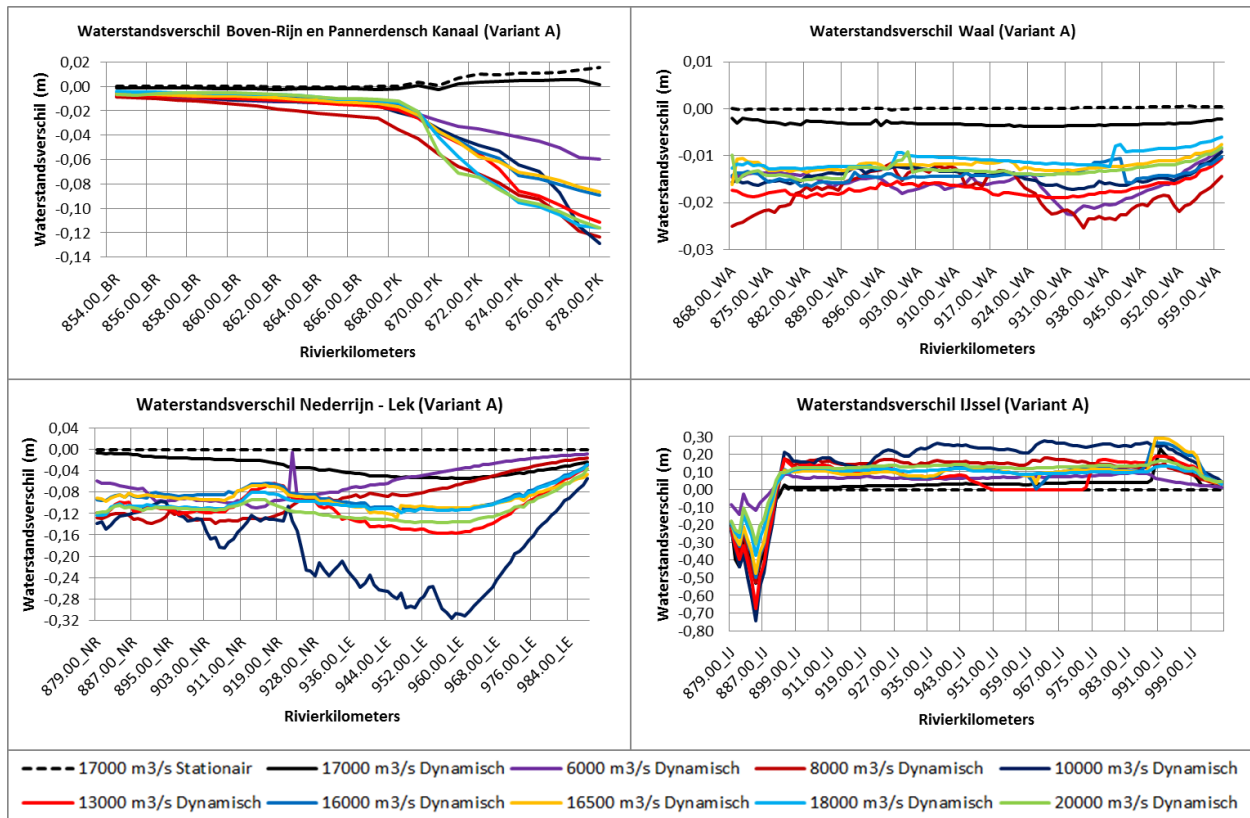
In figuur 3-4 zijn de waterstandsverschillen ten opzichte van de referentiesituatie weergegeven. In de figuren I-1 tot I-4 zijn deze groter weergegeven.

Bovenrijn en Pannerdensch Kanaal

Wat vooral opvalt bij de waterstandsverschillen op deze rivieren is dat, hoe dichterbij het splitsingspunt bij de IJsselpoort wordt genaderd, hoe beter de effecten van het Klimaatpark IJsselpoort zichtbaar worden. In de Bovenrijn zijn de effecten nog nauwelijks zichtbaar, hier is het effect op de waterstand slechts maximaal 1cm. Dichterbij de IJsselpoort worden de effecten steeds meer zichtbaar, met als maximaal effect waterstands dalingen van meer dan 10cm bij de meeste afvoeren bij het splitsingspunt. De waterstandsstijging bij de afvoergolf van 17.000 m³/s op het Pannerdensch Kanaal wordt verklaard door het hogere drempelniveau van het regelwerk, wat een kleine mate van opstuwing veroorzaakt.

Waal

Zoals hierboven aangeduid, heeft het Klimaatpark effect tot aan het splitsingspunt bij de Pannerdensche Kop. Hierdoor wordt bij alle afvoeren, behalve bij de maatgevende afvoer van 17.000 m³/s, de afvoerverdeling veranderd. Dat dit niet het geval is bij de maatgevende afvoer van 17.000 m³/s, komt



Figuur 3-4: Variant A: Waterstandsverschillen t.o.v. referentiesituatie (Driessen & Waart, 2016)

door de afstelling van het regelwerk Pannerden op dit maatgevende debiet. Bij alle andere afvoeren is het verschil in verdeling te zien door een lichte waterstandsval op de Waal van enkele centimeters.

Nederrijn/Lek

Wat op de Nederrijn/Lek opvalt, zijn de waterstandsvalingen over de gehele rivier. Deze grote waterstandsvalingen zijn het gevolg van de scheve afvoerdeling, veroorzaakt door het Klimaatpark IJsselpoort. Hierdoor krijgt de IJssel meer debiet te verwerken en de Nederrijn/Lek minder, met waterstandsvalingen tot gevolg.

IJssel

Op de IJssel zijn de grootste verschillen in waterstand te zien. Als eerste valt de grote waterstandsvaling op, als gevolg van het Klimaatpark. Deze loopt voor een korte afstand zelfs op tot 75cm bij een afvoer van 10.000 m³/s. Bij andere afvoeren ligt de waterstandsvaling tussen de 10 en 70 centimeter. Wat opvalt, is dat de daling het meest is bij afvoeren tussen 8000-10000 m³/s en dat hoe groter het debiet wordt, hoe lager de waterstandsvaling is. Bij een afvoer van 6000 m³/s is de waterstandsvaling het kleinst, dit is te verklaren door het nog niet instromen van bijvoorbeeld nevengeulen, uiterwaarden en andere delen van het winterbed die zorgen voor retentie van de afvoer. Wat verder nog opvalt, zijn de verhoogde waterstanden benedenstrooms van het Klimaatpark IJsselpoort. De oorzaak hiervan is al eerder genoemd, namelijk dat door het Klimaatpark de IJssel meer water naar zich toetrekt, wat benedenstrooms waterstandsstijgingen veroorzaakt.

3.3. Conclusies

Uit de resultaten, beschreven in paragraaf 3.2, zijn enkele conclusies te trekken. Ten eerste is het regelbereik van het regelwerk Hondsbroeksche Pleij voldoende om de afvoerverdeling op de IJsselkop in 2050 te handhaven bij een afvoer van 17.000 m³/s bij Lobith. Dit geldt ook voor het regelwerk Pannerden. Het Klimaatpark heeft vrijwel geen invloed op de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop, gezien de drempelhoogte van het regelwerk dient met slechts 3 cm versteld te worden naar 15,60 m+NAP.

Ten tweede kan er geconcludeerd worden dat het regelbereik van het regelwerk Hondsbroeksche Pleij vrijwel teniet gedaan wordt indien het regelwerk wordt ingezet om na aanleg van Klimaatpark IJsselpoort de afvoerverdeling te reguleren. Het regelwerk moet in deze situatie geheel dichtgezet worden bij een afvoergolf van 17.000 m³/s. Dit is in het kader van de controlefunctie van het regelwerk niet gewenst.

Door de waterstandsverlaging die het Klimaatpark veroorzaakt is de afvoerverdeling bij de middenafvoeren significant anders (zie tabellen 3-1 en H-2). Dit is niet op te lossen door verdere sluiting of opening van het regelwerk Hondsbroeksche Pleij, omdat deze niet bedoeld is om de afvoerverdeling bij middenafvoeren actief te regelen. Deze andere verdelingen zullen aanzienlijke effecten geven op de inundatiefrequenties van de uiterwaarden langs de Nederrijn en IJssel. Mogelijk hebben deze veranderingen ook effect op de toetsing van dijken, onder andere op piping, doordat er in bijna alle mogelijke situaties constant meer water door de IJssel stroomt dan gebruikelijk.

Samenvattend is te concluderen dat Klimaatpark IJsselpoort zorgt voor een ongewenst hoge drempelhoogte van het regelwerk Hondsbroeksche Pleij bij een afvoergolf van 17.000 m³/s, waardoor de controlefunctie van het regelwerk zo goed als teniet wordt gedaan. Daarnaast zijn de effecten op de afvoerverdeling bij middenafvoeren relatief groot, deze veranderen soms met enkele procenten ten opzichte van de referentiesituatie. Een voor de hand liggende oplossing is een vergelijkbare rivierverruimende maatregel in de andere riviertak na het splitsingspunt, de Nederrijn/Lek. Het doel hiervan is vergroting van het regelbereik van het regelwerk bij de ontwerpafvoer en tevens het corrigeren van de afvoerverdelingen bij middenafvoeren. In hoofdstuk 4 zal er naar dergelijke maatregelen gezocht worden.

4. De mogelijkheden voor een extra maatregel in de Nederrijn

Zoals in de conclusie van het vorige hoofdstuk al aangegeven zal in dit hoofdstuk worden gezocht naar mogelijkheden voor extra maatregelen die de ongewenste effecten kunnen verminderen of wegnemen. Hiermee zal de tweede deelvraag worden beantwoord: *Wat zijn de mogelijkheden voor een extra maatregel in de Nederrijn?*

In dit hoofdstuk zal eerst worden gekeken naar een gebied dat geschikt is voor de uitvoering van maatregelen die een waterstandsverlagend effect hebben. Hiermee wordt beoogd een groter debiet naar de Nederrijn te laten stromen en daarmee het regelwerk Hondsbroeksche Pleij, in de situatie met Klimaatpark IJsselpoort, te ontlasten. Hierna zullen de mogelijkheden binnen dit gebied worden geanalyseerd en zullen enkele potentiële locaties voor maatregelen binnen dit gebied worden gepresenteerd.

Daarnaast zal er per maatregel een stationaire berekening worden uitgevoerd. Dit is een relatief eenvoudig en snel uit te voeren berekening waarmee de waterstandsdaling bij een afvoer van 17.000 m³/s en de instelling van het regelwerk Hondsbroeksche Pleij geanalyseerd kunnen worden. Met deze informatie kan uiteindelijk een daadwerkelijk effectieve maatregel of een combinatie van maatregelen gekozen worden.

4.1. Potentieel gebied voor extra maatregelen

Rivierverruimende maatregelen hebben slechts over een beperkt traject bovenstrooms van de maatregelen effect op de waterstand. De te kiezen maatregelen moeten bij het splitsingspunt nog voldoende effect op de waterstand hebben om effect te hebben op de afvoerverdeling. Om het zoekgebied te bepalen zijn de bovenstroomse effecten van rivierverruimende maatregelen geanalyseerd. Om dit bereik te bepalen kan de halveringslengte worden berekend. Dit is de lengte waarover het bovenstroomse waterstandseffect van een maatregel is gehalveerd. Dit wordt ook wel het stuwkromme-effect genoemd (Rijkswaterstaat et al., 2007). Deze halveringslengte kan, aan de hand van verschillende riviereigenschappen, berekend worden met behulp van de volgende formule:

$$L_{0,5} = \frac{\sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 C^2 i}}}{3i}$$

Hierin is Q het debiet in m³/s, B de rivierbreedte in m, C de Chézy-coëfficiënt (m^{1/2}/s) en i het verhang in m/m. Omdat het stroomgebied van de Nederrijn wat de ruwheid en vooral de breedte betreft sterk verschilt, is ervoor gekozen een formule voor de Chézy-coëfficiënt te gebruiken die de rivierbreedte en hoogteverschillen in het rivierbed meeneemt (Ribberink & Hulscher, 2012).

$$C = 25 * \left(\frac{A}{O} * k_s \right)^{\frac{1}{6}}$$

In deze formule is A de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de rivier, in m². O is de lengte van het 'natte' rivierprofiel in meters. k_s staat voor de Nikuradse ruwheidshoogte en wordt uitgedrukt in meters. Zoals genoemd verschilt vooral de breedte van de Nederrijn zeer sterk, van een krappe 300 meter dicht bij het splitsingspunt (rivierkilometer 882, zie figuur 4-1) tot ruim 1,5 kilometer bij de uiterwaardengebieden verder benedenstrooms (rivierkilometer 885). Daarom zijn er, gebruikmakend van de bovenstaande formules, twee halveringslengtes berekend, voor de twee genoemde afstanden.

De halveringslengte in het uiterwaardengebied met een breedte van 1500 meter is ruim 7 kilometer. Bij een breedte van 300 meter is deze lengte ruim 21 kilometer. Gezien de geografie van de Nederrijn is dit te verklaren doordat in brede uiterwaardgebieden de waterstandseffecten snel gedempt worden. In relatief smalle rivierdelen treedt deze demping veel minder snel op.

Uit bovenstaande analyse kan geconcludeerd worden dat de maatregel bij voorkeur zo dicht mogelijk bij het smalle riviergedeelte gezocht moet worden. Om de maatregelen verder dan 10-15 kilometer vanaf het splitsingspunt¹ te zoeken is gezien de halveringslengtes niet interessant. Vanuit de PKB Ruimte voor de Rivier zijn door het RIZA enkele mogelijke maatregelen aangedragen in het kader van Ruimte voor de Rivier (RIZA, 2003). Met deze kennis zijn uit dit Maatregelenboek enkele nog niet uitgevoerde maatregelen geselecteerd waarvan verwacht wordt dat deze een waterstandsverlagend effect hebben tot de IJsselkop. Deze maatregelen zijn opgenomen in de onderstaande tabel. De gegevens zijn deels overgenomen van RIZA. Enkele gegevens zijn vernieuwd in de nieuwe versie van de Blokkendoos van het Deltaportaal. Figuur 4-1 geeft een overzicht van de mogelijkheden weer. Verder volgt een korte toelichting per maatregel (uit RIZA, 2003 en Rijkswaterstaat, 2014).

Tabel 4-1: Mogelijke maatregelen rondom splitsingspunt Nederrijn (gebaseerd op RIZA, 2003 en Rijkswaterstaat, 2014)

Code	Naam	Riviertraject (km)	MHW-winst waterstand (m)	Oppervlakte maatregel (m ²)
4801	Verwijderen hoogwatervrij terrein Arnhem	882,9-883,7	0,087	860,6
6000	Steenfabriek Malburgen	884,6	0,032	222,1
6100	Voormalige steenfabriek Elden	886,6	0,001	-
26	Verwijderen hoogwatervrij terrein Arnhem, N225 en benedenstroomse hoge bodem	882,9-884,0	0,247	2484,4
27	Steenfabrieken Malburgen en Elden, tussenliggende kades en hoog gebied	884,0-886,6	0,234	1612,5
28	Combinatie van 26 en 27	882,9-886,6	0,348	3535,1
20402	Dijkverlegging Vogelenzang	887,3-890,7	0,067	581

4801: Verwijderen hoogwatervrij terrein Arnhem

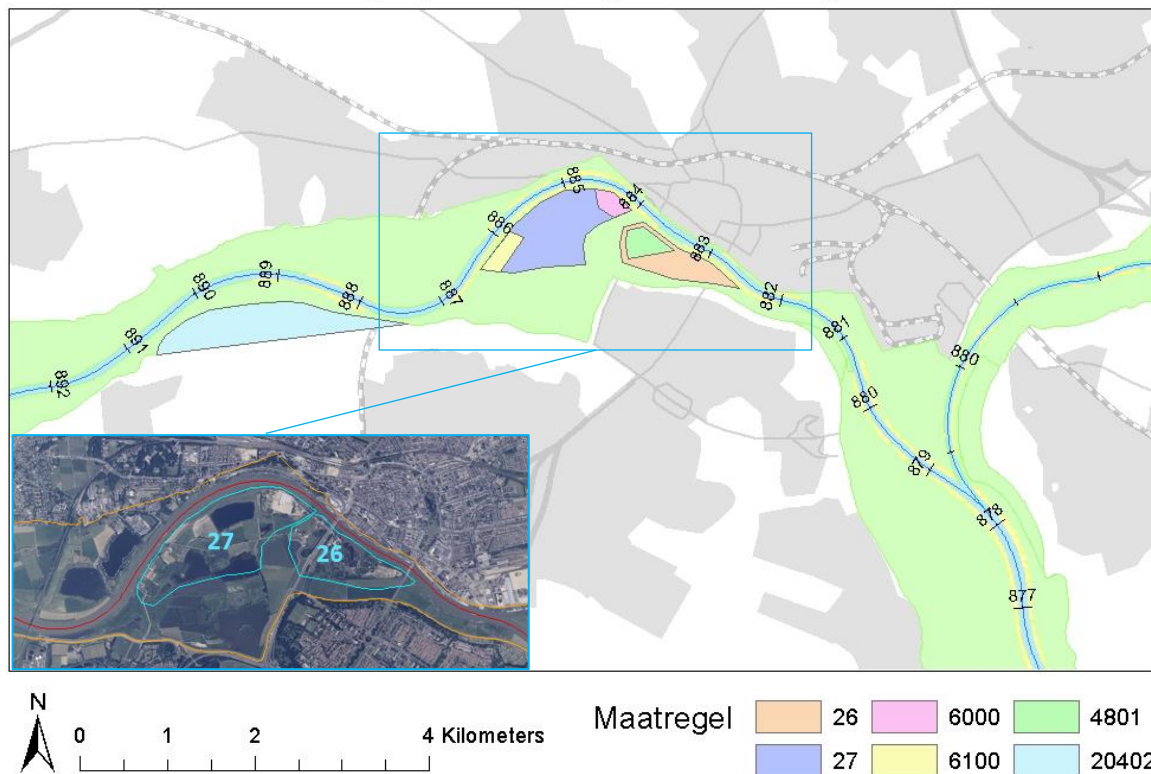
Dit knelpunt omvat het terrein tussen de groene rivier en het zomerbed bij Arnhem. Het gebied maakt een rommelige indruk vanwege de oude restanten van bebouwing en industrie met woonarken. Sanering resulteert in een verhoging van de ruimtelijke kwaliteit (waaronder natuurwaarden). De uiterwaard is vrij smal waardoor verwijdering van dit terrein resulteert in een groot waterstandsverlagend effect.

6000: Steenfabriek Malburgen

De steenfabriek is gelegen op een hoogwatervrij terrein in de uiterwaard Meinerswijk op de linkeroever van de Nederrijn. De maatregel betreft het verwijderen van dit hoogwatervrije terrein. Hiermee wordt een groot obstakel verwijderd uit het stroomgebied van de Nederrijn bij hoogwater.

¹ Het splitsingspunt is gelegen bij rivierkilometer 878, dus het zoeken van maatregelen tot ongeveer rivierkilometer 890 is doelmatig en efficiënt. Hoe verder verwijderd van het splitsingspunt hoe groter de maatregel moet zijn om een vergelijkbaar effect op het regelwerk te bereiken.

Mogelijke maatregelen Nederrijn



Figuur 4-1: Mogelijke maatregelen Nederrijn + luchtfoto betreffende gebied

6100: Voormalige steenfabriek Elden

De voormalige steenfabriek Elden is, net als steenfabriek Malburgen, gelegen op een hoogwatervrij terrein in dezelfde uiterwaard. De maatregel betreft slechts een aantal kleine aanpassingen, omdat de oude fabriek een monument is en het hoogtemodel hier dus niet aangepast mag worden.

26: Verwijderen hoogwatervrij terrein Arnhem, N225 en benedenstroomse hoge bodem

Zie maatregel 4801. Tevens bestaat dit knelpunt uit het aansluitend hoog gelegen terrein en de weg N225. Het geheel is gelegen op de linkeroever van de Nederrijn in Arnhem. Alle objecten worden verlaagd of verwijderd. Hierdoor wordt de doorstroming van de uiterwaard verbeterd, wat resulteert in een grote waterstandsaling.

27: Steenfabrieken Malburgen en Elden, tussenliggende kades en hoog gebied

Zie maatregelen 6000 en 6100. Hieraan toegevoegd wordt nog verwijdering van kades en hoger gelegen gebieden in de uiterwaard Meinerswijk. Dit is ter verbetering van de gehele doorstroming in de uiterwaard. Dit resulteert in een grote waterstandsaling.

28: Combinatie van 26 en 27

Zie maatregelen 26 en 27. Dit resulteert in een zeer grote waterstandsaling.

20402: Dijkverlegging Vogelenzang

Dit betreft een dijkverlegging over een traject van 3 kilometer tussen de spoorbrug bij Oosterbeek en Driel op de linkeroever van de Nederrijn. Dit zorgt voor een redelijk grote waterstandsafname.

De eerste zes maatregelen of maatregelpakketten zijn allen gelegen binnen het uiterwaardengebied Stadsblokken-Meinerswijk. In 2015 is op deze locatie een Ruimte voor de Rivier-project opgeleverd. Dit is niet één van de genoemde maatregelen geworden, maar allerlei kleine aanpassingen die hier nog niet genoemd zijn. Daarom is het goed om te onderzoeken wat er al is gedaan en welke toevoegingen in de toekomst nog mogelijk zijn in dit gebied. In figuur C-2 is een overzicht gegeven van het inmiddels uitgevoerde project in dit uiterwaardengebied, waaruit de conclusie kan worden getrokken dat de hiervoor genoemde maatregelen vrijwel niet tot uitvoering zijn gebracht en daarom nog de basis kunnen vormen voor de verder te onderzoeken maatregelen.

4.2. Effectiviteit maatregelen

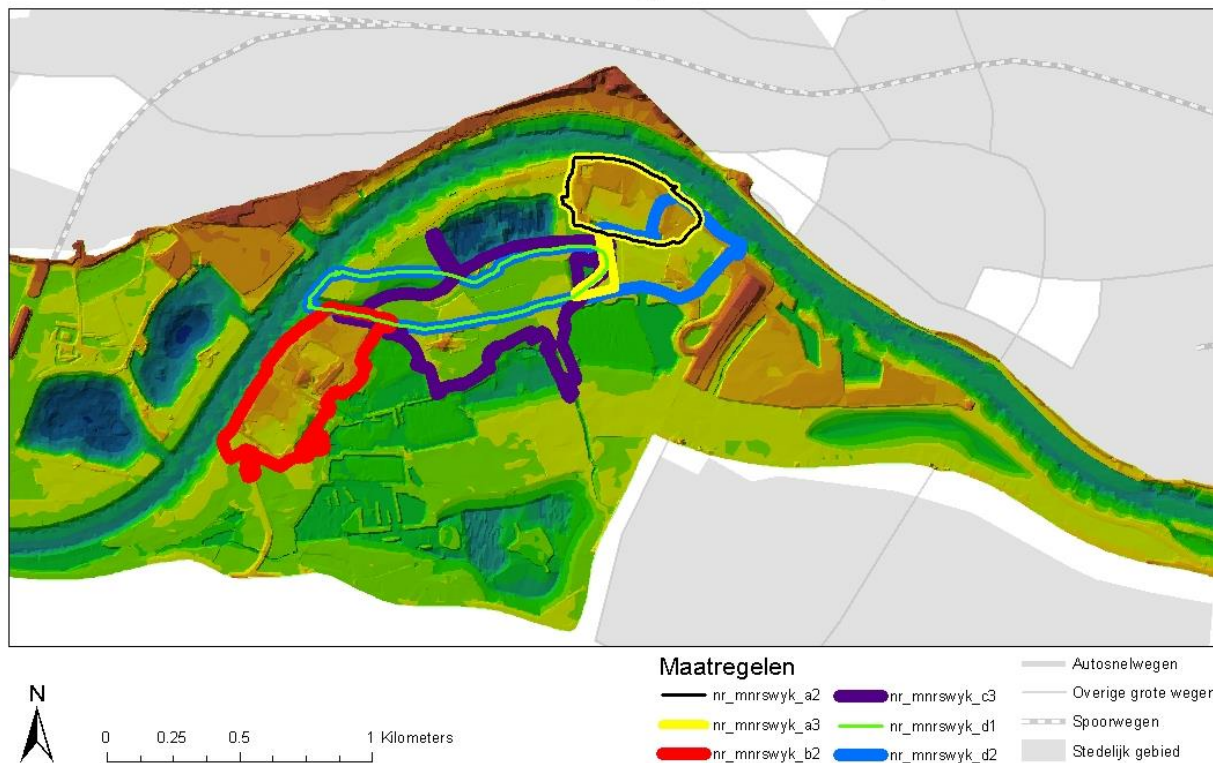
Op basis van wat in de vorige paragraaf is geanalyseerd, is een volgorde bepaald waarin verschillende maatregelen zullen worden doorgerekend. Deze maatregelen zijn delen of aanpassingen van de beschreven maatregelen uit de vorige paragraaf. De ontworpen maatregelen zijn beschreven in tabel 4-2 en gevisualiseerd in figuur 4-2. Figuur 4-2 geeft niet alle maatregelen weer, dit is het geval indien de betreffende versie dezelfde omtrek heeft als de opvolgende versie (nr_mnrswyk_a1 heeft dezelfde omtrek als nr_mnrswyk_a2, daarom wordt alleen de omtrek van nr_mnrswyk_a2 weergegeven).

Tabel 4-2: Beschrijving van maatregelen, in volgorde van tijdstip van ontwerp

Maatregel	Beschrijving
nr_mnrswyk_a1	Verwijderen hoogwatervrijterrein 6000, omzetten verhard terrein naar grasland en verwijderen bomen/heggen/lanen
nr_mnrswyk_b1	Verwijderen hoogwatervrijterrein 6100, omzetten verhard terrein naar grasland en verwijderen bomen/heggen/lanen
nr_mnrswyk_c1	Bebost terrein veranderen naar natuurlijk grasland
nr_mnrswyk_b2	b1 + terreinverlaging naar maaiveld (10,5 m+NAP) ¹
nr_mnrswyk_a2	a1 + terreinverlaging naar maaiveld (10,5 m+NAP)
nr_mnrswyk_a3	a2 + verwijderen hooggelegen toegangsweg
nr_mnrswyk_c2	c1 + verwijderen bomen/heggen/lanen + verwijderen kades
nr_mnrswyk_c3	c2 + verlagen terrein naar maaiveld (10,5 m+NAP) + verwijderen kades
nr_mnrswyk_d1	Nevengeul met diepte 6 m+NAP
nr_mnrswyk_d2	d1 + vlak maken terrein bovenstrooms voor nevengeul

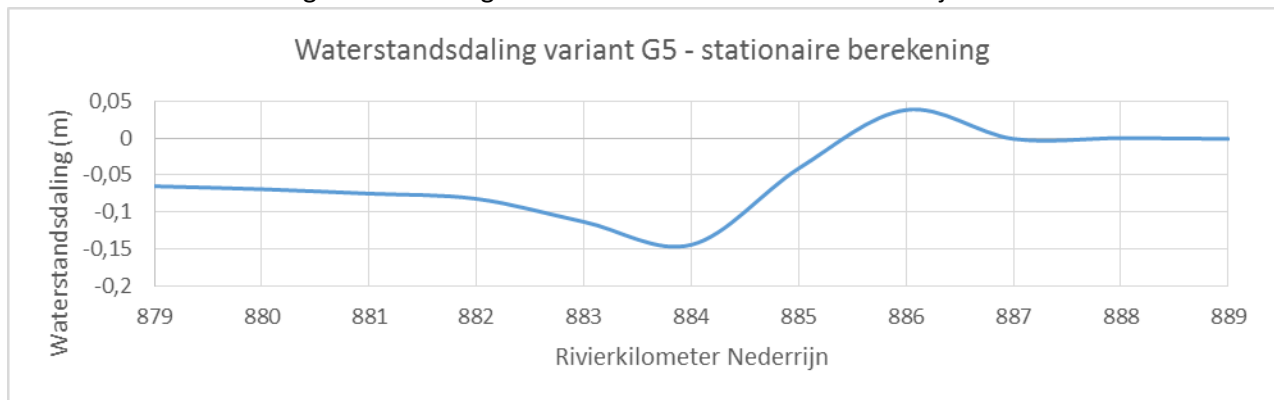
¹ Op pagina 19 wordt genoemd dat dit terrein niet verlaagd mag worden omdat het een monument betreft. De reden dat deze maatregel toch wordt doorgerekend is eerder genoemd op pagina 11. Hier wordt gezegd dat in dit onderzoek de resultaten vooral gebruikt zullen worden om een idee te krijgen in welke ordegrootte een maatregel moet zijn om een rol te kunnen spelen in het corrigeren van de afvoerverdeling. Hiertoe is het verlagen van dit hooggelegen terrein een uitstekende manier.

Berekende maatregelen Nederrijn



Figuur 4-2: Berekende maatregelen Nederrijn, geprojecteerd op hoogtemodel

In tabel 4-3 zijn alle berekende varianten weergegeven. Daarnaast is per variant aangegeven wat de resultaten van de stationaire berekening zijn. Tevens worden zowel de verschillen met de waterhoogte als de verschillen met de drempelhoogte van het regelwerk, vergeleken met de referentiesituatie, weergegeven. Een voorbeeld van de waterstandsverschillen met een berekende variant, vergeleken met de referentiesituatie, is weergegeven in figuur 4-3. Wat de drempelhoogte van het regelwerk betreft geldt het verband dat hoe kleiner het verschil met de referentiesituatie is, hoe beter de maatregel werkt. verband dat hoe kleiner het verschil met de referentiesituatie is, hoe beter de maatregel werkt. In bijlage J zijn de uitgebreide resultaten van de stationaire berekeningen weergegeven. In deze resultaten en tevens in figuur 4-3 is het genoemde stuwkromme-effect duidelijk zichtbaar.



Figuur 4-3: Waterstandsding variant G5 ten opzichte van referentiesituatie – stationaire berekening (gebaseerd op bijlage J)

Tabel 4-3: Berekende varianten inclusief resultaten stationaire berekeningen (in m+NAP)

Variant	Maatregel	Drempelhoogte HPleij11	Drempelhoogte HPleij	Max. ΔWater hoogte	ΔHPleij11 t.o.v. referentie	ΔHPleij t.o.v. referentie
r	Zie tabel 2-2	11,40	13,4	-	-	-
A	Zie tabel 2-2	13,70	15,04	0,000	2,3	1,64
G1	a1 + b1	13,46	15,01	-0,016	2,06	1,61
G2	a1 + b1 + c1	13,39	15,00	-0,018	1,99	1,60
G3	b2	13,01	14,96	-0,043	1,61	1,56
G4	a2 + b2 + c1	12,07	14,85	-0,140	0,67	1,45
G5	a3 + b2 + c2	12,04	14,85	-0,144	0,64	1,45
G6	a3 + b2 + c3	12,02	14,85	-0,147	0,62	1,45
G7	a3 + b2 + c3 + d1	11,95	14,84	-0,153	0,55	1,44
G8	a3 + b2 + c3 + d2	11,60	14,80	-0,177	0,20	1,40

Uit tabel 4-3 zijn een aantal zaken op te maken. Allereerst blijken de varianten G1 en G2 weinig effect te hebben. Dat is te verklaren doordat a1 en b1 slechts bestaan uit kleine aanpassingen aan de eigenschappen van het model. Maatregel c1 is in combinatie met a1 en b1 geen grote toevoeging. Dit is te verklaren door de analyse van de figuren uit bijlage K. Om meer effect te genereren is maatregel b1 uitgebreid naar b2 door het hoogtemodel aan te passen. Variant G3 bestaat uit maatregel b2 en heeft een relatief groot effect ten opzichte van varianten G1 en G2. Als gevolg van het succes van deze maatregel is tevens maatregel a1 uitgebreid naar a2. Variant G4 heeft een relatief groot effect, wat ook is op te maken uit de figuren in bijlage K, waarin te zien is dat in de bocht de rivier meer ruimte krijgt waardoor het water sneller wordt afgevoerd en de waterstand daalt.

In ditzelfde figuur zijn nog enkele obstakels te zien waar de stroming stagneert of de stroomrichting sterk verandert. Het stroomgebied is gladder gemaakt door obstakels te verwijderen in de varianten G5 en G6. Deze maatregelen voegen echter weinig toe aan de waterstandsdeling in het gebied en daarmee aan het regelbereik van het regelwerk. Daarom is besloten om een geul toe te voegen in het gebied om hiermee extra effect te genereren. Deze variant G7 geeft echter weinig extra effect ten opzichte van variant G6. De belangrijkste verklaring hiervoor is dat de instroom van de geul beperkt wordt door obstakels bovenstrooms van de geul. Om de instroom van de geul te verbeteren en nog enkele obstakels weg te nemen is maatregel d2 gemaakt. Deze maatregel is verwerkt in variant G8 en zorgt voor enkele centimeters waterdaling, wat een relatief grote toevoeging is ten opzichte van variant G7.

De varianten die zullen worden meegenomen naar de volgende hoofdstukken en waarvoor dus dynamische berekeningen zullen worden uitgevoerd zijn de varianten G3, G4 en G8. De keuze is op deze varianten gevallen omdat deze een grote toename in waterstandsdeling en regelbereik bereikt hebben ten opzichte van de voorgaande variant (zie tabel 4-3). In de bijlagen K en L zijn de hoogtemodellen en landschapsmodellen afgebeeld van deze drie varianten en de referentiesituatie. Tevens zijn over de hoogtemodellen de bijbehorende vectorvelden van de stroomsnelheden geprojecteerd waardoor de verbeteringen in doorstroming goed zichtbaar zijn.

5. De effecten op het regelbereik

In dit hoofdstuk zullen de effecten van de maatregelen uit hoofdstuk 4 op het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij worden geanalyseerd. Hieruit zal blijken of het regelbereik bij 17.000 m³/s in voldoende mate is verbeterd ten opzichte van de variant met Klimaatpark IJsselpoort. Hiertoe zijn dynamische berekeningen gedaan met een aantal van de maatregelen die in hoofdstuk 4 effectief genoeg bevonden zijn. De resultaten van varianten G3, G4 en G8 zullen worden vergeleken met de referentievariant en variant A en zullen op dezelfde manier worden gepresenteerd als in paragraaf 3.2.

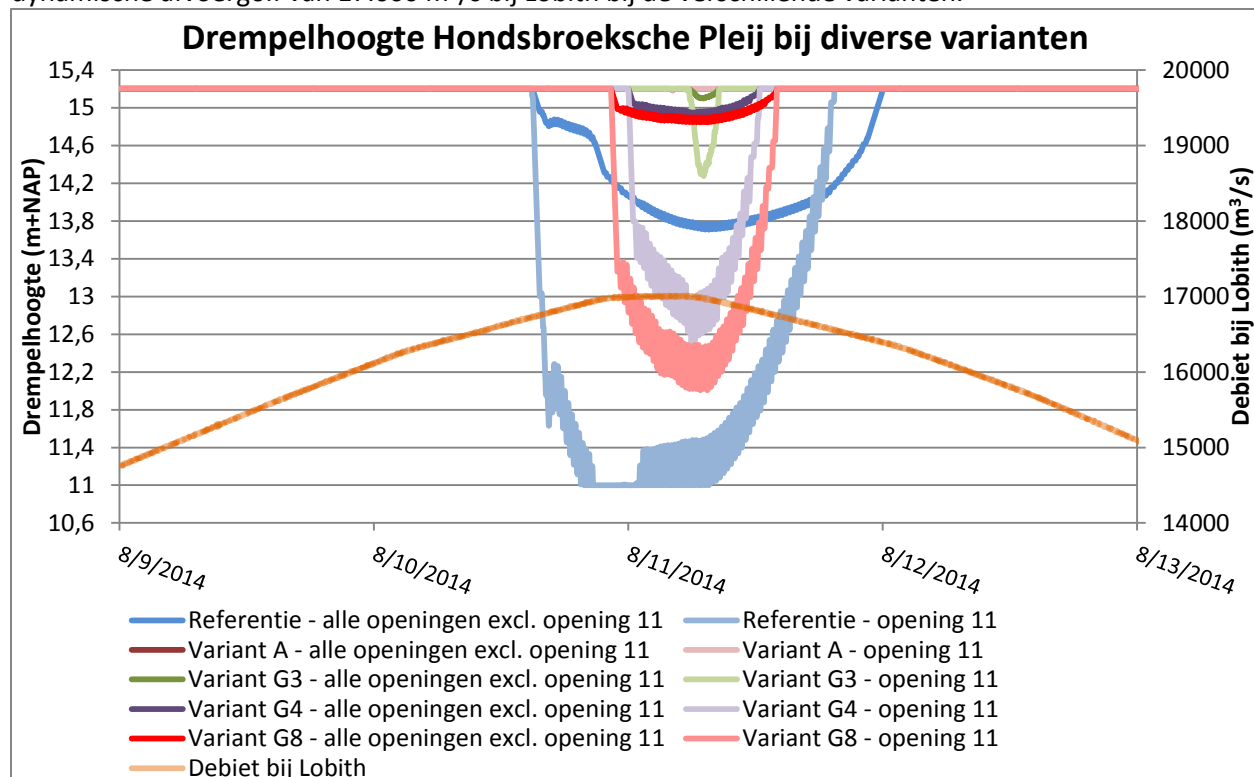
De drempelhoogte van het regelwerk Pannerden is voor deze drie varianten op dezelfde manier bepaald als in hoofdstuk 3 uitgelegd is (figuur 3-1). De drempelhoogtes, behorende bij deze varianten, zijn weergegeven in tabel 5-1.

Tabel 5-1: Drempelhoogte regelwerk Pannerden

Variant	G3	G4	G8
Drempelhoogte (m+NAP)	15,63	15,69	15,73

5.1. Regelwerk Hondsbroeksche Pleij

De maatregelen zorgen voor een verbeterde doorstroming in het uiterwaardengebied Stadsblokken-Meinerswijk, waardoor een waterstandsdeling verwezenlijkt wordt. Dit heeft als effect dat, zonder sturing door het regelwerk, er meer water naar de Nederrijn zou stromen. Hiertoe dient het regelwerk anders ingesteld te worden. In figuur 5-1 is te zien hoe het regelwerk functioneert tijdens een dynamische afvoergolf van 17.000 m³/s bij Lobith bij de verschillende varianten.



Figuur 5-1: Drempelhoogte regelwerk Hondsbroeksche Pleij bij dynamische afvoergolf van 17.000 m³/s bij Lobith

Uit de figuur blijkt duidelijk dat, in vergelijking met variant A (figuur 3-2), het regelbereik van het regelwerk is toegenomen. De drempelhoogte van alle openingen neemt met 33 cm toe tot maximaal 14,85 m+NAP in variant G8. Tevens is opening 11 veel verder geopend dan in variant A.

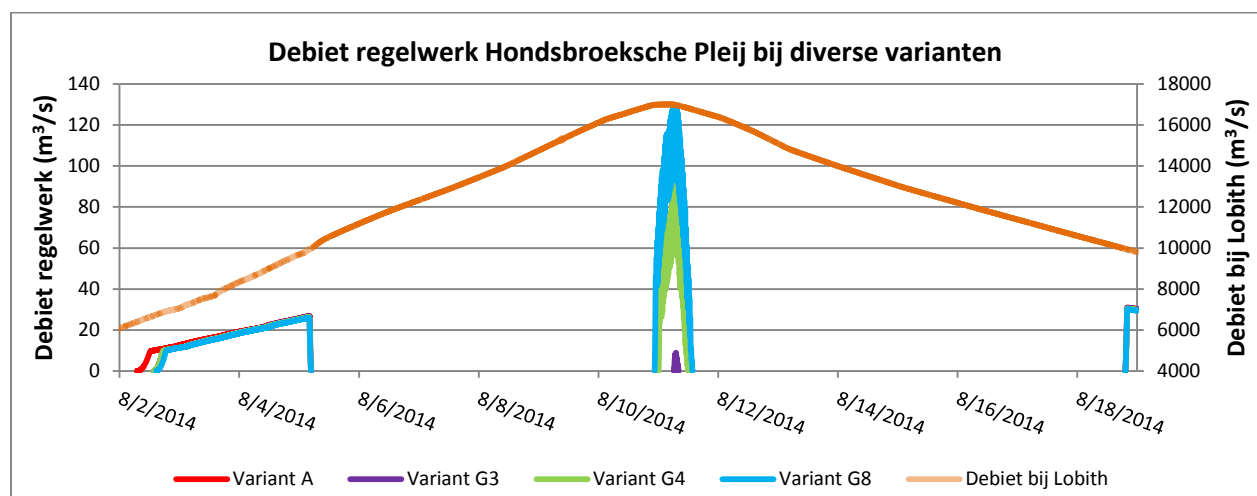
5.2. Afvoerverdeling bij 17.000 m³/s

In onderstaande tabel is de afvoerverdeling over de verschillen Rijntakken gegeven. De overige resultaten (*max*, *max25* en *last25*) zijn per variant weergegeven in bijlage M.

Tabel 5-2: Afvoerverdeling varianten bij 17000 m³/s en in () de verschillen t.o.v. variant A (max13-waarden)

	Beleid	Referentie	Variant A	Variant G3	Variant G4	Variant G8
Q-Lobith	17000	17004,1	17005,2	17003,8 (-1,3)	17005,6 (0,4)	17002,7 (-2,4)
Q-Waal	10970	10982,8	10978,1	10984,0 (5,9)	10985,0 (6,9)	10985,3 (7,2)
Q-Pankanaal	6030	6019,0	6016,6	6013,3 (-3,4)	6013,4 (-3,2)	6014,6 (-2,1)
Q-Nederrijn	3380	3386,2	3376,7	3380,7 (4,0)	3382,0 (5,2)	3382,3 (5,5)
Q-IJssel	2656	2649,3	2627,4	2624,9 (-2,5)	2641,9 (14,6)	2639,9 (12,5)
Q-RW-Pannerden	-	397,5	410,1	397,1 (-13,1)	371,0 (-39,1)	353,7 (-56,5)
Q-RW-HPleij	-	450,1	30,3	30,1 (-0,2)	84,7 (54,4)	118,9 (88,6)

De tabel laat zien dat veranderingen in drempelhoogte zichtbaar zijn in de afvoer door de regelwerken. Regelwerk Pannerden sluit in variant G8 13 centimeter meer dan in variant A, wat de afvoerafname verklaart. Daarnaast is het regelwerk Hondsbroeksche Pleij meer geopend dan in variant A, wat de afvoertoe name verklaart. In variant G3 lijkt deze verdere opening overigens niet aanwezig te zijn, maar zoals in subparagraaf 2.2.2 is uitgelegd en zoals figuur 5-2 laat zien is dit toch het geval in deze variant. Verder zijn er geen noemenswaardige verschillen te zien in de tabel, wat logisch is aangezien het hier om de ontwerpafvoer gaat. Bij deze afvoer zouden beide regelwerken de afvoerverdeling correct moeten regelen, wat hier ook het geval is.



Figuur 5-2: Debiet door regelwerk bij diverse varianten

Concluderend kan hier gesteld worden dat de extra rivierverruimende maatregelen in de Nederrijn daadwerkelijk een effect hebben op het regelbereik van het regelwerk Hondsbroeksche Pleij. Hoe groter het waterstandsverlagend effect van de maatregel is, hoe groter het regelbereik wordt.

6. De effecten op middenafvoeren

In dit hoofdstuk zullen de effecten van de maatregelen uit hoofdstuk 4 op de middenafvoeren worden beschouwd. Hieruit zal blijken of naast het vergroten van het regelbereik van het regelwerk Hondsbroeksche Pleij bij 17.000 m³/s ook de negatieve effecten van Klimaatpark IJsselpoort op de middenafvoeren verminderd zijn. Hiertoe zijn dezelfde varianten doorgerekend als in hoofdstuk 5. De resultaten zullen op dezelfde manier worden gepresenteerd als in paragraaf 3.2.

6.1. Afvoerverdeling bij middenafvoeren

In tabel 6-1 wordt de afvoerverdeling bij de IJsselkop voor de middenafvoeren weergegeven. In bijlage N is per variant een volledig overzicht te zien van de afvoerverdeling per Rijntak voor alle afvoeren.

Tabel 6-1: Aandeel Nederrijn in afvoerverdeling IJsselkop bij verschillende afvoergolven (in %)

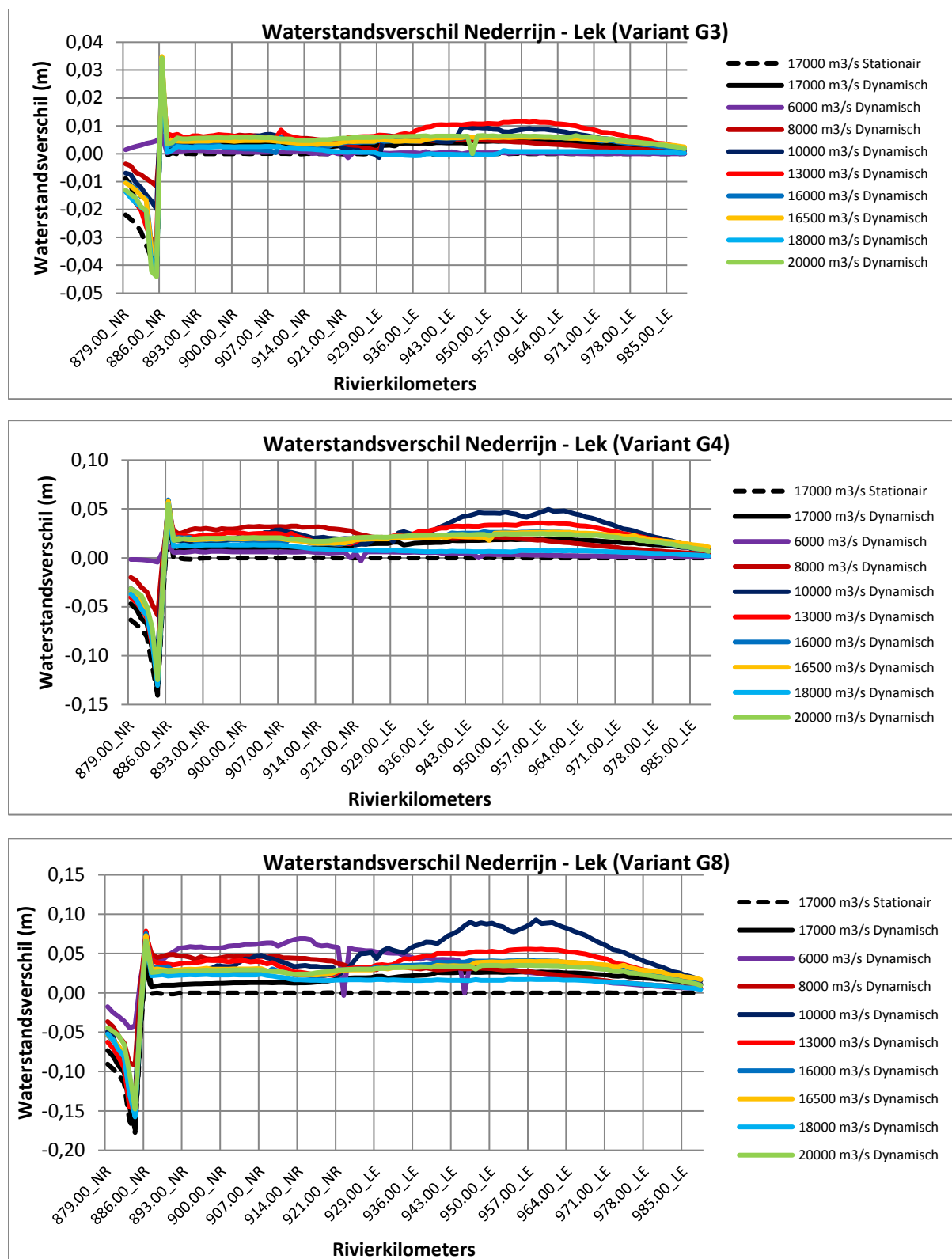
	6000	8000	10000	13000	16000	16500	17000	Gemiddelde
Referentie	56,4	57,6	59,2	59,5	58,4	58,3	56,1	57,93
Variant A	54,7	53,9	54,7	56,3	56,3	56,3	56,2	55,49
Variant G3	54,7	54,0	54,8	56,5	56,4	56,4	56,3	55,59
Variant G4	54,8	54,4	55,3	56,9	56,8	56,7	56,1	55,86
Variant G8	54,9	54,8	55,6	57,2	57,0	56,9	56,2	56,09

Wat uit de tabel blijkt, is dat de varianten G3, G4 en G8 de referentiesituatie meer naderen in vergelijking met variant A, maar bij lange na niet in staat zijn de referentie te evenaren. Ditzelfde effect was al zichtbaar in hoofdstuk 5, namelijk dat er verbetering zichtbaar is, maar de referentiesituatie nog buiten bereik blijft.

6.2. Waterstanden

In figuur 6-1 zijn de verschillen van de varianten G3, G4 en G8 ten opzichte van variant A voor de Nederrijn/Lek weergegeven. Voor alle varianten geldt logischerwijs dat de afvoervergroting en daarmee waterstandstoename op de Nederrijn/Lek ongeveer gelijk is aan de afvoer- en waterstandsafname op de IJssel. Voor het Pannerdensch Kanaal geldt dat de waterstandsdeling, veroorzaakt door de maatregelen op de Nederrijn, nog bovenstrooms doorwerkt tot aan de Pannerdensch Kop (zie voor resultaten stationaire berekeningen bijlage J). Op de Waal zijn nauwelijks waterstandsverschillen waar te nemen. Vanwege deze verbanden zijn in dit verslag alleen de grafieken van de Nederrijn/Lek opgenomen. In bijlage O zijn de waterstandsverschillen van variant G8 ten opzichte van variant A op alle Rijntakken weergegeven.

Wat blijkt uit tabel 6-1, blijkt ook uit figuur 6-1, waarin de grafieken met de waterstandsverschillen worden weergegeven. De situatie verbetert in zekere mate, maar de referentiesituatie wordt niet benaderd. Verder is in de figuren de waterstandsdeling bij het uiterwaardengebied Stadsblokken-Meinerswijk goed zichtbaar, in variant G3 nog relatief klein en relatief groter in de varianten G4 en G8.



Figuur 6-1: Waterstandsverschillen Nederrijn/Lek t.o.v. variant A tijdens middenafvoeren in verschillende varianten

7. Discussie

In dit hoofdstuk zullen enkele onderdelen van het onderzoek kritisch worden beschouwd. Zoals eerder in dit rapport genoemd, zal dit onderzoek vooral dienen als een indicatie voor de ordegrootte van benodigde maatregelen en niet als ontwerpvoorstel van de maatregelen die in hoofdstuk 4 worden beschreven. De keerzijde hiervan is de vraag of het behalen van een grote waterstandsdeling in het uiterwaardengebied Stadsblokken-Meinerswijk wel realistisch is, aangezien het verlagen van hooggelegen terreinen, het verwijderen van fabrieken en monumenten en het kappen van grote oppervlaktes bos erg kostbaar en niet geheel realistisch lijken. Daarnaast zullen deze maatregelen leiden tot maatschappelijke weerstand. Hiertoe is aanvullend onderzoek nodig naar de mogelijkheden die er daadwerkelijk in het gebied zijn.

Een andere punt van discussie is het regelbereik van het regelwerk Hondsbroeksche Pleij. De vraag is wanneer dit regelbereik voldoende is. Zoals in tabel 5-2 te zien is, geven de berekende maatregelen uit variant G8 extra ruimte in de vorm van een regelbereik van 33 centimeter, wat resulteert in een maximaal regeldebiet van 118,9 m³/s (zie tabel 5-2 en figuur 5-2). Bij welk debiet het bereik voldoende is, blijft een punt van discussie. Indien een bereik van bijvoorbeeld één meter voldoende blijkt te zijn, is het misschien niet nodig om terug te gaan naar het regelbereik van de referentiesituatie.

Een derde discussiepunt is of een veranderende afvoerverdeling wel echt zo problematisch is als wordt aangenomen voorafgaand en tijdens dit onderzoek. Paragraaf 1.3 haalt al aan dat er wordt nagedacht over nieuwe normen betreffende de afvoerverdeling van de Rijntakken. De keuze om alle extra afvoer vanaf 16.000 m³/s bij Lobith over de IJssel af te voeren is al afgefallen omdat teveel kostbare aanpassingen aan de rivier benodigd zouden zijn en hierdoor de kosten en baten niet tegen elkaar opwegen. Echter, door middel van een grootschalige rivierverruimende maatregel zoals Klimaatpark IJsselpoort is de afvoerverdeling ook te sturen, waardoor er bespaard kan worden op bijvoorbeeld de aanleg van extra regelwerken. Het veranderen van de afvoerverdeling wordt hierdoor misschien interessanter dan van tevoren gedacht. Met het vorige discussiepunt samenhangend zouden ook de, in paragraaf 1.2 genoemde, opties betreffende de sturing van het regelwerk herzien kunnen worden.

Tot slot is de betrouwbaarheid van de simulatiesoftware een punt van aandacht. Over de betrouwbaarheid, onzekerheid en gevoeligheid van SIMONA WAQUA is weinig literatuur beschikbaar. Het belangrijkste is hier echter om het verschil in onzekerheid tussen absolute waterstanden en waterstandsverschillen in berekende waterhoogtes in beschouwing te nemen. WAQUA berekent de waterhoogtes bij een bepaalde afvoer. In deze waterhoogtes kan een bepaalde onzekerheid zitten. Dit onderzoek draait echter voornamelijk om het verschil tussen twee waterstanden of drempelhoogtes van het regelwerk. Als beide berekende waterstanden of drempelhoogtes onderhevig zijn aan dezelfde onzekerheid is het verschil tussen deze waterstanden en drempelhoogtes redelijk tot zeer betrouwbaar.

8. Conclusies

Allereerst zullen in dit hoofdstuk de conclusies op de deelvragen worden gegeven, waarna de beantwoording van de hoofdvraag aan de orde zal komen.

Deelvraag 1: Wat zijn de effecten van Klimaatpark IJsselpoort op de afvoerverdeling bij de IJsselkop?

Klimaatpark IJsselpoort zorgt voor een ongewenst hoge drempelhoogte in het regelwerk Hondsbroeksche Pleij bij een afvoer van 17.000 m³/s bij Lobith, waarbij de controlefunctie van het regelwerk zo goed als teniet wordt gedaan. Het regelwerk moet namelijk helemaal sluiten in deze situatie. Tevens kan het regelwerk de afvoerverdeling alleen correct regelen bij de ontwerpafvoer van 17.000 m³/s, bij middenafvoeren is de afvoerverdeling ongewenst scheef. Deze afvoerverdelingen verschillen met enkele procenten ten opzichte van de referentiesituatie. Dit komt overeen met maximale debietverschillen van ongeveer 150 m³/s.

Deelvraag 2: Wat zijn de mogelijkheden voor extra maatregelen in de Nederrijn?

Om de negatieve effecten van het Klimaatpark te verminderen of teniet te doen, is het implementeren van een extra maatregel in de Nederrijn een potentiële oplossing. Gezien het stuwkromme-effect van rivierverruimende maatregelen is de meest effectieve locatie voor deze maatregelen zo dicht mogelijk bij het smalle gedeelte van de Nederrijn. De meest logische keus is dan het uiterwaardengebied Stadsblokken-Meinerswijk, vanwege de ligging en de vele mogelijkheden binnen dit gebied. Wat betreft het soort maatregel kan er het best worden gekozen voor het verlagen van hooggelegen terrein en het graven van een geul. Deze maatregelen bleken het meest effectief te zijn wat betreft waterstandsdeling in het gebied en daarmee het verminderen van de negatieve effecten van het Klimaatpark.

Deelvraag 3: Wat zijn de effecten van deze maatregelen op het regelbereik van het regelwerk bij een afvoer van 17.000 m³/s bij Lobith?

Tabel 8-1 laat de belangrijkste conclusie op deelvraag 3 zien, namelijk hoe de waterstandsdeling van de maatregelen rondom Meinerswijk zich verhoudt tot de daling van de drempelhoogte van het regelwerk Hondsbroeksche Pleij.

Tabel 8-1: Samenvatting van resultaten dynamische berekeningen bij ontwerpafvoer (17.000 m³/s bij Lobith), daling drempelhoogte regelwerk is t.o.v. 15,18 m+NAP (de drempelhoogte bij variant A)

Variant	Waterstandsdeling Meinerswijk (m)	Waterstandsdeling splitsingspunt (m)	Daling drempel hoogte (m)	Debiet door regelwerk (m ³ /s)
G3	0,041	0,009	0,08	30,1
G4	0,137	0,047	0,28	84,7
G8	0,173	0,073	0,33	118,9

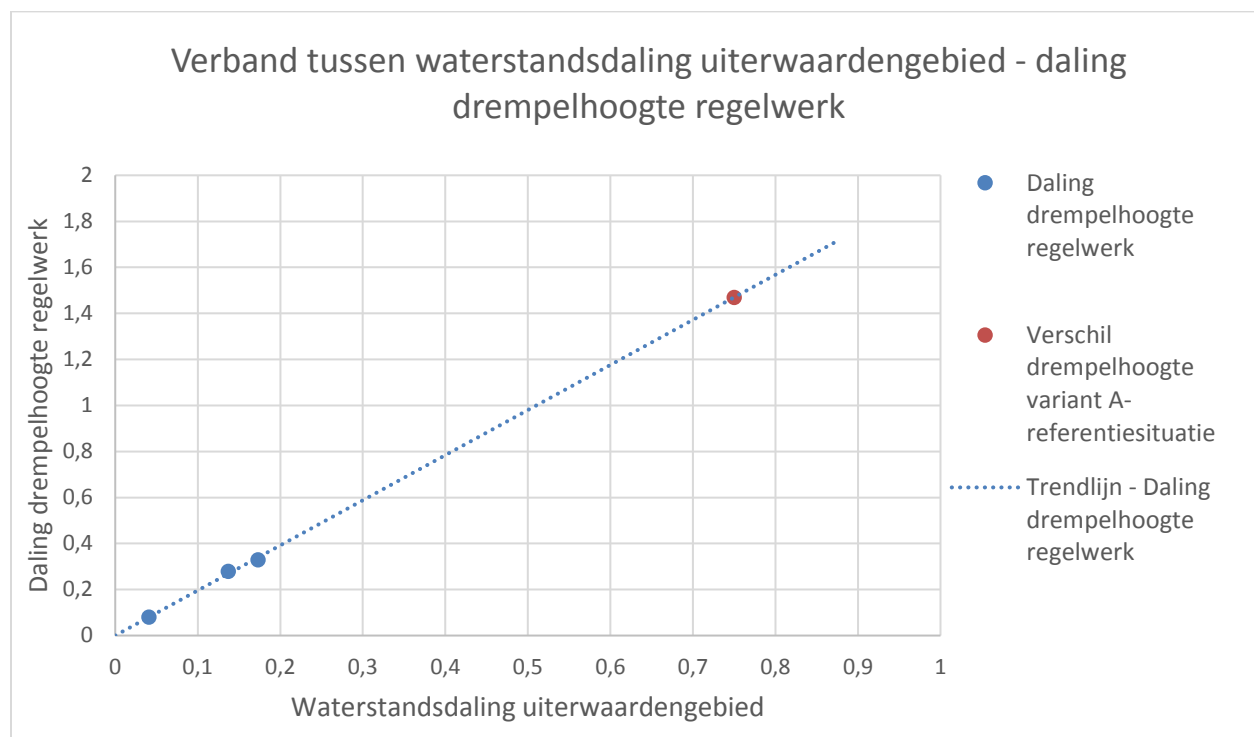
Deelvraag 4: Wat zijn de effecten van deze maatregelen op de middenafvoeren?

De effecten op het regelbereik hangen samen met de effecten op de afvoerverdeling van de middenafvoeren. Er is dus een bepaalde relatie tussen deze twee effecten. Als het regelbereik van het regelwerk verbetert, verbetert ook de afvoerverdeling bij middenafvoeren. Ter illustratie: het verschil in regelbereik tussen variant A en de referentiesituatie is 1,47 m. Door variant G8 wordt dit verschil verkleint met 0,33 m, wat een verbetering van 22,4% is. Het verschil in de gemiddelde afvoerverdeling bij middenafvoeren tussen variant A en de referentiesituatie (zie tabel 6-1) is 2,44%. In variant G8 is dit verschil verkleint met 0,6%. Dit is een verbetering van 24,6%. Deze verbeteringen zijn van dezelfde

ordegrootte. De verwachting is, dat als het regelbereik wordt teruggebracht naar de referentiesituatie, dat de afvoerverdeling bij middenafvoeren ook ongeveer gelijk zal zijn aan de referentiesituatie.

Hoofdvraag: Wat zijn locaties voor extra maatregelen en wat zijn de effecten van deze maatregelen op het regelbereik van het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij bij een afvoer van 17.000 m³/s en op middenafvoeren?

Op deze vraag is met de beantwoording van de vier deelvragen al grotendeels een antwoord geformuleerd. Allereerst is het uiterwaardengebied Stadsblokken-Meinerswijk aangewezen als een potentieel gebied waar voldoende ruimte is voor maatregelen. Tevens is het uitvoeren van maatregelen in dit gebied efficiënt vanwege de ligging nabij het splitsingspunt. De effecten van de berekende maatregelen in dit gebied zijn geanalyseerd en blijken een stap in de goede richting te zijn. Aan de andere kant is ook gebleken dat met alleen maatregelen in dit gebied de negatieve effecten van Klimaatpark IJsselpoort niet tenietgedaan kunnen worden.



Figuur 8-1: Verband tussen waterstandsddaling uiterwaardengebied – daling drempelhoogte regelwerk (gebaseerd op tabel 8-1)

Tevens kan er afsluitend geconcludeerd worden dat er een verband te zien is tussen de waterstandsddaling in het uiterwaardengebied Stadsblokken-Meinerswijk en de daling van de drempelhoogte van het regelwerk. Deze verhouding is ongeveer 0,5, wat blijkt uit tabel 8-1 en figuur 8-1. De blauwe stippen geven de varianten G3, G4 en G8 weer. In de referentiesituatie heeft het regelwerk een drempelhoogte van 13,71 m+NAP (figuur 2-1). Dit is een verschil van 1,47 m ten opzichte van variant A. Om in de situatie met Klimaatpark IJsselpoort weer terug te gaan naar het regelbereik van de referentiesituatie moet er in uiterwaardengebied Stadsblokken-Meinerswijk daarom een waterstandsddaling van bijna 75 centimeter gerealiseerd worden. Dit doorgetrokken verband tussen de waterstandsddaling en de daling van de drempelhoogte is in de grafiek weergegeven met de rode stip. Dit

lijkt onmogelijk, zeker omdat een groot deel van de mogelijkheden binnen het gebied al in dit rapport aan bod zijn gekomen en hiermee een maximale waterstandsaling van 17,3 cm gerealiseerd is.

In de voorgaande alinea's wordt genoemd dat om het regelbereik van de referentiesituatie te bereiken een waterstandsaling van ongeveer 75 cm gerealiseerd moet worden. Dit lijkt onmogelijk, dus zal er gezocht moeten worden naar andere oplossingen, al dan niet in combinatie met de maatregelen uit dit rapport, om het regelbereik van het regelwerk en de afvoerverdeling bij middenafvoeren terug te brengen naar de referentiesituatie. Ter ondersteuning van aanvullend onderzoek worden in het volgende hoofdstuk een aantal aanbevelingen gedaan.

9. Aanbevelingen

Allereerst wordt aanbevolen, indien er verder onderzoek wordt gedaan naar rivierverruimende maatregelen in de Nederrijn, deze te zoeken bovenstrooms van rivierkilometer 884 (zie figuur 4-1). Vanwege het stuwkromme-effect hebben deze maatregelen hier relatief meer bovenstrooms effect aangezien de rivier hier smaller is dan benedenstrooms van rivierkilometer 884. Hiermee samen hangt ook de suggestie om maatregel 4801 (zie tabel 4-1 en figuur 4-1) alsnog te modelleren en door te rekenen. De doorstroming zal door deze maatregel niet veel toenemen aangezien het bruggenhoofd (zie figuur 4-2) de doorstroming ernstig beperkt, maar waarschijnlijk niet te verwijderen is. Echter, de capaciteit van de rivier neemt toe en gezien de halveringslengte hier vrij groot is, zal deze maatregel naar verwachting relatief veel effect hebben op het regelbereik van het regelwerk Hondsbroeksche Pleij.

Een andere aanbeveling is om in vervolgonderzoeken niet beperkt te blijven tot het zoeken van oplossingen in de vorm van rivierverruimende maatregelen in de Nederrijn. Er zijn nog andere oplossingen die het waard zijn te onderzoeken, zoals het aanpassen van het Klimaatpark IJsselpoort. Een voorbeeld hiervan is het beperken van de kadeverlaging, die nu onderdeel is van het maatregelenpakket. Door deze kades minder te verlagen wordt het waterstandseffect minder en daarmee de negatieve effecten op het regelbereik van het regelwerk en op de middenafvoeren. Andere oplossingen kunnen liggen in het uitbreiden of vernieuwen van het regelwerk, een extra regelwerk of het aanpassen van de afvoerverdeling, zoals ook al gesuggereerd in de discussie.

De laatste aanbeveling betreft het nader onderzoeken van de effecten van een veranderende afvoerverdeling bij middenafvoeren op het faalmechanisme piping. In dit rapport wordt dit verschijnsel enkele malen genoemd, maar of deze effecten daadwerkelijk een rol spelen en in welke mate, zijn twee zaken die nog onbeantwoord zijn. Om een correcte inschatting te maken van de risico's van veranderende afvoerverdelingen bij middenafvoeren wordt aanbevolen nader onderzoek naar de gevolgen van piping bij deze middenafvoeren te doen.

Bibliografie

- Bestuurlijk Platform Rijn. (2015). *Regionaal voorstel Deltaprogramma Rijn*. Deltaprogramma Rijn.
- Botterhuis, & Stijnen. (2015). *Voorkeursstrategie Rivieren; MHW-berekeningen Deltamodel*. Lelystad: HKV Lijn in water.
- Brinke, W. t. (2004). Riviervertakkingen. In *De betuugelde rivier* (pp. 172-176). Diemen: Veen Magazines.
- Brinke, W. t. (2013). *Fact finding afvoerverdeling Rijntakken*. Blueland Consultancy.
- Bureau Stroming. (2013). *Brochure Rivierklimaatpark IJsselpoort*. Provincie Gelderland.
- CSO, & HKV Lijn in water. (2012). *Cursus Baseline*.
- Cuperus, J. (2013, maart 28). Brief aan mevrouw drs. T. Klip-Martin: Waarborgen uitgangspunten instroomfrequentie Cortenoever en Voorsterklei.
- Dienst Stadsontwikkeling Gemeente Arnhem. (2009). *Bevindingen rapportage Stadsblokken/Meinerswijk*. Arnhem: Gemeente Arnhem.
- Driessen, & Waart, v. (2016). *Effect van rivierverruimingsmaatregelen uit het Deltaprogramma op de afvoerverdeling in het splitsingspuntengebied*. Nijmegen: RoyalHaskoningDHV.
- Havinga, H. (2009). *Bedieningsprotocol Hondsbroeksche Pleij*. Rijkswaterstaat Oost-Nederland.
- Herik, v. (2013). *Voorkeursstrategie naar het jaar 2100*. Deltaprogramma Rivieren.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2014). *Synthesedocument Rijn-Maasdelta Achtergronddocument B4*. Deltaprogramma.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2005). *Planologische Kernbeslissing Ruimte voor de Rivier deel 1*. Projectorganisatie Ruimte voor de Rivier.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2007). *Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkeringen*.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2007). *Planologische Kernbeslissing Ruimte voor de Rivier deel 4*. Projectorganisatie Ruimte voor de Rivier.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2009). *Nationaal Waterplan*.
- Provincies Overijssel en Gelderland. (2014). *Maatregelboek regioproces IJssel*. Deltaprogramma Rivieren.
- Ribberink, J., & Hulscher, S. (2012). *River Dynamics: Shallow-Water Flows*. Enschede: Universiteit Twente.
- Rijkswaterstaat. (2007). *Rivierkundig beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren*. Rijkswaterstaat Limburg; Rijkswaterstaat Oost-Nederland; Rijkswaterstaat Zuid-Holland; RIZA.
- Rijkswaterstaat. (2014, 12 10). *Blokkendoos*. Opgeroepen op 04 26, 2016, van Deltaportaal: www.deltaportaal.nl/blokkendoos/
- Rijkswaterstaat, Arcadis, HKV Lijn in water, & Met Andere Woorden. (2007). *Leidraad Rivieren*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

- RIZA. (2003). *Maatregelenboek: Een overzicht van mogelijke rivierverruimende maatregelen in het stroomgebied*. Lelystad: Ruimte voor de Rivier.
- Schielen, R., Bomers, A., & Kroekenstoel, D. (2014). Unraveling the contribution of wind, sea level and discharge to design water levels in the Dutch delta. In *River Flow 2014* (pp. 1729-1736). London: Taylor & Francis Group.
- Schielen, R., Jesse, P., & Bolwidth, L. (2007). On the use of flexible spillways to control the discharge ratio of the Rhine in the Netherlands: hydraulic and morphological observations. *Netherlands Journal of Geosciences*, 77-88.
- Voorsluijs, E. (2013). *Kansrijke strategieën Waal, Merwedens en IJssel Zuid*. Provincie Gelderland.
- Vreeken, & Elorche. (2011). *Dienstspectificaties Invoer Baseline 4*. Rijkswaterstaat Data ICT Dienst.
- Ziel, F. v. (2012). *Ontwerpnota Regelwerk Pannerden*. Rijkswaterstaat.

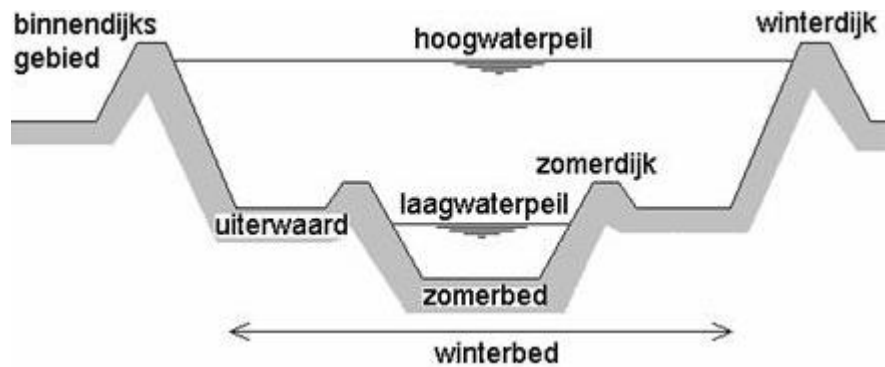
Bijlagen

Bijlage A: Terminologie	36
Bijlage B: Afbeeldingen Rivierklimaatpark IJsselpoort.....	38
Bijlage C: Afbeeldingen Ruimte voor de Rivier-projecten	39
Bijlage D: Toelichting software	41
Bijlage E: Modeltechnische uitgangspunten.....	42
Bijlage F: Overzicht uitgevoerde berekeningen	43
Bijlage G: Resultaten referentievariant	44
Bijlage H: Resultaten variant A (1)	45
Bijlage I: Resultaten variant A (2).....	46
Bijlage J: Resultaten stationaire berekeningen.....	48
Bijlage K: Hoogtemodellen met stroomschema's bij verschillende situaties	49
Bijlage L: Landschap in verschillende situaties	50
Bijlage M: Resultaten verschillende varianten (1)	51
Bijlage N: Resultaten verschillende varianten (2).....	52
Bijlage O: Resultaten variant G8	53
Bijlage P: Analyse variant F	54

Bijlage A: Terminologie

In deze bijlage zullen kort de gebruikte basisbegrippen uitgelegd worden. Ondanks het feit dat de meeste termen bekend zullen zijn, is het goed de begrippen vooraf te definiëren om misverstanden te voorkomen.

Figuur A-1 geeft een schematisatie van de gebruikte terminologie weer. Onder het figuur zal in het kort een beschrijving worden gegeven van deze begrippen.



Figuur A-1: Dwarsprofiel rivier (Bron: www.quizlet.com)

Binnendijks gebied

Binnendijks is de landzijde van de dijk. De rivierzijde van de dijk wordt logischerwijs buitendijks genoemd. Het binnendijkse gebied is beschermd tegen overstrooming door de *winterdijk*, in tegenstelling tot het buitendijkse gebied.

Uiterwaard

Onder het buitendijkse gebied vallen onder andere de uiterwaarden. Deze uiterwaarden kunnen overstroomd worden wanneer het waterpeil hoger is dan de zomerdijk. De uiterwaarden zijn dan ook bedoeld om ruimte te geven aan het water in geval van piekafvoeren. Uiterwaarden worden, wanneer ze niet overstroomd zijn, vaak gebruikt als weide voor vee. Tevens worden deze gebieden soms gebruikt voor landbouw of recreatie. Om een hoge frequentie van instromen te voorkomen zijn er in de meeste gebieden *zomerdijken* aangelegd. De uiterwaarden zijn daarnaast ook vaak de plaats waar rivierverruimende maatregelen plaatsvinden, zoals uiterwaardverlaging, dijkverlegging, aanleg van nevengeulen, etc.

Waterpeil

Het waterpeil is de hoogte van het water, gemeten in meters boven NAP (Normaal Amsterdams Peil). Dit peil is een referentiehoogte waarmee onder andere de waterhoogte wordt uitgedrukt.

Zomerbed en winterbed

In tijden van hoogwater en gevulde uiterwaarden stroomt de rivier als geheel door het winterbed. In tijden van laagwater spreken we van een zomerbed. De termen 'zomer' en 'winter' worden gebruikt omdat er rond de zomer vaak sprake is van laagwater en in de winter vaak hoogwatersituaties plaatsvinden. Logischerwijs spreken we daarom ook van zomer- en winterdijken.

Bovenstrooms en benedenstrooms

Deze termen zorgen soms voor verwarring. Bovenstrooms, of stroomopwaarts, is het tegenovergestelde

van benedenstrooms. Bovenstrooms duidt de richting aan die tegen de stroom ingaat, dus richting de oorsprong van de rivier. Benedenstrooms duidt de richting aan die met de stroom meegaat, dus richting het meer of de zee waar de rivier instroomt. In het geval van dit onderzoek zal er vaak worden gesproken van bovenstrooms of benedenstrooms het Klimaatpark IJsselpoort. Bovenstrooms van het park bevinden zich het Pannerdensch Kanaal en de Bovenrijn, benedenstrooms bevindt zich de IJssel.

Verder zijn er nog enkele inhoudelijke termen, zoals (beleidsmatige) afvoergrootte, afvoerverdeling en normen betreffende overstromingsbeheersing. Deze zullen hieronder toegelicht worden.

Afvoergrootte

Het waterpeil is een van de parameters die een sterke relatie heeft met de afvoer. De meeste formules die gebruikt worden om de afvoergrootte te berekenen gebruiken de waterhoogte als belangrijke invoer. Andere parameters die invloed hebben op de afvoergrootte zijn het rivierprofiel, het verhang en de ruwheid van het zomer- en winterbed. Het verhang wordt uitgedrukt in meter per meter, en drukt de steilte van de rivier uit. De overheid heeft beslissingen genomen over de maximale ontwerpafvoer en afvoerverdeling over de Rijntakken. In 2050 moet alle bescherming ontwerpen zijn op een maximale afvoer van 17.000 m³/s bij Lobith. In 2100 is deze grens 18.000 m³/s.

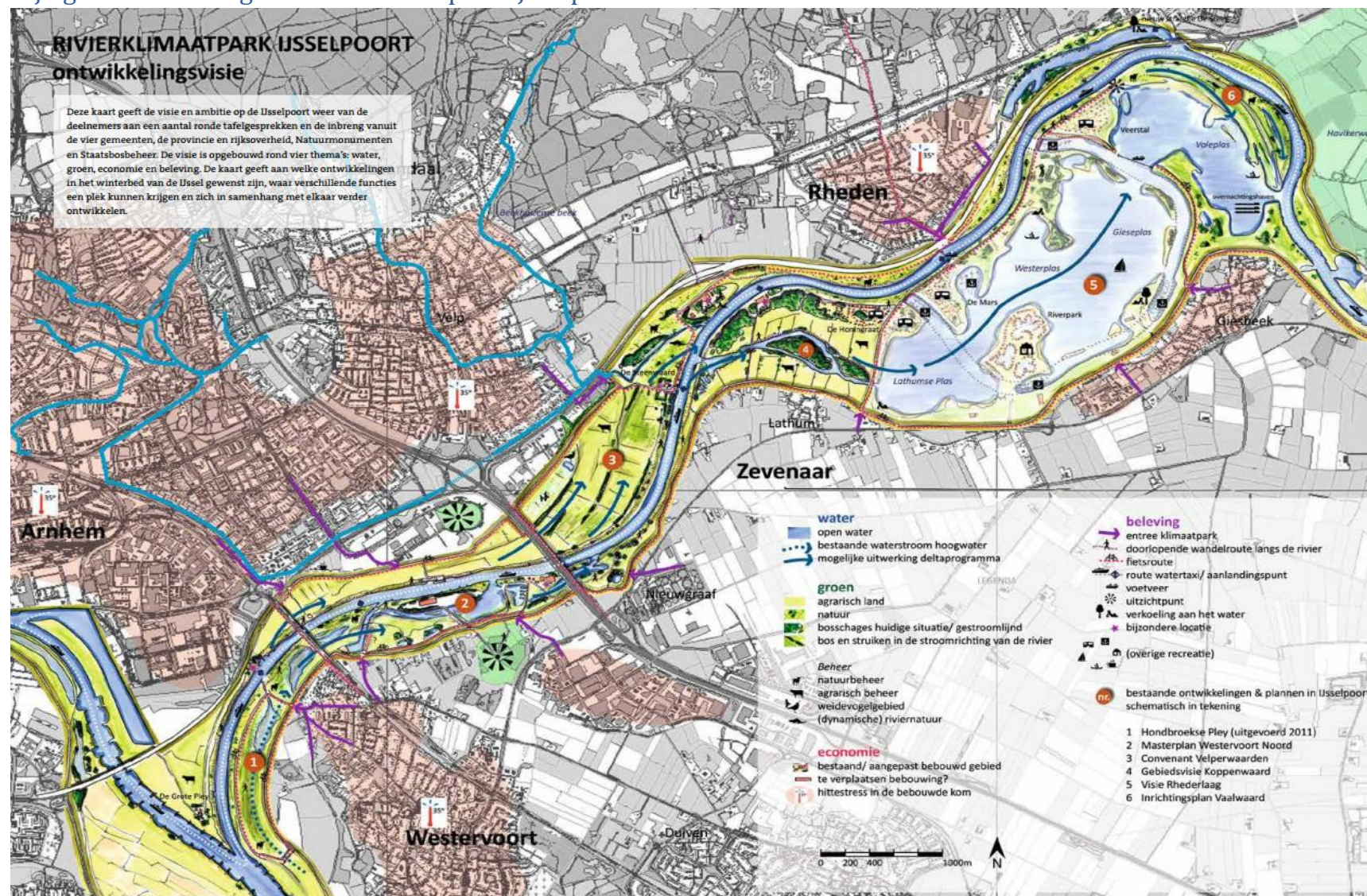
Afvoerverdeling

Een afvoerverdeling impliceert slechts één inkomende rivier en twee of meer uitgaande rivieren. Dit betekent dat de inkomende afvoer wordt verdeeld over twee of meer uitgaande afvoeren. Ook voor de Nederlandse rivieren heeft de overheid over de afvoerverdeling beslissingen genomen. Deze zijn te zien in tabel 1-1 en uitgelegd in paragraaf 1.3.

Normen betreffende overstromingsbeheersing

Normen betreffende de Nederlandse overstromingsbeheersing worden bijna altijd uitgedrukt in een bepaalde statistische frequentie. Dit kan de overstromingsfrequentie van uiterwaarden, dijken of duinen zijn. Voor dijken kan dit bijvoorbeeld eens in de 10.000 jaar of eens in de 1250 jaar zijn. Hierover heeft de overheid tevens beslissingen genomen. Ook deze zijn verder uitgewerkt in paragraaf 1.3 en dan voornamelijk de overstromingsfrequentie van uiterwaarden omdat deze het meest direct in verband staan met de afvoerverdeling.

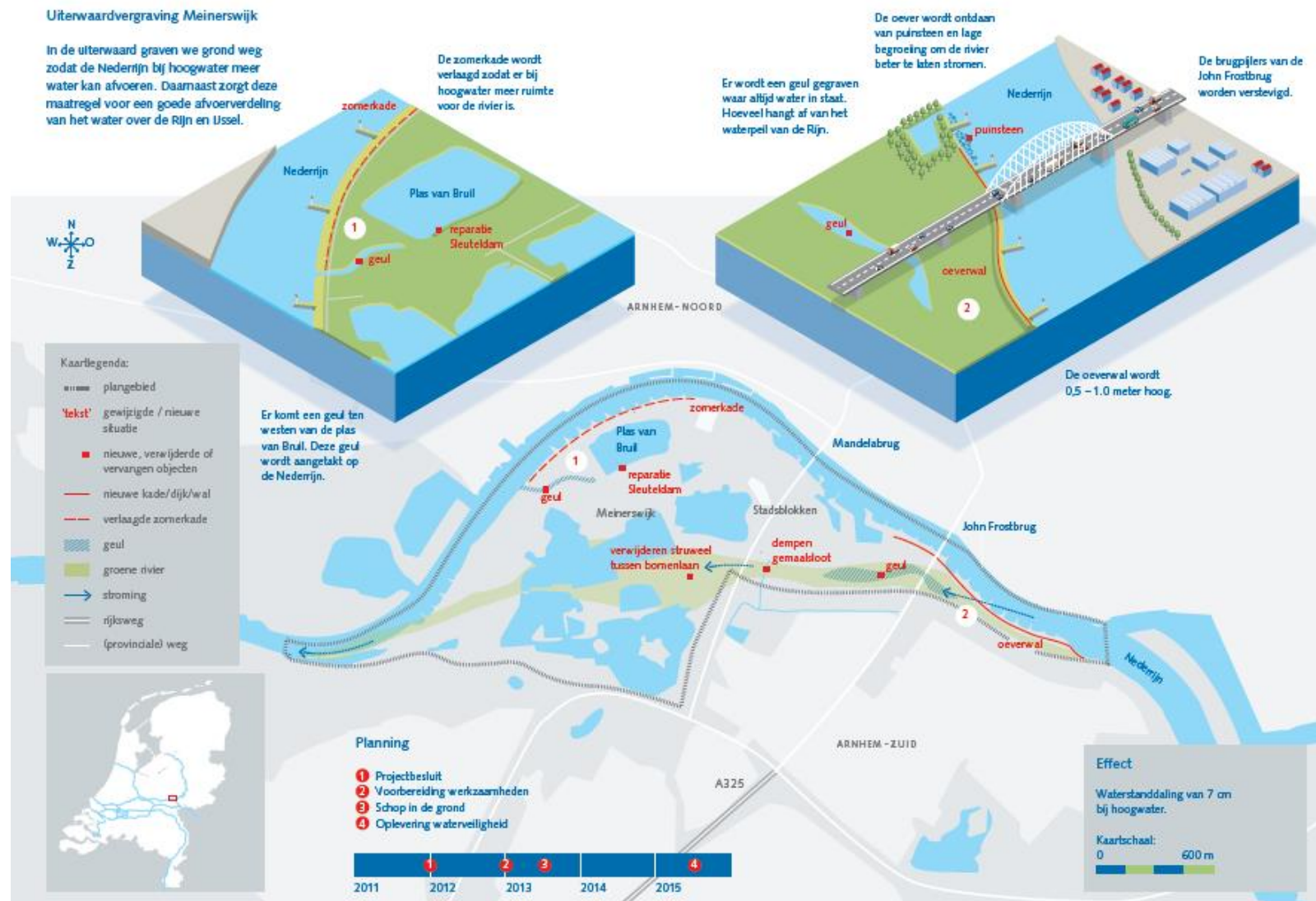
Bijlage B: Afbeeldingen Rivierklimaatpark IJsselpoort



Figuur B-1: Ontwikkelingsvisie Klimaatpark IJsselpoort (Bureau Strooming, 2013)

Figuur C-1: Schematisatie project Hondsbroeksche Pleij (www.ruimtevoorderivier.nl)

Deltares



Figuur C-2: Schematisatie Ruimte voor de Rivier-project Stadsblokken-Meinerswijk (www.ruimtevoorderivier.nl)

Bijlage D: Toelichting software

ArcGIS

GIS staat voor Geo Informatie Systeem. ArcGIS is een softwarepakket dat hier invulling aan geeft. Functies van ArcGIS zijn onder andere: data analyse en presentatie/visualisatie van deze data. Dit kan bijvoorbeeld gebruikt worden voor het bestuderen van locaties voor potentiële schuilplaatsen of het visualiseren van bevolkingsgroei. In het kort kan gezegd worden dat ArcGIS gebruikt wordt om de omgeving in kaart te brengen en te begrijpen.

Baseline

Baseline is een database en ArcInfo-applicatie voor opslag, verwerking en visualiseren van riviergegevens. Deze gegevens worden gebruikt voor de berekeningen van programma's als Sobek, WAQUA en Delft3D. Deze modellen worden onder andere gebruikt voor het bepalen van hydraulische randvoorwaarden en vergunningverlening rondom de Wet Beheer Rijkswaterstaatwerken (WBR). De Baseline database bevat data op grondniveau. Daarnaast bevat de database ook de locaties van kribben, hoger gelegen watervrije gebieden, vegetatie, oppervlaktewater en meetpunten. De Baseline database wordt regelmatig geüpdatet (Vreeken & Elorche, 2011).

WAQUA

WAQUA is een tweedimensionaal hydraulisch model dat waterniveaus, waterafvoeren en concentraties van bepaalde stoffen in open water berekent. WAQUA werkt met gemiddelde afvoeren en concentraties en neemt hierbij aan dat deze afvoeren en concentraties niet variëren over de diepte van de gesimuleerde rivier of zee. WAQUA simuleert de variatie in afvoeren en concentraties in de lengte en breedte van een volume. Tevens maakt het programma deel uit van het Deltamodel.

Om een extra maatregel door te rekenen moet deze eerst worden ingepast in Baseline. Dit bestaat uit grondniveau, vegetatie, obstakels, etc. Hierna moeten de gegevens worden getransfereerd naar WAQUA, waarna WAQUA de gewenste uitkomsten berekent. Een overzicht van de gebruikte software is gegeven in tabel 2-1.

Bijlage E: Modeltechnische uitgangspunten

In de gebruikte modellen zijn enkele uitgangspunten verwerkt. Deze zijn overgenomen uit het rapport van Driessen & Waart (2016), aangezien de modellen ook van Royal HaskoningDHV zijn overgenomen. Deze modeltechnische uitgangspunten worden hieronder beschreven.

- Alle WAQUA berekeningen gebruiken dezelfde definitie-bestanden voor de ruwheden:
 - o roughcombination.karak_5_fQ_IJVD_Meren
 - o roughcombination.karak_5_fQ_Rijn
 - o roughcombination.karak_5_vast
- De Qh-relaties die zijn gebruikt als benedenstroomse randvoorwaarden, zijn afkomstig uit het Klimaatscenario W+ (Deltascenario's stoom en warm). Hierbij is aangenomen dat de zeespiegelstijging ten opzichte van 1985 35cm bedraagt:
 - o qh_Hardinxveld_ndb_dmref_35cm_lo
 - o qh_Krimpen_ad_Lek_ndb_dmref_35cm_lo
 - o qh_Ketelbrug_dmref_tmr2006
- De lateraal- en afvoergolven bestanden zijn aangeleverd door Deltares, en afkomstig van een studie van HKV naar effect van langsdammen;
- De gebruikte tijdstap is 0.25 minuut en de gebruikte ThetaC-waarde in alle berekeningen is 0.60.
- Waterstanden worden uitgevoerd op de as van de rivier. Ook zijn 100 meter uitvoerlocaties langs de bandijk, zoals gebruikt in het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNK), gebruikt om waterstandsresultaten te genereren.
- Het Regelwerk Hondsbroeksche Pleij zal in elke (stationaire en dynamische) berekening actief sturen op de afvoer door de Nederrijn. Bij een Lobith-afvoer kleiner dan 10.000 m³/s is het gehele regelwerk gesloten met uitzondering van de vertical slot opening in het midden van het regelwerk. De 11e opening vanaf de rivierzijde is dan geheel open. Bij afvoeren tussen de 10.000 m³/s en 16.000 m³/s staat het regelwerk geheel dicht. Voor afvoeren hoger dan 16.000 m³/s bij Lobith stuurt het regelwerk actief, zodat de afvoer naar de Neder-Rijn gemaximaliseerd wordt op 3.380 m³/s.
- Het Regelwerk Pannerden heeft in de dynamische berekeningen een vaste drempelhoogte welke per variant kan variëren. De drempelhoogte is daarvoor voor elke variant afgeleid in een stationaire berekening met een Lobith afvoer van 17.000 m³/s waarbij het regelwerk actief stuurt op een beleidsmatige afvoer van 10.970 m³/s door de Waal.
- De initiële berekening (naam van berekening eindigt met '_500_5736') die voor elk WAQUA model is uitgevoerd, gebruikt een waterstandsveld bij 500 m³/s, afgeleid met waqini in Baseline 5, om acht verschillende debietniveaus af te leiden. De waterstands- en stroomsnelheidsvelden van deze debietniveaus zijn vervolgens gebruikt als initiële toestanden waar de 9 dynamische berekeningen (naam van berekening eindigt met 'dyn') mee zijn gestart. Er zijn dynamische berekeningen (afvoergolven) bij 9 verschillende afvoerniveaus gemaakt; van 6.000 m³/s tot 20.000 m³/s.

Bijlage F: Overzicht uitgevoerde berekeningen

Tabel F-2: Overzicht van uitgevoerde berekeningen (Driessen & Waart, 2016)

Codenaam	Toelichting
splpstud_X-v2_17000	Stationaire berekening met ontwerpafvoer waarin drempelhoogte wordt bepaald
splpstud_X-v2_500_5736	Initiële berekening waarin debietniveaus worden afgeleid en er een realistische situatie wordt gecreëerd voor dynamische afvoergolven, zoals initiële debietniveaus
splpstud_X-v2_6000dyn	Dynamische berekening met maximaal afvoerniveau van 6000 m ³ /s
splpstud_X-v2_8000dyn	Dynamische berekening met maximaal afvoerniveau van 8000 m ³ /s
splpstud_X-v2_10000dyn	Dynamische berekening met maximaal afvoerniveau van 10000 m ³ /s
splpstud_X-v2_13000dyn	Dynamische berekening met maximaal afvoerniveau van 13000 m ³ /s
splpstud_X-v2_16000dyn	Dynamische berekening met maximaal afvoerniveau van 16000 m ³ /s
splpstud_X-v2_16500dyn	Dynamische berekening met maximaal afvoerniveau van 16500 m ³ /s
splpstud_X-v2_17000dyn	Dynamische berekening met maximaal afvoerniveau van 17000 m ³ /s
splpstud_X-v2_18000dyn	Dynamische berekening met maximaal afvoerniveau van 18000 m ³ /s
splpstud_X-v2_20000dyn	Dynamische berekening met maximaal afvoerniveau van 20000 m ³ /s

Bijlage G: Resultaten referentievariant

Tabel G-1: Afvoerverdeling in referentiesituatie bij verschillende afvoeren (Driessen & Waart, 2016)

6000		8000		10000		13000			
Q-Lobith		6.000,3	7.987,9	9.998,0	13.004,1				
Q-Waal		4.040,5	5.298,9	6.557,3	8.571,4				
Q-Pankanaal		1.951,7	2.653,1	3.432,3	4.427,7				
Q-Nederrijn		1.081,9	1.518,9	2.039,0	2.633,3				
Q-IJssel		837,4	1.116,0	1.407,6	1.795,4				
Q-RW-Pannerden		0,0	0,0	0,0	78,1				
Q-RW-HPleij		8,4	20,7	30,2	30,5				
16000		16500		17000		18000		20000	
16.004,2		16.505,0		17.004,1		18.002,2		20.002,5	
10.430,9		10.720,2		10.982,8		11.492,9		12.477,2	
5.565,4		5.775,9		6.019,0		6.501,9		7.521,9	
3.249,2		3.363,0		3.386,2		3.525,4		3.998,5	
2.314,5		2.408,1		2.649,3		2.976,9		3.523,4	
311,6		356,0		397,5		486,8		688,7	
30,3		30,4		450,1		927,2		1.112,4	

Bijlage H: Resultaten variant A (1)

Tabel H-1: Afvoerverdeling variant A bij 17000 m³/s en in () de verschillen t.o.v. referentiesituatie (Driessen & Waart, 2016)

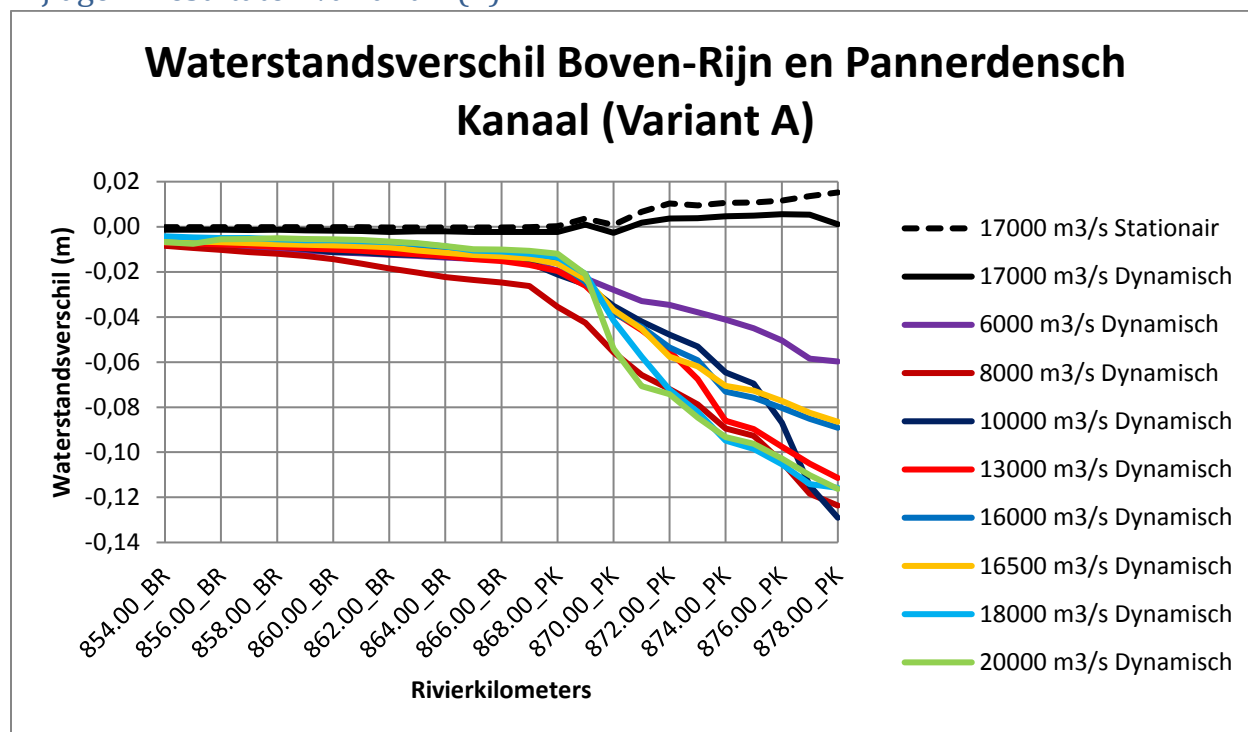
	Beleid	last 25	max 25	max 13	max
Q-Lobith	17000	16998,2 (1,2)	17002,6 (1,0)	17005,2 (1,1)	17017,1 (-0,4)
Q-Waal	10970	10969,7 (-2,0)	10979,1 (-4,0)	10978,1 (-4,7)	10988,6 (-3,7)
Q-Pankanaal	6030	6038,1 (5,9)	6017,3 (-2,1)	6016,6 (-2,3)	6021,2 (-2,7)
Q-Nederrijn	3380	3378,4 (-1,3)	3375,4 (-6,8)	3376,7 (-9,4)	3383,7 (-7,8)
Q-IJssel	2656	2655,4 (5,7)	2627,3 (1,9)	2627,4 (-21,9)	2627,5 (-45,6)
Q-RW-Pannerden	-	420,7 (21,1)	410,2 (12,6)	410,1 (12,6)	411,0 (12,6)
Q-RW-HPleij ¹	-	29,7 (-426,3)	28,9 (-401,4)	30,3 (-419,8)	30,9 (-440,5)

Tabel H-2: Afvoerverdeling bij variant A bij verschillende afvoeren, max13-waarden, in () de verschillen t.o.v. referentiesituatie (Driessen & Waart, 2016)

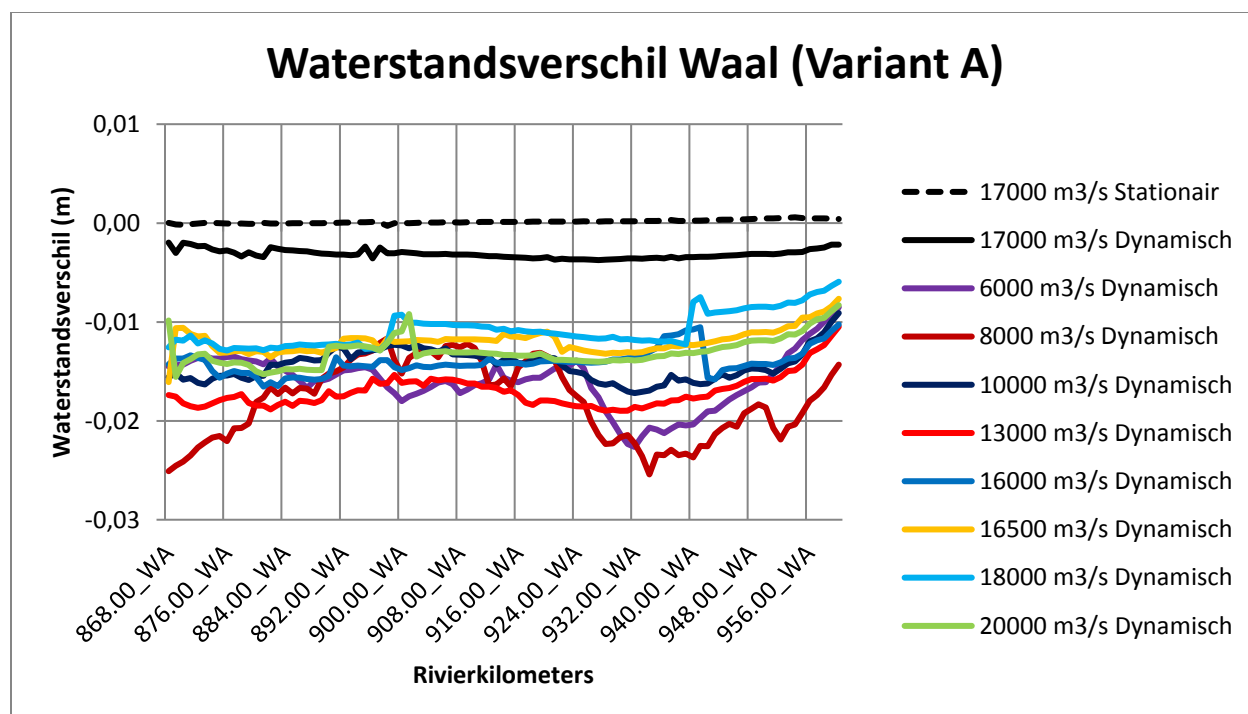
6000		8000		10000		13000			
Q-Lobith	6.000,4 (0,1)	7.988,5 (0,6)	9.997,4 (-0,6)	13.004,1 (0,0)					
Q-Waal	4.024,3 (-16,2)	5.265,8 (-33,1)	6.530,1 (-27,2)	8.536,3 (-35,1)					
Q-Pankanaal	1.968,8 (17,1)	2.684,2 (31,0)	3.459,5 (27,1)	4.463,2 (35,5)					
Q-Nederrijn	1.063,6 (-18,3)	1.431,0 (-87,9)	1.898,3 (-140,8)	2.512,8 (-120,5)					
Q-IJssel	879,1 (41,7)	1.224,3 (108,2)	1.571,1 (163,5)	1.951,6 (156,2)					
Q-RW-Pannerden	0,0 (0,0)	0,0 (0,0)	0,0 (0,0)	82,4 (4,3)					
Q-RW-HPleij	2,8 (-5,6)	19,6 (-1,2)	29,9 (-0,3)	30,5 (-0,1)					
16000		16500		17000		18000		20000	
Q-Lobith	16.004,0 (-0,1)	16.501,0 (-4,0)	17.005,2 (1,1)	18.005,9 (3,7)	20.003,5 (1,0)				
Q-Waal	10.399,0 (-31,9)	10.694,9 (-25,3)	10.978,1 (-4,7)	11.465,7 (-27,2)	12.446,8 (-30,4)				
Q-Pankanaal	5.596,6 (31,2)	5.801,0 (25,1)	6.016,6 (-2,3)	6.537,8 (35,9)	7.553,4 (31,5)				
Q-Nederrijn	3.152,2 (-97,0)	3.261,8 (-101,2)	3.376,7 (-9,4)	3.393,1 (-132,3)	3.867,2 (-131,3)				
Q-IJssel	2.444,4 (129,9)	2.534,9 (126,8)	2.627,4 (-21,9)	3.137,1 (160,3)	3.685,2 (161,8)				
Q-RW-Pannerden	319,5 (7,9)	363,7 (7,7)	410,1 (12,6)	495,9 (9,1)	699,2 (10,5)				
Q-RW-HPleij	30,5 (0,2)	30,4 (0,0)	30,3 (-419,8)	946,8 (19,6)	1.152,3 (40,0)				

¹ Zie pagina 10 uitleg over misleidende werking max-waarden.

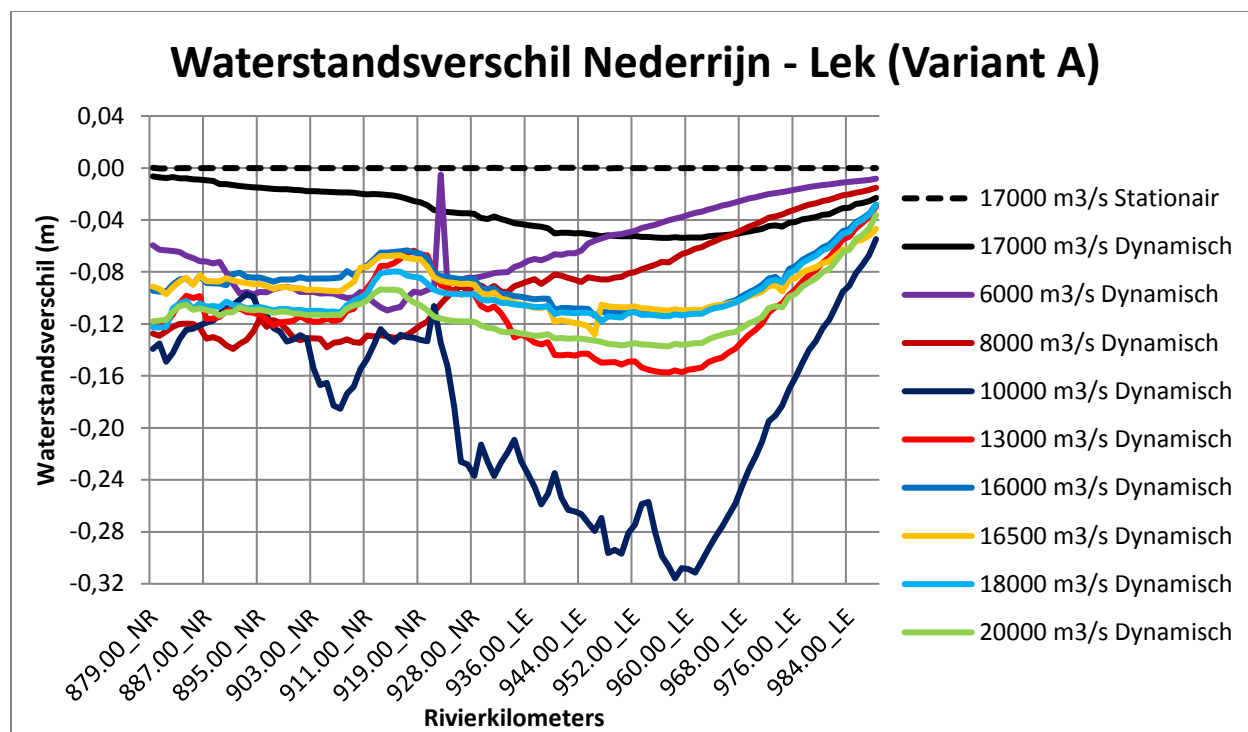
Bijlage I: Resultaten variant A (2)



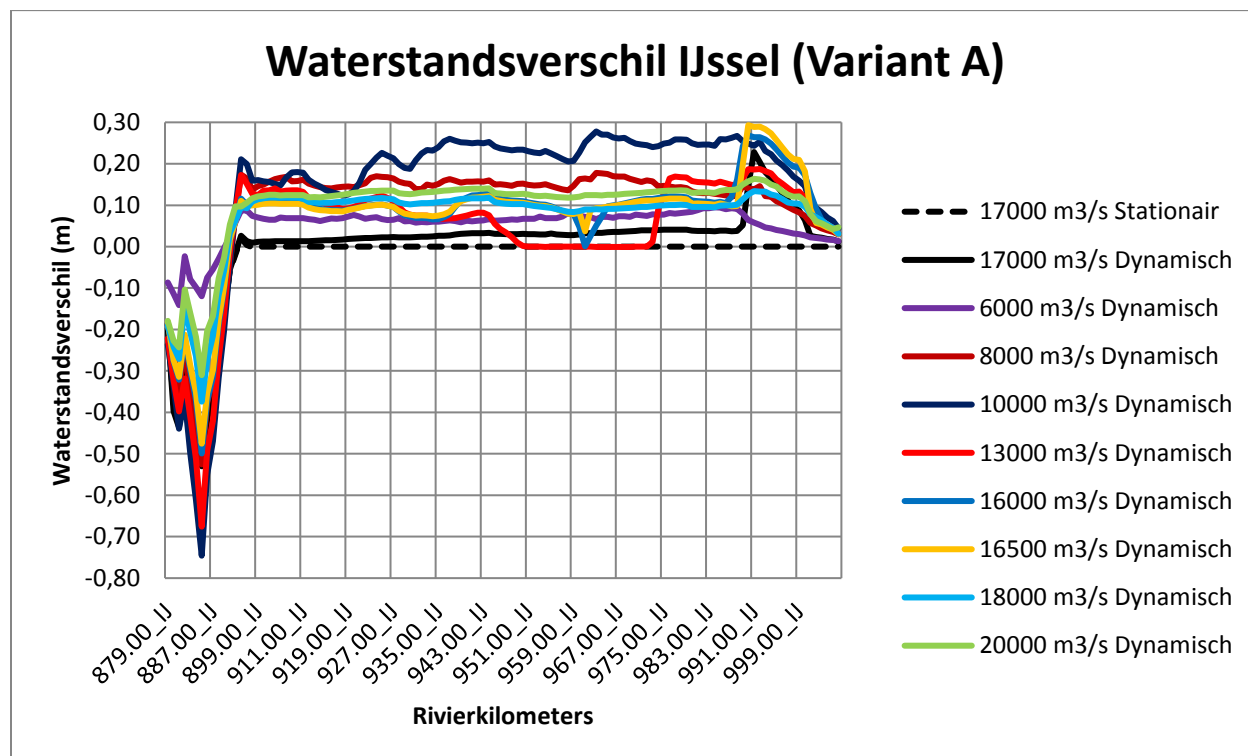
Figuur I-1: Waterstandverschillen Bovenrijn en Pannerdensch Kanaal (Driessen & Waart, 2016)



Figuur I-2: Waterstandverschillen Waal (Driessen & Waart, 2016)



Figuur I-3: Waterstandsverschillen Nederrijn/Lek (Driessen & Waart, 2016)

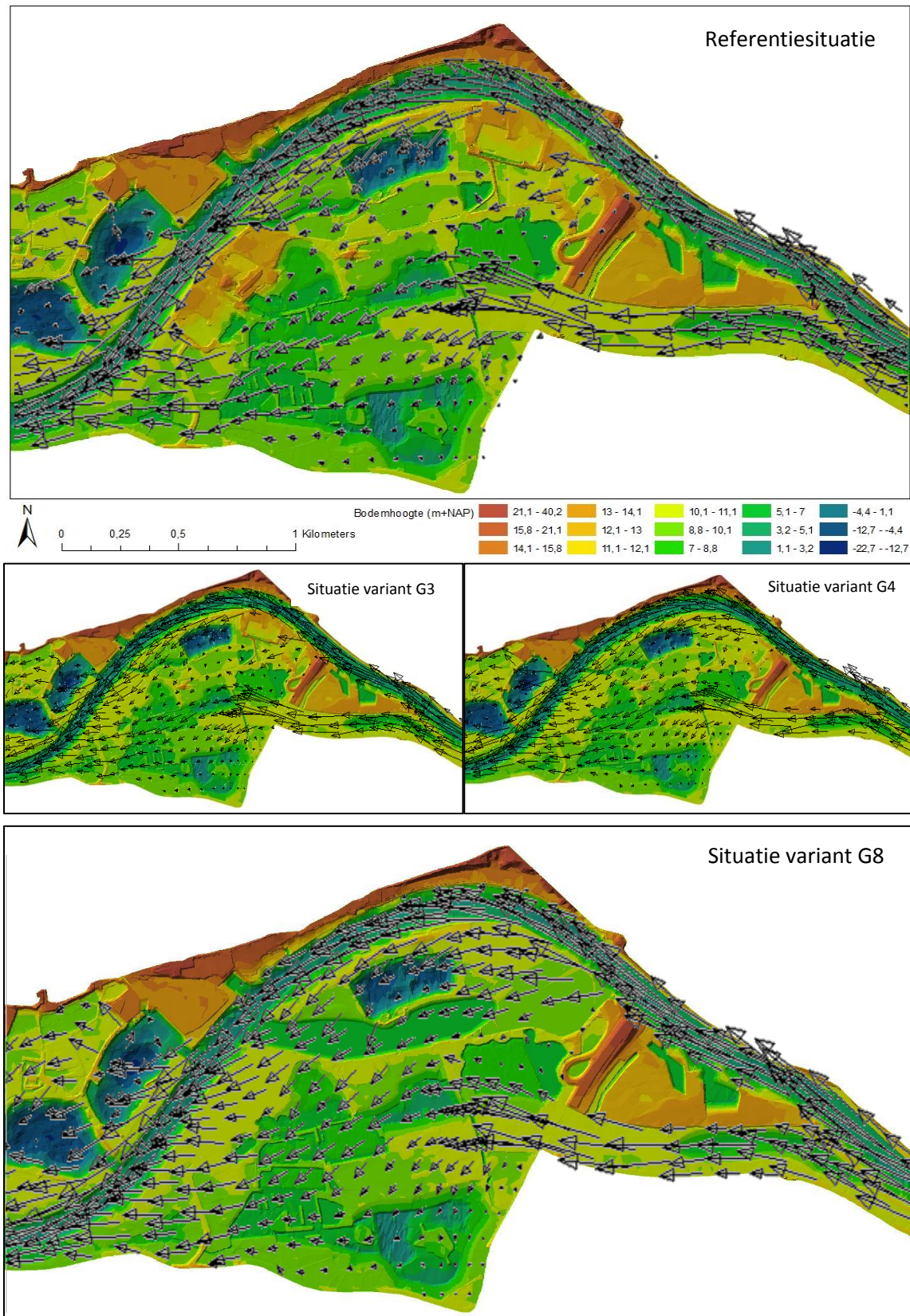


Figuur I-4: Waterstandsverschillen IJssel (Driessen & Waart, 2016)

Bijlage J: Resultaten stationaire berekeningen

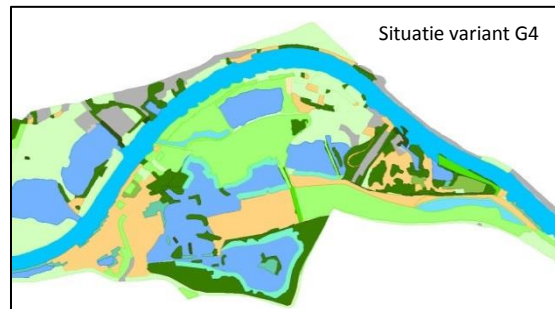
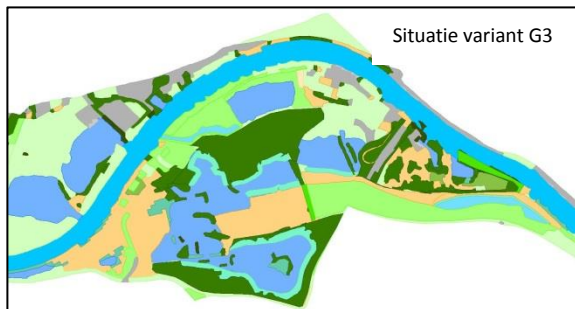
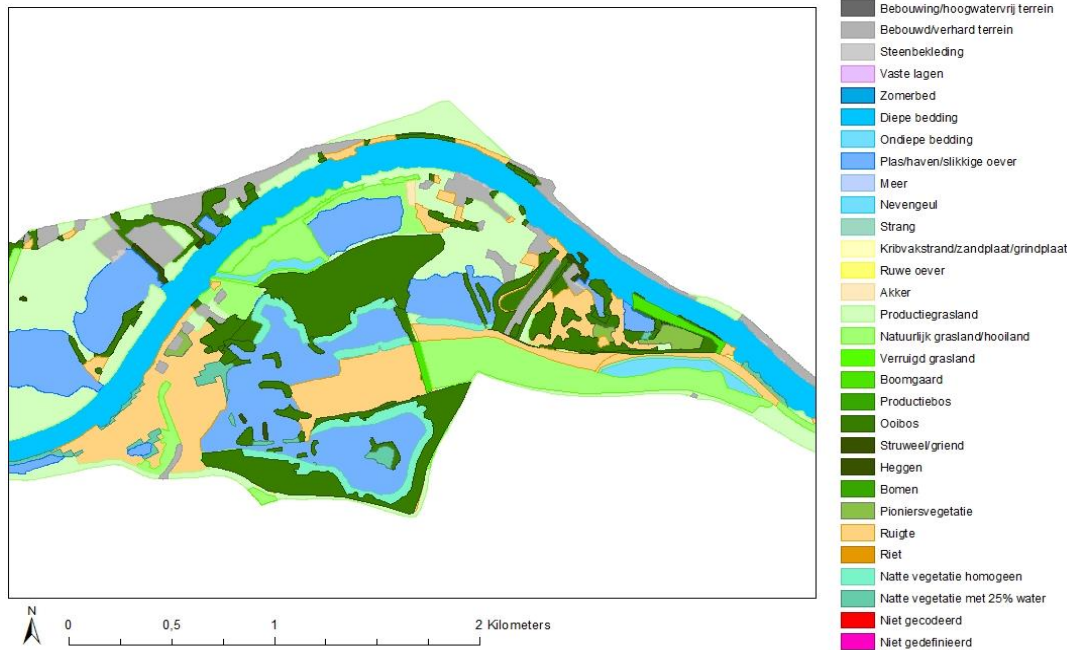
Waterhoogtes	r	A	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8		G1-A	G2-A	G3-A	G4-A	G5-A	G6-A	G7-A	G8-A
874,00_PK	15,036	15,047	15,041	15,0402	15,029	14,994	14,9933	14,9919	14,9898	14,972		-0,006	-0,007	-0,018	-0,053	-0,054	-0,055	-0,057	-0,075
875,00_PK	15,001	15,011	15,006	15,0043	14,993	14,957	14,9563	14,9549	14,9527	14,9345		-0,006	-0,007	-0,019	-0,054	-0,055	-0,056	-0,059	-0,077
876,00_PK	14,904	14,915	14,909	14,9079	14,896	14,858	14,857	14,8557	14,853	14,834		-0,006	-0,007	-0,020	-0,057	-0,058	-0,059	-0,062	-0,081
877,00_PK	14,812	14,826	14,819	14,8176	14,805	14,765	14,7635	14,7622	14,7591	14,739		-0,006	-0,008	-0,021	-0,061	-0,062	-0,063	-0,066	-0,086
878,00_PK	14,744	14,759	14,752	14,7507	14,737	14,695	14,6941	14,6928	14,6895	14,6683		-0,007	-0,008	-0,022	-0,064	-0,065	-0,066	-0,070	-0,091
879,00_NR	14,647	14,647	14,640	14,6388	14,625	14,584	14,5821	14,5809	14,5777	14,5566		-0,007	-0,008	-0,022	-0,063	-0,065	-0,066	-0,069	-0,090
880,00_NR	14,546	14,546	14,538	14,5366	14,522	14,478	14,4761	14,4745	14,4711	14,4488		-0,007	-0,009	-0,023	-0,068	-0,069	-0,071	-0,074	-0,097
881,00_NR	14,439	14,438	14,430	14,4285	14,413	14,365	14,3637	14,3618	14,3583	14,3343		-0,008	-0,010	-0,025	-0,073	-0,075	-0,076	-0,080	-0,104
882,00_NR	14,212	14,212	14,203	14,2007	14,184	14,131	14,1294	14,1275	14,1238	14,0973		-0,009	-0,011	-0,028	-0,081	-0,082	-0,084	-0,088	-0,115
883,00_NR	13,902	13,902	13,890	13,8872	13,869	13,791	13,7884	13,7862	13,7808	13,7395		-0,012	-0,015	-0,033	-0,111	-0,113	-0,116	-0,121	-0,162
884,00_NR	13,673	13,673	13,658	13,6551	13,636	13,533	13,529	13,5266	13,5201	13,4958		-0,016	-0,018	-0,038	-0,140	-0,144	-0,147	-0,153	-0,177
885,00_NR	13,530	13,530	13,523	13,5214	13,487	13,488	13,4882	13,4857	13,4796	13,4798		-0,007	-0,008	-0,043	-0,041	-0,041	-0,044	-0,050	-0,050
886,00_NR	13,358	13,358	13,365	13,365	13,388	13,396	13,3962	13,3964	13,3978	13,4004		0,007	0,007	0,030	0,038	0,038	0,039	0,040	0,043
887,00_NR	13,249	13,249	13,249	13,2488	13,249	13,248	13,248	13,2482	13,2481	13,2482		-0,001	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001
888,00_NR	13,124	13,123	13,123	13,1228	13,124	13,123	13,1231	13,1232	13,1232	13,1233		-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
889,00_NR	12,939	12,939	12,938	12,9383	12,939	12,938	12,9382	12,9382	12,9382	12,9383		-0,001	-0,001	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001
Drempelhoogtes regelwerk																			
HP11	11,40	13,70	13,46	13,39	13,01	12,07	12,04	12,02	11,95	11,60		-0,24	-0,31	-0,69	-1,63	-1,66	-1,68	-1,75	-2,10
HPalle	13,40	15,04	15,01	15,00	14,96	14,85	14,85	14,85	14,84	14,80		-0,03	-0,04	-0,08	-0,19	-0,19	-0,19	-0,20	-0,24
												Varianten t.o.v. referentie							
												G1-r	G2-r	G3-r	G4-r	G5-r	G6-r	G7-r	G8-r
												2,06	1,99	1,61	0,67	0,64	0,62	0,55	0,20
												1,61	1,60	1,56	1,45	1,45	1,45	1,44	1,40

Bijlage K: Hoogtemodellen met stroomschema's bij verschillende situaties



Bijlage L: Landschap in verschillende situaties

Referentiesituatie



Bijlage M: Resultaten verschillende varianten (1)

Tabel M-1: Afvoergroottes en afvoerverschillen variant G3 t.o.v. variant A

	last 25	max 25	max 13	max
Q-Lobith	16999,5 (1,3)	17001,1 (-1,5)	17003,8 (-1,3)	17013,2 (-3,8)
Q-Waal	10969,9 (0,2)	10983,8 (4,7)	10984 (5,9)	10993,4 (4,7)
Q-Pankanaal	6032,9 (-5,1)	6012,9 (-4,4)	6013,3 (-3,4)	6015,9 (-5,3)
Q-Nederrijn	3380,3 (1,9)	3380,8 (5,4)	3380,7 (4)	3382 (-1,6)
Q-IJssel	2649,9 (-5,6)	2624,4 (-2,9)	2624,9 (-2,5)	2626 (-1,5)
Q-RW-Pannerden	400,8 (-20)	397,1 (-13,1)	397,1 (-13,1)	397,7 (-13,3)
Q-RW-HPleij	56 (30,4)	28,7 (-0,2)	30,1 (-0,2)	30,9 (-0,1)

Tabel M-2: Afvoergroottes en afvoerverschillen variant G4 t.o.v. variant A

	last 25	max 25	max 13	max
Q-Lobith	17000,4 (2,3)	17002,5 (-0,1)	17005,6 (0,4)	17016 (-1,1)
Q-Waal	10971,1 (1,4)	10986,3 (7,2)	10985 (6,9)	10997,3 (8,7)
Q-Pankanaal	6023,9 (-14,1)	6013,5 (-3,8)	6013,4 (-3,2)	6017,5 (-3,7)
Q-Nederrijn	3379 (0,6)	3379,8 (4,3)	3382 (5,2)	3384,3 (0,6)
Q-IJssel	2658,5 (3,1)	2629,5 (2,2)	2641,9 (14,6)	2654,1 (26,6)
Q-RW-Pannerden	365,5 (-55,3)	371 (-39,2)	371 (-39,1)	371,5 (-39,6)
Q-RW-HPleij	127,4 (101,9)	76,3 (47,3)	84,7 (54,4)	93,7 (62,8)

Tabel M-3: Afvoergroottes en afvoerverschillen variant G8 t.o.v. variant A

	last 25	max 25	max 13	max
Q-Lobith	16999,2 (1)	17000,8 (-1,8)	17002,7 (-2,4)	17015,2 (-1,9)
Q-Waal	10970,5 (0,8)	10986,5 (7,4)	10985,3 (7,2)	10996,5 (7,9)
Q-Pankanaal	6035,2 (-2,9)	6014,3 (-2,9)	6014,6 (-2,1)	6018,6 (-2,6)
Q-Nederrijn	3380,4 (2)	3379,7 (4,2)	3382,3 (5,5)	3385,2 (1,6)
Q-Yssel	2649,4 (-6)	2625,1 (-2,2)	2639,9 (12,5)	2655,1 (27,6)
Q-RW-Pannerden	358,7 (-62)	353,6 (-56,6)	353,7 (-56,5)	354,2 (-56,9)
Q-RW-Hpleij	164,5 (138,9)	109 (80)	118,9 (88,6)	129 (98,1)

Bijlage N: Resultaten verschillende varianten (2)

Tabel N-1: Afvoerverdeling bij variant G3 bij verschillende afvoeren, max13-waarden

	6000	8000	10000	13000	16000	16500	17000	18000	20000
Lobith	6.000,4	7.988,5	9.996,9	13.004,2	16.003,4	16.502,1	17.003,8	18.005,3	20.003,7
Waal	4.024,0	5.265,2	6.529,3	8.536,8	10.402,8	10.698,6	10.984,0	11.469,6	12.454,0
PanKan	1.969,0	2.685,2	3.459,9	4.462,3	5.593,8	5.798,5	6.013,3	6.533,6	7.546,5
Nederrijn	1.062,8	1.434,6	1.904,2	2.521,7	3.156,9	3.267,4	3.380,7	3.393,6	3.874,8
IJssel	879,8	1.222,5	1.568,8	1.942,6	2.437,1	2.526,7	2.624,9	3.119,4	3.671,3
RWPan	-	-	-	74,6	307,5	351,1	397,1	482,3	682,5
RWHPleij	2,8	19,5	29,8	30,3	30,4	30,3	30,1	940,2	1.147,3

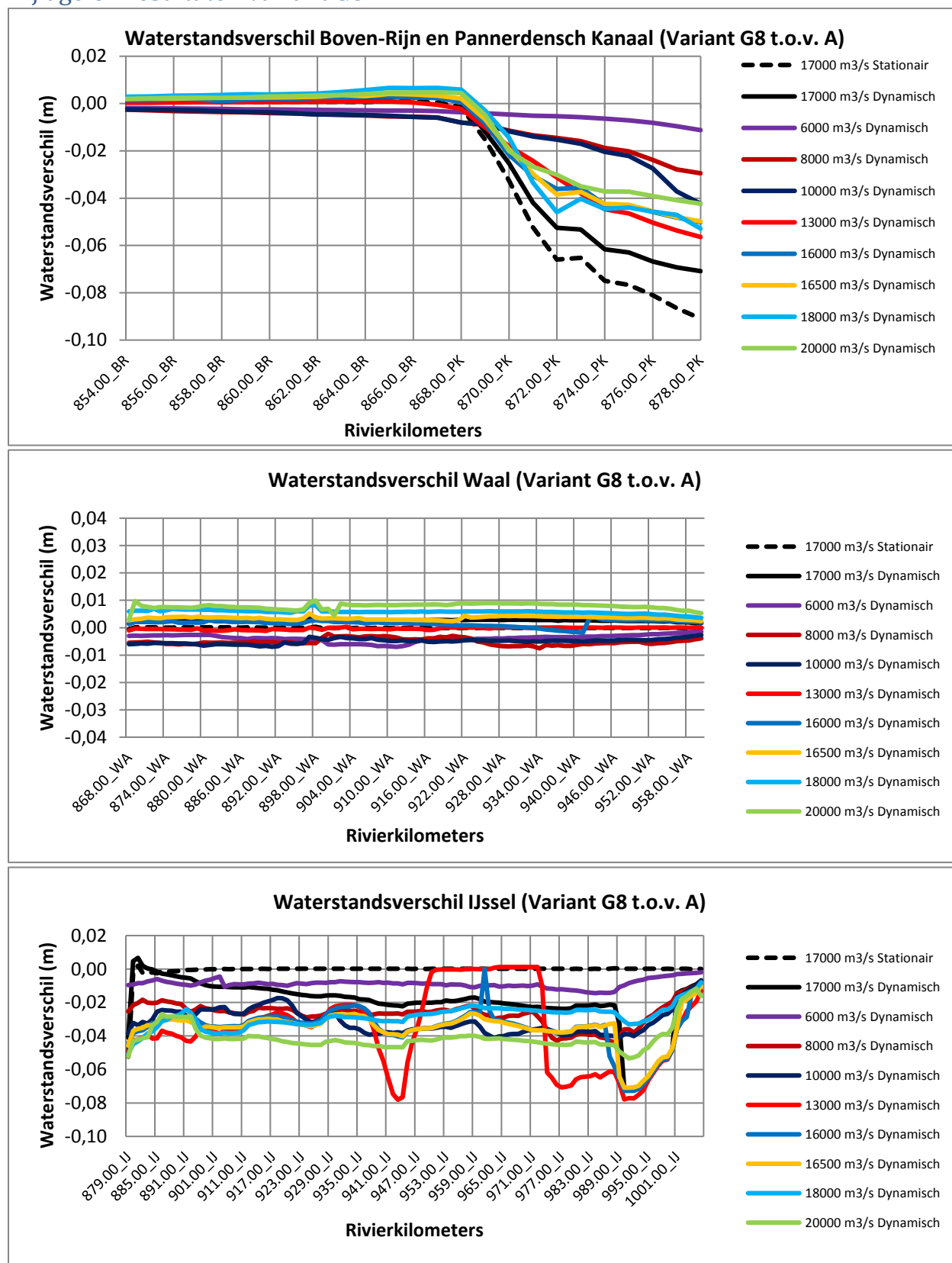
Tabel N-2: Afvoerverdeling bij variant G4 bij verschillende afvoeren, max13-waarden

	6000	8000	10000	13000	16000	16500	17000	18000	20000
Lobith	6.000,5	7.988,4	9.997,1	13.004,2	16.002,1	16.503,4	17.005,6	18.004,9	20.003,0
Waal	4.023,4	5.262,3	6.525,3	8.537,2	10.403,4	10.701,7	10.985,0	11.475,8	12.459,2
PanKan	1.969,6	2.689,8	3.463,9	4.462,1	5.592,7	5.793,6	6.013,4	6.525,2	7.540,6
Nederrijn	1.064,4	1.447,8	1.920,5	2.539,4	3.175,0	3.283,9	3.382,0	3.406,7	3.892,0
IJssel	879,1	1.215,0	1.554,8	1.924,2	2.417,5	2.506,8	2.641,9	3.094,8	3.648,1
RWPan	-	-	-	59,9	283,5	326,2	371,0	454,9	651,8
RWHPleij	2,7	19,3	29,3	30,0	30,0	30,0	84,7	930,5	1.139,6

Tabel N-3: Afvoerverdeling bij variant G8 bij verschillende afvoeren, max13-waarden

	6000	8000	10000	13000	16000	16500	17000	18000	20000
Lobith	6.000,5	7.988,2	9.996,8	13.004,2	16.004,2	16.502,1	17.002,7	18.005,5	20.002,3
Waal	4.021,4	5.258,8	6.522,3	8.536,5	10.405,2	10.703,3	10.985,3	11.480,7	12.465,6
PanKan	1.971,4	2.693,4	3.466,6	4.463,1	5.591,0	5.791,9	6.014,6	6.519,8	7.535,3
Nederrijn	1.065,7	1.462,0	1.934,7	2.554,8	3.187,3	3.295,9	3.382,3	3.420,3	3.901,9
IJssel	875,7	1.207,1	1.544,7	1.909,2	2.403,4	2.492,9	2.639,9	3.078,3	3.632,1
RWPan	-	-	-	50,7	267,9	310,0	353,7	437,1	632,0
RWHPleij	2,1	19,1	29,0	29,6	29,6	29,6	118,9	923,9	1.133,8

Bijlage O: Resultaten variant G8



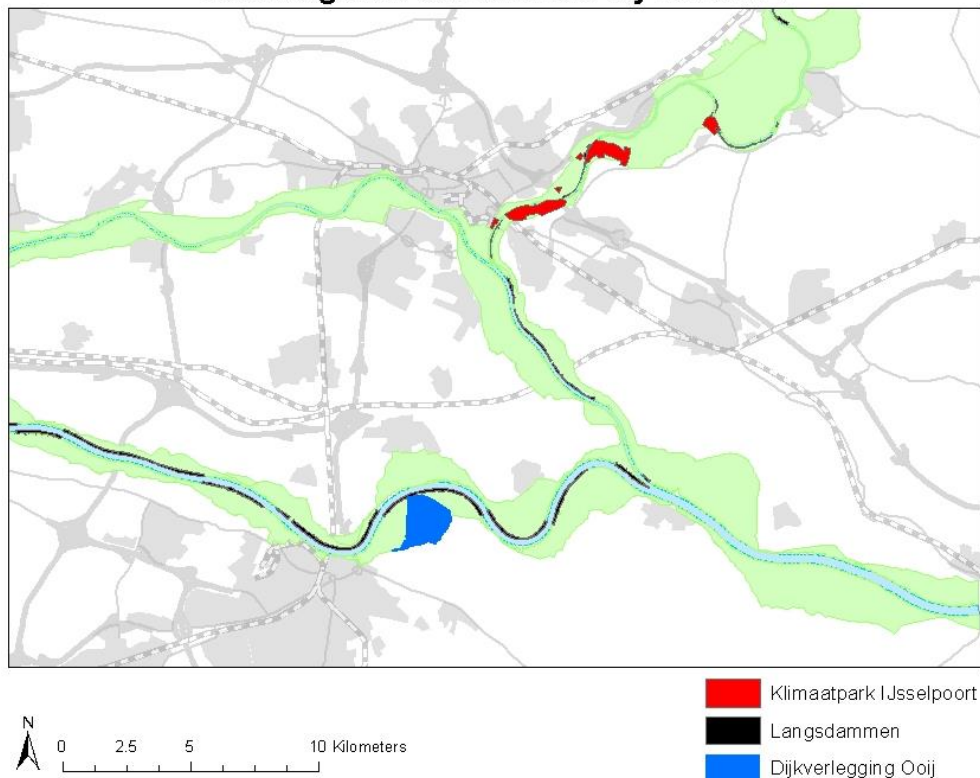
Bijlage P: Analyse variant F

Ter oefening van het werken met en begrijpen van de programma's ArcGIS, Baseline en WAQUA is er een testberekening uitgevoerd. Deze berekening bestond uit het inmixen van enkele maatregelen in de referentievariant, met als voorkeur een combinatie van maatregelen die nog niet was uitgevoerd door Royal HaskoningDHV. Deze nieuwe variant is variant F genoemd en bestaat uit de referentiesituatie 2050 met de volgende ingemixte maatregelen:

- Klimaatpark IJsselpoort
 - o ij_ijnoord_a2
 - o ij_kopwmax_a1
 - o ij_wvoortg_a1
- Langsdammen
 - o wl_dvr2ld4_a6
 - o pk_dvr2ld4_a3
 - o ij_dvr2ld4_a3
- Dijkverlegging Ooij
 - o wld_dvl-oj_a2

De resultaten hiervan zijn hieronder te vinden en zullen op dezelfde manier opgebouwd worden als in paragraaf 3.3 is gedaan. Er wordt begonnen met de instelling van de regelwerken, daarna zullen de afvoerverdelingen worden geanalyseerd en als laatste zullen de waterstanden worden getoond.

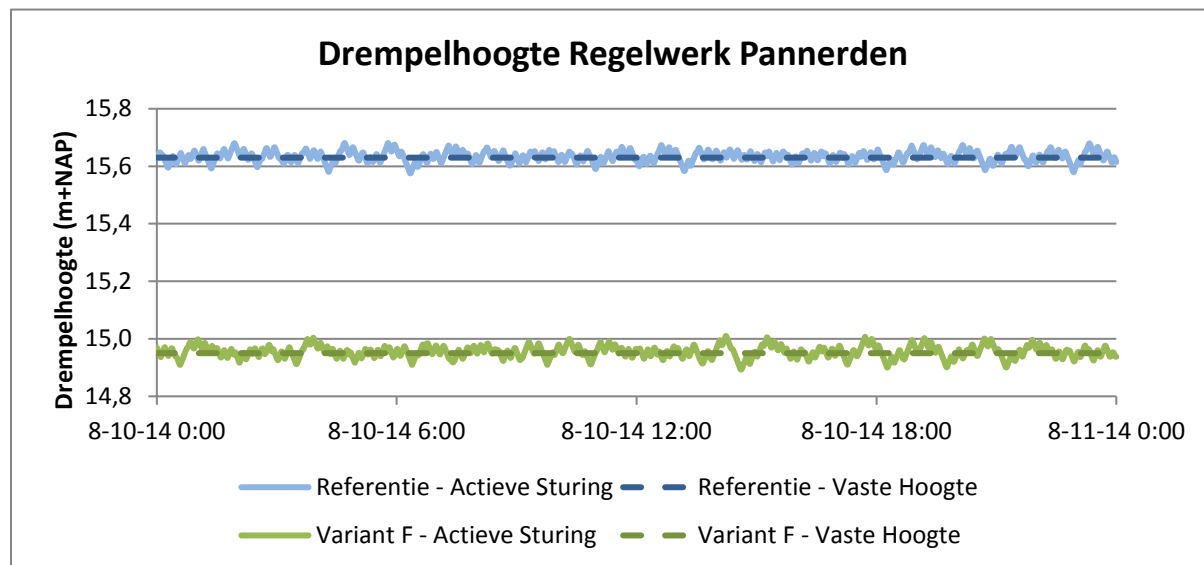
Maatregelen behorende bij variant F



Figuur P-1: Maatregelen behorende bij variant F

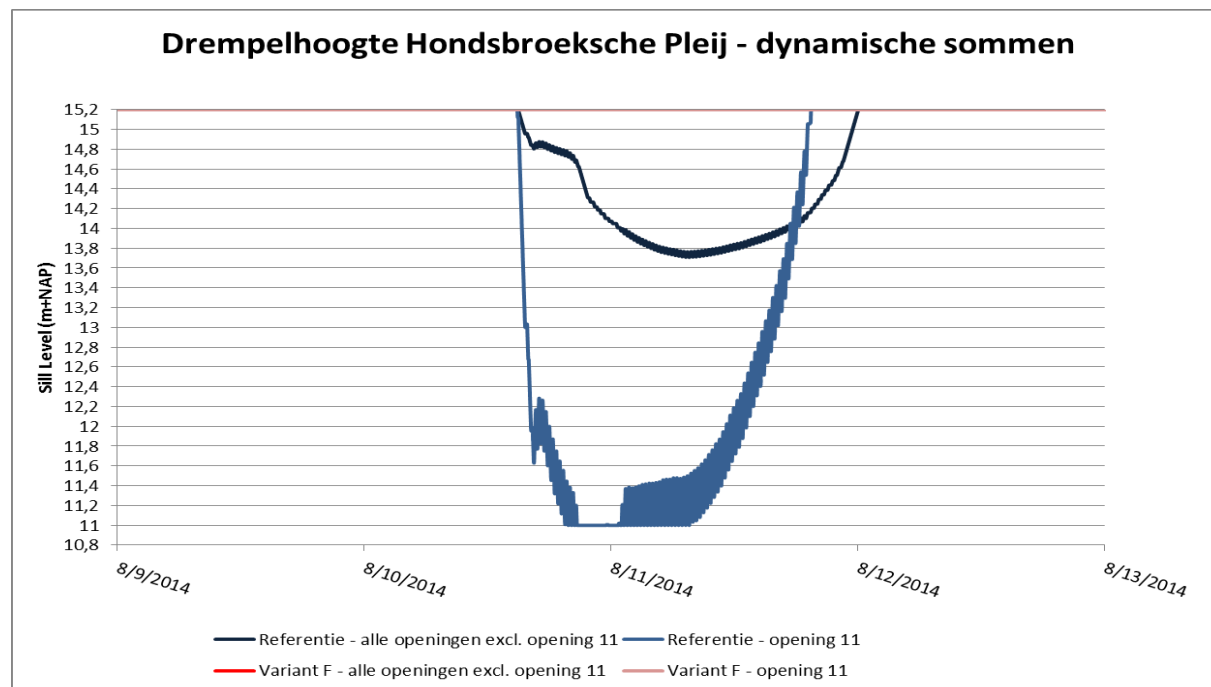
Instelling regelwerk Pannerden

Zoals bekend wordt het regelwerk Pannerden ingesteld door middel van een stationaire berekening. In onderstaande figuur is te zien wat de drempelhoogte is in de referentiesituatie en in de nieuwe situatie, variant F.



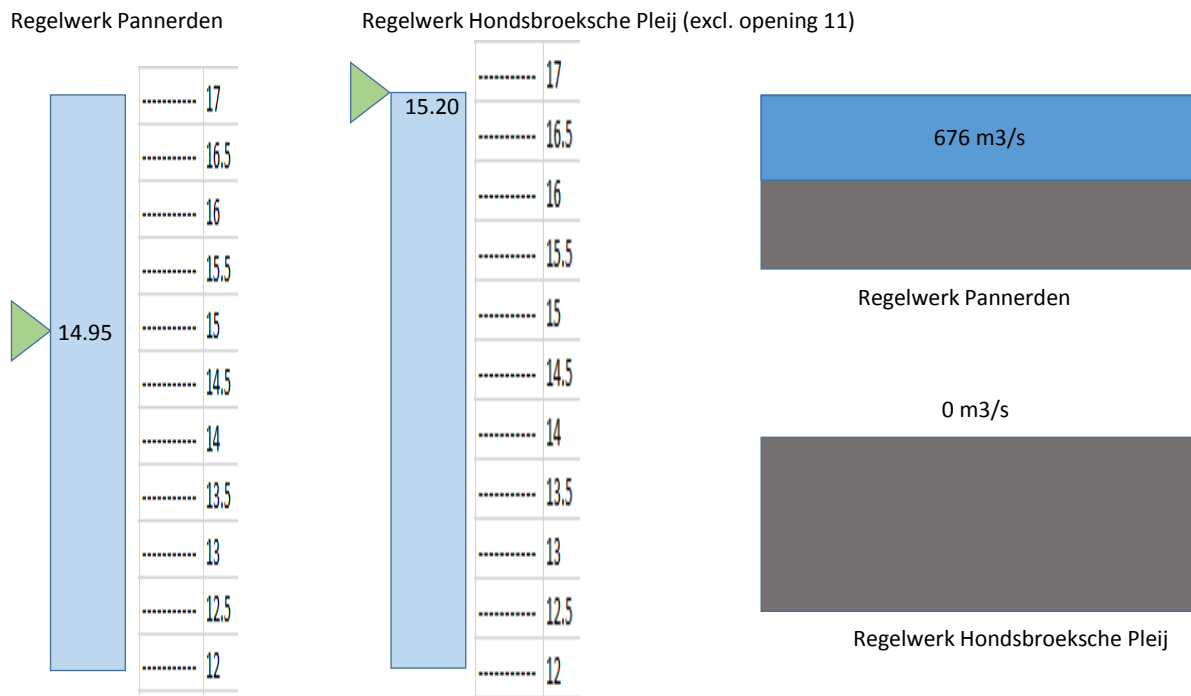
Figuur P-2: Drempelhoogte Regelwerk Pannerden

Uit de figuur kan geconcludeerd worden dat het regelwerk Pannerden in deze situatie ingesteld moet worden op 14,95 m+NAP.

Instelling regelwerk Hondsbroeksche Pleij

Figuur P-3: Drempelhoogte regelwerk Hondsbroeksche Pleij

Zoals te verwachten was doordat Klimaatpark IJsselpoort onderdeel is van variant F, moet het regelwerk Hondsbroeksche Pleij helemaal sluiten om de afvoerverdeling correct proberen te houden. Samenvattend is in onderstaande figuur de instelling van beide regelwerken gegeven.



Figuur P-4: Instelling beide regelwerken

Afvoerverdeling

In dit deel zullen de afvoerverdelingen bij variant F met behulp van tabellen worden geanalyseerd.

Tabel P-1: Verschillen t.o.v. referentiesituatie

		Stationair	Dynamisch		
		last 25	max 25	max 13	max
	Sturing Pannerden	Actief	Vast	Vast	Vast
	Sturing HPleij	Actief	Actief	Actief	Actief
Lobith	Q-Lobith	2,8	-0,3	-0,4	-5,5
Waal	Q-Waal	-2,0	-10,6	-11,8	-9,4
Pannerdensch Kanaal	Q-Pankanaal	-2,2	4,1	4,6	2,0
Nederrijn/Lek	Q-Nederrijn	-29,5	-39,0	-41,9	-40,5
IJssel	Q-IJssel	36,0	51,7	27,9	5,1
Pannerdensche Overlaat	Q-RW-Pannerden	276,3	275,1	275,1	275,1
Hondsbroeksche Pleij	Q-RW-HPleij	-456,0	-401,3	-419,8	-440,6

Uit deze tabellen blijkt dat het regelwerk Pannerden goed in staat is om de afvoerverdeling in stand te houden. Zowel het debiet van de Waal en het Pannerdensch Kanaal verschilt weinig van de referentiesituatie en tevens van de beleidsmatige afvoer. Door het regelwerk Pannerden stroomt ruim 275 m³/s water meer dan in de referentiesituatie, de oorzaak hiervan is voornamelijk de maatregel bij Ooij, die meer water naar de Waal trekt.

Het regelwerk Hondsbroeksche Pleij is bij maximale drempelhoogte nog niet in staat de afvoerverdeling correct te corrigeren bij de IJsselkop. In de dynamische sommen verschilt deze ruim van zowel de afvoerverdeling in de referentiesituatie als de beleidsmatige afvoerverdeling. Dit is te wijten aan Klimaatpark IJsselpoort, met daarbij nog de langsdammen die ook in de IJssel gesitueerd zijn. Hierdoor wordt het verstorende effect wat het Klimaatpark al had nog maar eens versterkt. In tabel P-2 zijn de verschillen in afvoerverdeling met de referentiesituatie bij alle (middel)hoge afvoeren te zien. Hierbij valt vooral op dat bij alle afvoeren de afvoerverdeling op de IJsselkop nog minder correct is dan in variant A.

Tabel P-2: Variant F: verschillen in afvoerverdeling met referentiesituatie, max13-waarden

Debiet bij	6000	8000	10000	13000	16000	16500	17000	18000	20000
Lobith	0,0	0,0	2,6	0,7	-0,7	-6,5	-0,4	3,7	0,0
Waal	-68,3	-85,3	-65,4	-71,4	-55,0	-44,0	-11,8	-6,1	37,4
PanKanaal	67,8	81,6	70,6	72,8	54,2	37,7	4,6	16,9	-38,7
Nederrijn	-8,7	-65,7	-138,5	-130,1	-121,5	-131,2	-41,9	-133,0	-198,8
IJssel	81,8	163,2	210,5	203,1	177,8	177,6	27,9	150,0	160,7
RWPan	0,0	0,0	33,9	183,2	255,9	263,7	275,1	286,1	312,0
RWHPleij	-2,9	-0,5	-0,5	-0,2	0,1	-0,2	-419,8	-138,0	10,3

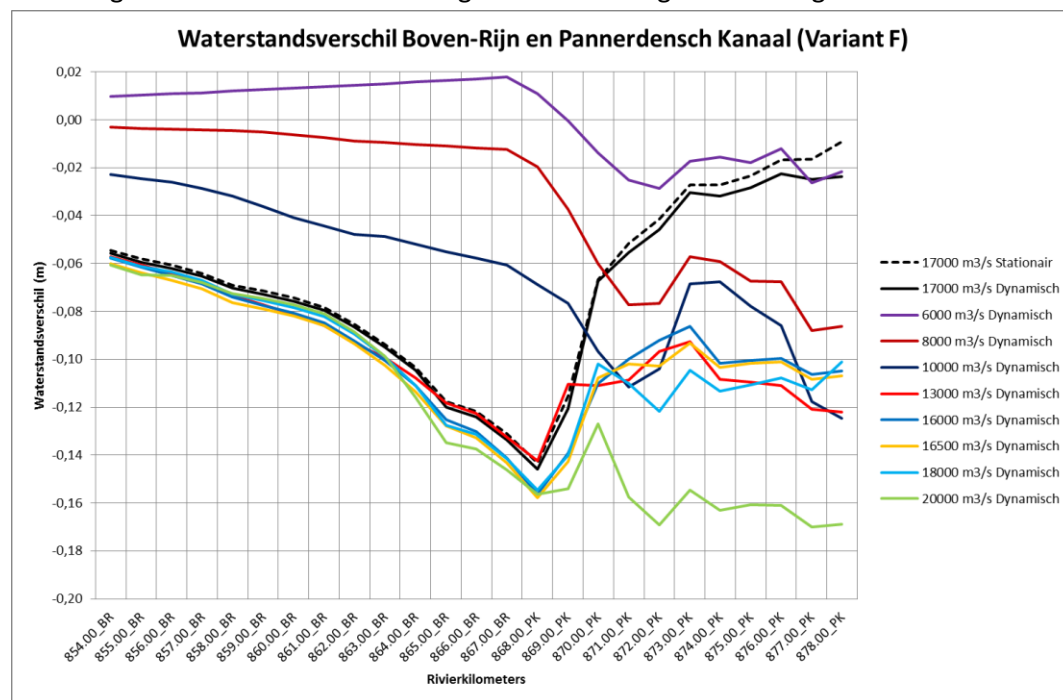
Tabel P-3: Aandeel Nederrijn in afvoerverdeling IJsselkop bij verschillende afvoergolven (in %)

	6000	8000	10000	13000	16000	16500	17000	18000	20000
Referentie	56,4	57,6	59,2	59,5	58,4	58,3	56,1	54,2	53,2
Variant F	53,9	53,2	54,0	55,6	55,7	55,6	55,5	52,0	50,8

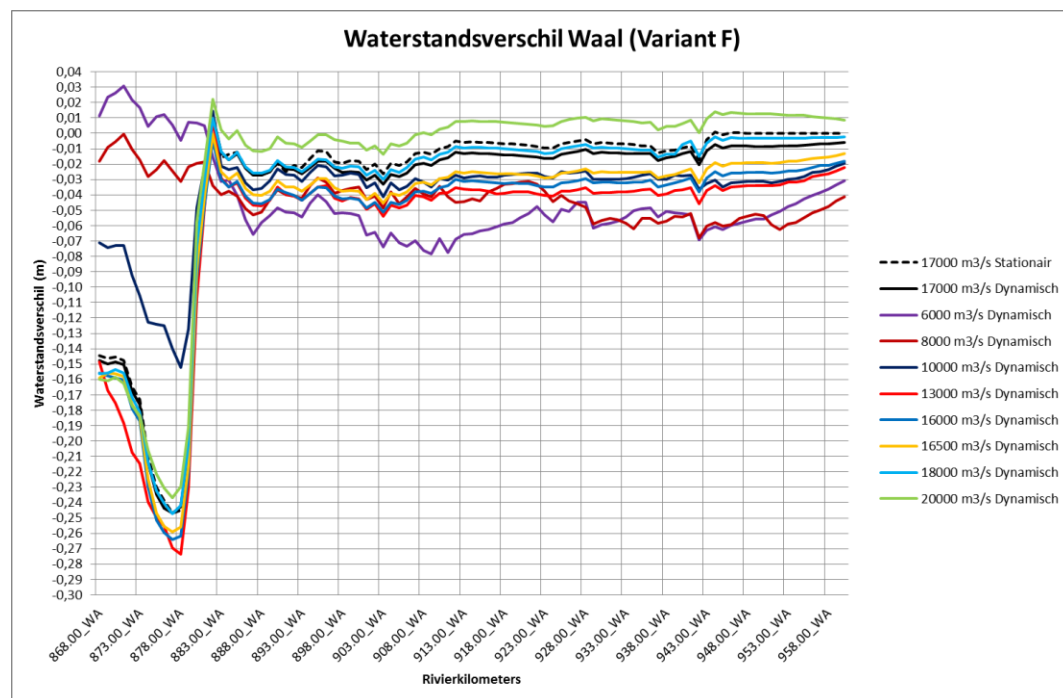
Bij variant A was nog een correcte afvoerverdeling zichtbaar bij een afvoer van 17000 m³/s, bij variant F is dit niet meer aan de orde. Bij alle afvoeren is de verdeling niet zoals deze behoort te zijn en in de referentiesituatie zichtbaar was.

Waterstanden

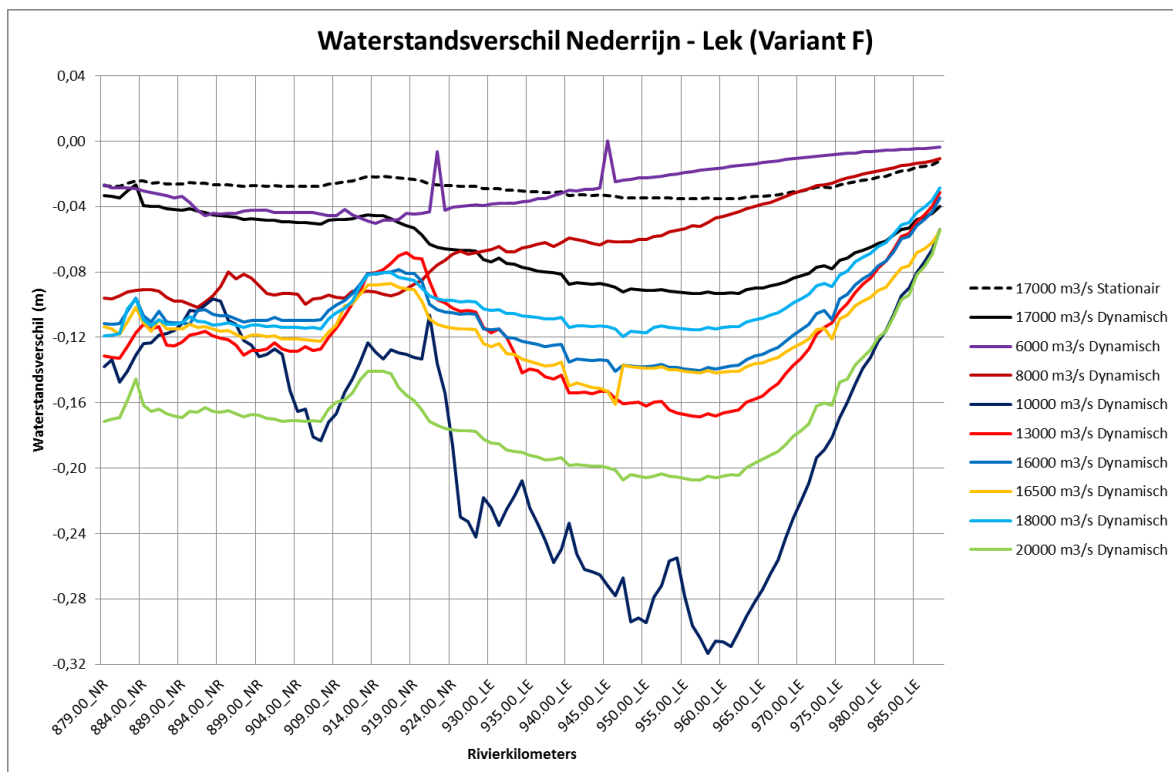
In de onderstaande grafieken zullen de waterstandsverschillen ten opzichte van de referentiesituatie worden getoond. Een korte toelichting zal onder deze grafieken volgen.



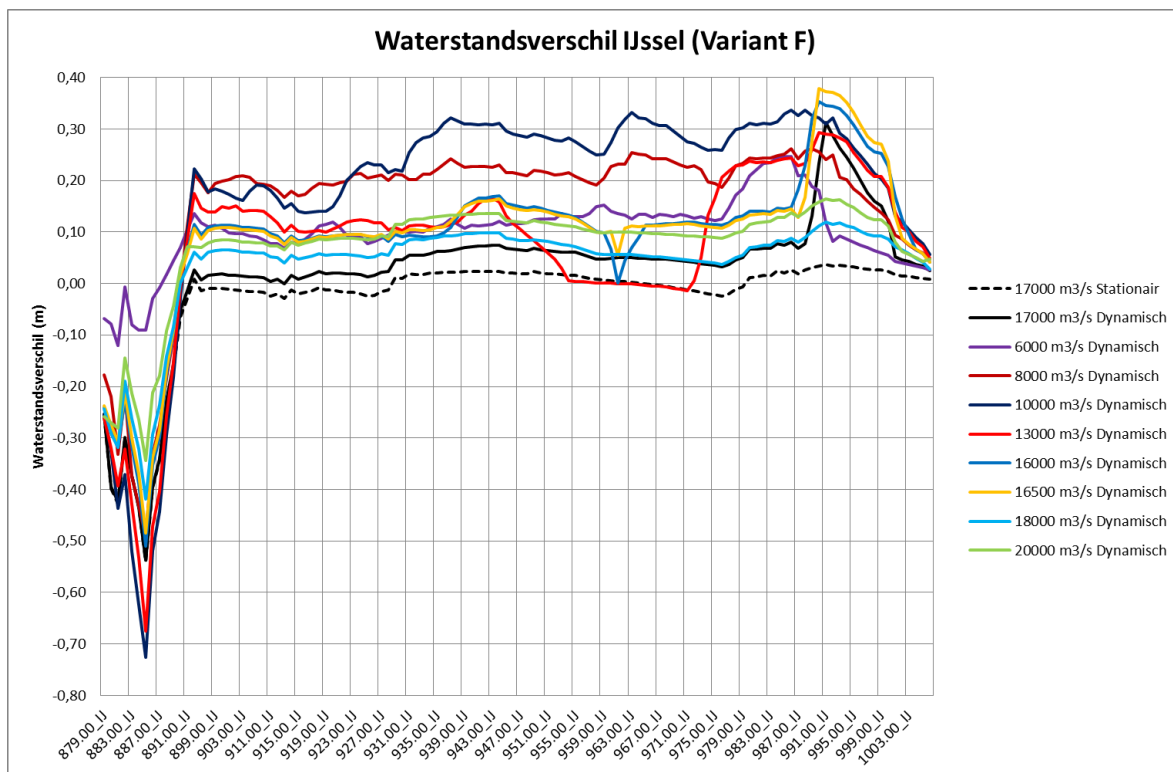
Figuur P-5: Waterstandsverschillen Bovenrijn en Pannerdensch Kanaal



Figuur P-6: Waterstandsverschillen Waal



Figuur P-7: Waterstandsverschillen Nederrijn/Lek

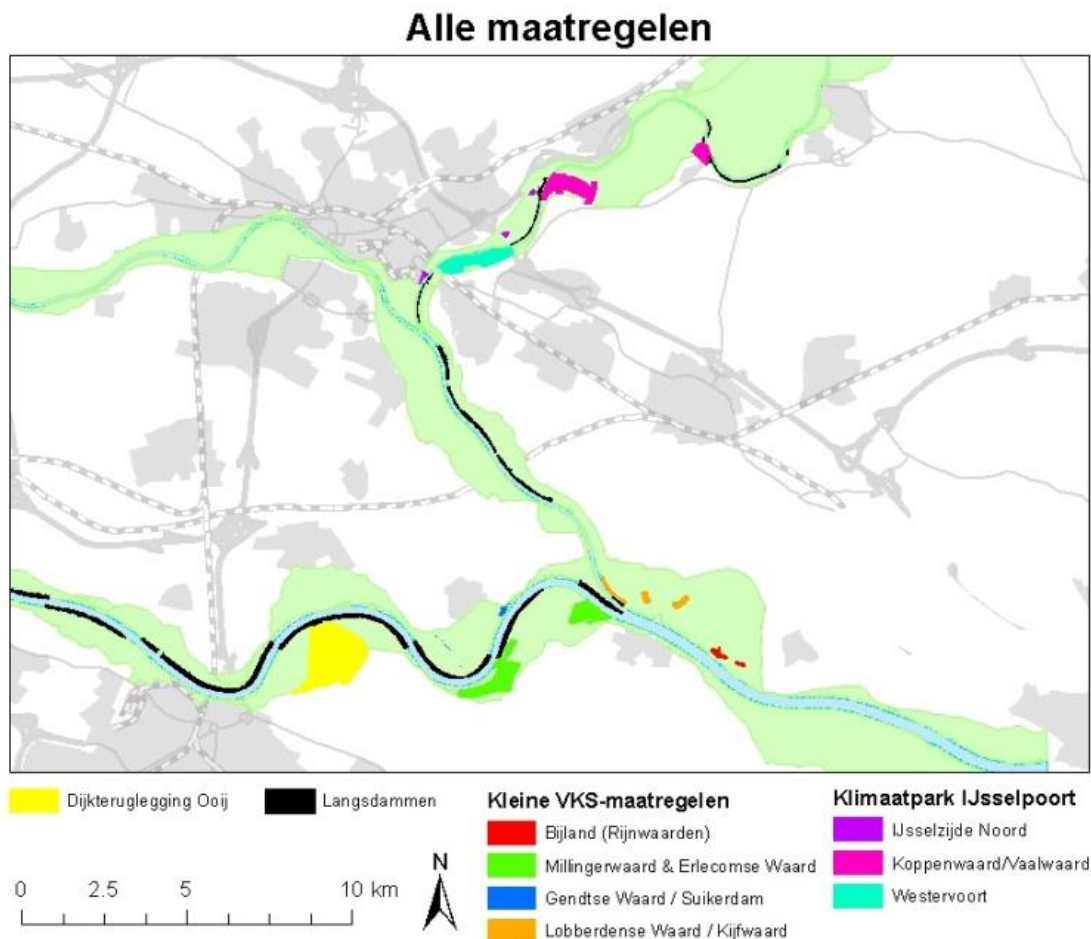


Figuur P-8: Waterstandsverschillen IJssel

In de grafiek van de Bovenrijn en Pannerdensch Kanaal zijn de effecten van de langsdammen het best zichtbaar. Over het gehele traject wordt hiermee een waterstandsdeling verwezenlijkt. In de Waal zijn de effecten van zowel de langsdammen als de dijkverlegging bij Ooij goed zichtbaar. De grafiek van de Nederrijn/Lek laat de versturende effecten van het Klimaatpark IJsselpoort en de langsdammen goed zien. In deze riviertak worden geen maatregelen verwezenlijkt in deze variant, maar is er een waterstandsdeling zichtbaar als gevolg van de scheve afvoerverdeling bij de IJsselkop. Deze scheve verdeling is het beste zichtbaar in de grafiek van de IJssel. Allereerst is het grote waterstanddalende effect van het Klimaatpark goed zichtbaar. Benedenstrooms van het park zijn echter waterstandsverhogende effecten zichtbaar. Het effect van de langsdammen wordt hiermee zo goed als teniet gedaan, omdat er vrijwel geen waterstandsdeling wordt verwezenlijkt in deze riviertak.

Vergelijking variant F met andere varianten

Allereerst zullen hieronder de verschillende varianten worden beschreven en geïllustreerd. Daarna is de afvoerverdeling bij de dynamische berekening van 17.000 m³/s van alle varianten te zien.



Figuur P-9: Schematisatie bestudeerde maatregelen, behorende bij de varianten A t/m F

Tabel P-4: Beschrijving varianten

Variant	Beschrijving
A	Klimaatpark IJsselpoort
B	Klimaatpark IJsselpoort + Kleine VKS-maatregelen
C	Klimaatpark IJsselpoort + Kleine VKS-maatregelen + Dijkteruglegging Ooij
D	Klimaatpark IJsselpoort + Langsdammen
E	Kleine VKS-maatregelen + Langsdammen
F	Klimaatpark IJsselpoort + Langsdammen + Dijkteruglegging Ooij

Tabel P-5: Vergelijking afvoeren over riviertakken tussen varianten met tussen () verschillen t.o.v. beleidsmatige afvoer

	Referentie	A	B	C	D	E	F
Locatie							
Q-Lobith	17004,1 (4,1)	17005,2 (5,2)	16997,5 (-2,5)	17000,1 (0,1)	17004,5 (4,5)	16996,9 (-3,1)	17.003,7 (3,7)
Q-Waal	10982,8 (12,8)	10978,1 (8,1)	10980,9 (10,9)	10978,6 (8,6)	10968,9 (-1,1)	10982,4 (12,4)	10.971,0 (1,0)
Q-Pankanaal	6019 (-11,0)	6016,6 (-13,4)	6017,1 (-12,9)	6019,2 (-10,8)	6026,7 (-3,3)	6023,3 (-6,7)	6.023,6 (-6,2)
Q-Nederrijn	3386,2 (6,2)	3376,7 (-3,3)	3378 (-2,0)	3369,1 (-10,9)	3345,5 (-34,5)	3385,8 (5,8)	3.344,3 (-35,7)
Q-IJssel	2649,3 (-6,7)	2627,4 (-28,6)	2623,6 (-32,4)	2625,9 (-30,1)	2681,2 (25,2)	2653,6 (-2,4)	2.677,2 (21,2)
Q-RW-Pannerden	397,5	410,1	785,9	1215,9	375	767,7	672,7
Q-RW-HPleij	450,1	30,3	26,4	26,2	30,7	316,7	30,3

Uit de tabel blijkt dat de uitkomsten van variant F voornamelijk overeenkomen met die van variant D. Dit is te verklaren doordat beide varianten zowel Klimaatpark IJsselpoort als Langsdammen bevatten.

Conclusie

De belangrijkste conclusies komen overeen met die van variant A, beschreven in hoofdstuk 3. Echter, bij variant F zijn de gevolgen nog extremer dan bij variant A. Dit valt vooral te wijten aan de combinatie van Klimaatpark IJsselpoort en de langsdammen in de IJssel, waardoor het regelwerk Hondsbroeksche Pleij niet meer in staat is de afvoerverdeling bij ontwerpafvoer correct te regelen. Tevens is de afvoerverdeling sterk veranderd bij alle andere middenafvoeren. Deze variant kan dus niet worden uitgevoerd zonder extra maatregelen te nemen. De positieve keerzijde is dat ook bij deze variant het regelwerk Pannerden voldoende regelbereik heeft en tevens overhoudt om de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop correct te regelen.