

**Verkenning varianten  
afvoerverdeling Rijntakken in de  
context van de  
overstromingsrisicobenadering**





**Verkenning varianten  
afvoerverdeling Rijntakken in de  
context van de  
overstromingsrisicobenadering**

Nathalie Asselman  
Peter de Grave  
Otto Weiler  
Aukje Spruyt

11202191-000



**Titel**

Verkenning varianten afvoerdeling Rijntakken in de context van de overstromingsrisicobenadering

<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
11202191-000	11202191-000-ZWS-0026	90

**Trefwoorden**

Afvoerdeling Rijntakken, kosteneffectiviteit

**Samenvatting**

Voor het water dat bij Lobith via de Rijn ons land binnenkomt, is in 2006 door het beleid vastgesteld hoe de toen geldende maatgevende afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s verdeeld dient te worden over de riviertakken. Hierbij is uitgegaan van een enkelvoudige maatgevende afvoer. De nieuwe beschermingsnormen die sinds 1 januari 2017 van kracht zijn, zijn echter niet langer gericht op het keren van één maatgevende waterstand, maar op het voldoen aan een maximaal toelaatbare overstromingskans. Dat betekent dat de hele range aan afvoeren en bijbehorende waterstanden van belang is en dat dus ook voor de hele range aan afvoeren bij Lobith van belang is hoe deze over de verschillende Rijntakken verdeeld worden.

Het onderzoek beschreven in dit rapport is uitgevoerd om (mede) invulling te kunnen geven aan de vraag hoe om te gaan met de beleidsmatig vastgestelde afvoerdeling in de context van de overstromingsrisicobenadering. Er is gekeken naar de kosten voor dijkversterking en de invloed op overstromingsrisico's bij verschillende strategieën om de afvoer te verdelen over de riviertakken.

Uit de studie kan geconcludeerd worden dat beoordeling van de varianten op kosteneffectiviteit geen eenduidig beeld oplevert en er geen duidelijke voorkeursvariant uit komt rollen. De kostenbesparingen door het water anders over de riviertakken te verdelen zijn relatief beperkt: veelal een paar honderd miljoen euro, maar dat is slechts 2% van het totaal. Omdat de scores op de andere criteria sterk wisselen, zal het eindoordeel erg afhankelijk zijn van hoe deze criteria gewogen worden.

Een uitgebreidere samenvatting van de uitgevoerde werkzaamheden en de resultaten is aan het begin van het rapport (na de inhoudsopgave) te vinden.

**Referenties**

-

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	sept. 2018	Nathalie Asselman					
2.0	dec. 2018	Nathalie Asselman					
3.0	feb. 2019	Nathalie Asselman					
4.0	Juni 2019	Nathalie Asselman	NA	Frans Klijn	FK	Gerard Blom	GB

BA.

**Status**

definitief



# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>i</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Kader	1
1.2 Vraagstelling huidig onderzoek	1
1.3 Dit rapport	2
<b>2 Aanpak</b>	<b>3</b>
2.1 Aanpasbaarheid regelwerken tijdens hoogwater	3
2.1.1 Huidige regelwerken: kenmerken en werking op hoofdlijnen	3
2.1.2 Aanpak onderzoek	5
2.2 Vaststellen afvoerverdelingsvarianten	5
2.2.1 Referentie	5
2.2.2 Verdelingen met de huidige regelwerken en het huidige regelbereik	6
2.2.3 Verdelingen uitgaande van aangepaste regelwerken	16
2.3 Totale kosten	19
2.3.1 Kosten voor dijkversterking	20
2.3.2 Overstromingsrisico's	21
2.3.3 Aanpassing van de regelwerken	21
2.3.4 Gevoeligheidsanalyse	22
2.4 Overige beslisinformatie	24
<b>3 Aanpasbaarheid regelwerken tijdens hoogwater</b>	<b>27</b>
3.1 Inleiding	27
3.2 Bevindingen op hoofdlijnen	27
<b>4 Kosteneffectiviteit onderzochte afvoerverdelingen</b>	<b>29</b>
4.1 Investeringskosten dijkversterking	29
4.1.1 Huidige regelwerken met huidig regelbereik	29
4.1.2 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: IJssel ontzien	32
4.1.3 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: Nederrijn-Lek ontzien	34
4.1.4 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: Waal ontzien	35
4.1.5 Conclusie	36
4.2 Overstromingsrisico's	37
4.2.1 Huidige regelwerken met huidig regelbereik	37
4.2.2 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: IJssel ontzien	39
4.2.3 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: Nederrijn-Lek ontzien	40
4.2.4 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: Waal ontzien	40
4.2.5 Conclusie	41
4.3 Totale kosten	41
4.3.1 Huidige regelwerken met huidig regelbereik	41
4.3.2 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: IJssel ontzien	43
4.3.3 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: Nederrijn-Lek ontzien	44
4.3.4 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: Waal ontzien	45
4.3.5 Conclusie	45
4.4 Gevoeligheidsanalyse	46
4.4.1 Rivierverruiming	46
4.4.2 Verandering in gevolgen in geval van overstromen	47

4.4.3	Discontovoet	48
4.4.4	Innovatieve maatregelen	52
<b>5</b>	<b>Overige beslisinformatie</b>	<b>55</b>
5.1	Inzetfrequentie bypass Veessen-Wapenveld	55
5.2	Overstromingsfrequentie buitengedijkte gebieden Cortenoever en Voorsterklei	56
5.3	Effect op de Rijn-Maasmonding	57
5.4	Effect op het IJsselmeer	59
5.5	Behoud van het regelbereik	60
5.6	Effect op morfologie	61
<b>6</b>	<b>Conclusies</b>	<b>63</b>
<b>7</b>	<b>Referenties</b>	<b>67</b>
 <b>Bijlage(n)</b>		
<b>A</b>	<b>Uitgangspunten kostenramingen OKADER</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Uitgangspunten overstromingsrisicoberekeningen</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Aanpasbaarheid regelwerken tijdens hoogwater</b>	<b>C-1</b>
C.1	Inleiding	C-1
C.2	Sturing regelwerken in de modellen	C-1
C.3	Aanpasbaarheid van de huidige regelwerken	C-2
C.3.1	Constructie van de huidige regelwerken	C-2
C.3.2	Hydraulische condities	C-4
C.3.3	De krachten op de schotten in stromend water	C-6
C.3.4	Verdere informatie over de werkwijze bij de Hondsbroeksche Pleij	C-7
C.3.5	Conclusie voor de huidige situatie	C-9
C.4	Mogelijke aanpassingen aan de regelwerken	C-10
C.4.1	Eenvoudige aanpassing aan regelwerk Pannerden	C-10
C.4.2	Voorstel voor een verbeterde installatie	C-10
C.5	Nabeschouwing en conclusies	C-12
<b>D</b>	<b>Gebruikte informatie voor effectbepaling Rijn-Maasmonding en IJsselmeer</b>	<b>D-1</b>
D.1	Rijn-Maasmonding	D-1
D.2	IJsselmeer	D-3



## Samenvatting

### Inleiding

Voor het water dat bij Lobith via de Rijn ons land binnenkomt, is in 2006 door het beleid vastgesteld hoe de toen geldende maatgevende afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s verdeeld dient te worden over de riviertakken. Hierbij is uitgegaan van een enkelvoudige maatgevende afvoer. Alleen voor die afvoer zou de afvoer conform het beleidsuitgangspunt verdeeld moeten worden. Ook is vastgesteld dat wanneer deze enkelvoudige maatgevende afvoer in de toekomst door klimaatverandering toe zou nemen tot boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith, de afvoer via de Nederrijn-Lek niet zou mogen toenemen ('Lek ontzien') en dat het meerdere boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s over Waal en IJssel verdeeld wordt.

De nieuwe beschermingsnormen die sinds 1 januari 2017 van kracht zijn, zijn echter niet langer gericht op het keren van één maatgevende waterstand, maar op het voldoen aan een maximaal toelaatbare overstromingskans. Dat betekent dat de hele range aan afvoeren en bijbehorende waterstanden van belang is en dat dus ook voor de hele range aan afvoeren bij Lobith van belang is hoe deze over de verschillende Rijntakken verdeeld worden.

De onderzoeksvraag die nu voorligt luidt: Hoe kunnen we de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling interpreteren in het licht van de nieuwe risicobenadering, waarin we niet langer uitgaan van een enkelvoudige maatgevende afvoer?

### Aanpak

Om invulling te kunnen geven aan een nieuwe beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling zijn de volgende werkzaamheden uitgevoerd:

- Allereerst is gekeken wat het regelbereik is van de huidige regelwerken en of de instelling van de huidige regelwerken tijdens hoogwater aan te passen is. Deze inzichten zijn benut bij het definiëren van een aantal basisvarianten voor de afvoerverdeling.
- Vervolgens zijn voor alle varianten de kosten voor dijkversterking en de overstromingsrisico's berekend. De kosten voor dijkversterking zijn geraamd met OKADER (versie augustus 2018). De overstromingsrisico's zijn berekend met behulp van de dataset en de methode die ook ten grondslag liggen aan het Deltaprogramma Veiligheid en de MKBA-Lange-termijnambitie rivieren (LTAR)
- De kosten voor aanpassing van de regelwerken zijn zeer globaal geschat op basis van de kosteneffectiviteitsanalyse Afvoerverdeling Rijntakken, die in 2013 voor het Deltaprogramma Rivieren is uitgevoerd.
- Naast investeringskosten voor dijkversterking en overstromingsrisico's in het rivierengebied, is de volgende overige beslisinformatie in beeld gebracht:
  - Inzetsfrequentie van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld
  - Overstromingsfrequentie van de buitengedijkte gebieden bij Cortenoever en Voorsterklei
  - Effecten voor de Rijn-Maasmonding en het IJsselmeer in termen van toename of afname van de dijkversterkingsopgave en de verandering in benodigde pompcapaciteit op de afsluitdijk
  - Invloed op het regelbereik bij de splitsingspunten
  - Morfologische effecten op de Rijntakken

- Tot slot zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd, waarbij onder meer is gekeken naar het effect van rivierverruimende maatregelen (verandert de kosteneffectiviteit van een afvoerverdelingsvariant wanneer rivierverruiming wordt uitgevoerd?), de gekozen waarde voor de discontovoet, en het eventueel toepassen van innovatieve dijkversterkingsmaatregelen, waardoor de kosten voor dijkversterking lager uitvallen.

### **Afvoerverdeling met de huidige regelwerken**

Elk jaar, voor de start van het hoogwaterseizoen, worden beide regelwerken ingesteld om de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling bij 16.000 m<sup>3</sup>/s te realiseren. Door het bijplaatsen of wegnemen van betonnen schotten verandert de hoogte van de openingen in het regelwerk. Dat bepaalt hoeveel water door het regelwerk kan stromen in geval van hoogwater. In de meeste modelstudies wordt uitgegaan van tijdens hoogwater stuurbare regelwerken. Dit betekent dat in modellen wordt aangenomen dat de instelling van de regelwerken tijdens een hoogwater aangepast kan worden. Onderzocht is of deze aanname correct is.

Uit de berekeningen die zijn uitgevoerd in het kader van deze studie blijkt dat het niet mogelijk is om tijdens hoogwater extra schotten te plaatsen. Dit geldt voor regelwerk Pannerden en voor het regelwerk Hondsbroeksche Pleij. Het trekken van schotten bij de Hondsbroeksche Pleij lijkt, wat betreft de verticale krachten, wel mogelijk. Voor het wegnemen van schotten bij regelwerk Pannerden zouden de verticale krachten nader moeten worden bepaald: het is de vraag of de hijspunten aan de schotten sterk genoeg zijn. Ofwel: in tegenstelling tot wat bij modelstudies wordt aangenomen, is aanpassing van de instelling van beide regelwerken niet of slechts zeer beperkt mogelijk.

### **Onderzochte afvoerverdelingsvarianten**

Voor de referentieberekening is uitgegaan van de verdeling zoals die is gehanteerd bij OI en bij veel beleidsstudies. Om deze verdeling te kunnen realiseren zouden de regelwerken moeten worden aangepast, zodat de instelling tijdens hoogwater te wijzigen is. Indien men bij de beleidsmatig vast te leggen afvoerverdeling uit wil gaan van de huidige regelwerken, dan is deze variant dus geen optie. Daarom zijn in deze studie afvoerverdelingsvarianten onderzocht die wel te realiseren zijn met de huidige regelwerken. Dit zijn:

- Vaste instelling regelwerken op een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith (dit is de huidige instelling, daarbij staat regelwerk Pannerden zeer ver open, terwijl de Hondsbroeksche Pleij vrijwel helemaal dicht staat). Bij deze instelling gaat bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith 3.376 m<sup>3</sup>/s naar de Nederrijn-Lek. Bij een hogere afvoer te Lobith neemt de afvoer op de Nederrijn-Lek verder toe. De Nederrijn-Lek wordt dus niet ontzien.
- Vaste instelling regelwerken op een afvoer van 17.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Bij deze instelling gaat bij een afvoer van 17.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith 3.376 m<sup>3</sup>/s naar de Nederrijn-Lek.
- Vaste instelling regelwerken op een afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Bij deze instelling gaat bij een afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith 3.376 m<sup>3</sup>/s naar de Nederrijn-Lek. Bij lagere afvoeren te Lobith is de afvoer op de Nederrijn-Lek lager dan 3.376 m<sup>3</sup>/s. Dit leidt tot extra afvoer op de Waal.
- Beide regelwerken staan helemaal open.
- Beide regelwerken zijn gesloten.
- Regelwerk Pannerden staat dicht en de Hondsbroeksche Pleij staat helemaal open (deze instelling lijkt op een vaste instelling bij 18.000 m<sup>3</sup>/s).
- Regelwerk Pannerden staat open en de Hondsbroeksche Pleij staat helemaal dicht (deze instelling lijkt op een vaste instelling bij 16.000 m<sup>3</sup>/s).

Daarnaast is een aantal varianten gedefinieerd die aanpassingen vergen aan de regelwerken en mogelijk ook aan de inrichting van het splitsingspuntengebied. Bij deze varianten wordt steeds één riviertak ontzien bij verschillende afvoeren te Lobith. Deze afvoeren zijn 8.000 m<sup>3</sup>/s, 10.000 m<sup>3</sup>/s, 13.000 m<sup>3</sup>/s, 15.000 m<sup>3</sup>/s, 16.000 m<sup>3</sup>/s, 17.000 m<sup>3</sup>/s en 18.000 m<sup>3</sup>/s. Wanneer de IJssel of de Nederrijn-Lek worden ontzien, dan wordt het extra water afgevoerd via de Waal. Wanneer de Waal wordt ontzien, dan wordt de extra afvoer verdeeld over Nederrijn-Lek en IJssel.

### **Kosten voor dijkversterking van de verschillende varianten**

Uitgaande van de **huidige** regelwerken en het huidige regelbereik kan geconcludeerd worden dat de kosten voor dijkversterking tot 2125 procentueel gezien slechts in beperkte mate veranderen wanneer gekozen wordt voor een andere (vaste) instelling van de huidige regelwerken. De nominale kosten zijn maximaal 350 M€ (4%) hoger of 130 M€ (1%) lager. De contant gemaakte kosten zijn maximaal 130 M€ (2%) hoger, of maximaal 55 M€ (1%) lager. De totale kosten voor dijkversterking zijn het laagst wanneer de regelwerken vast worden ingesteld op een Bovenrijnafvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s (nominale kosten 9,6 miljard euro, contante waarde 5,8 miljard euro). De variant waarbij beide regelwerken helemaal open staan levert de hoogste kosten op (nominale kosten 10,0 miljard euro, contante waarde 5,9 miljard euro).

Wanneer de regelwerken en het splitsingspuntengebied zo worden **aangepast** dat de IJssel al bij Bovenrijnafvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s kan worden ontzien, dan levert dit een kleine besparing op (nominale kosten 36 M€ lager). Wanneer de IJssel pas bij hogere Bovenrijnafvoeren wordt ontzien levert dit hogere dijkversterkingskosten op (nominale kosten maximaal 140 M€ hoger). Dit komt doordat de dijkversterkingsopgave langs de IJssel wel afneemt, maar dijkversterking niet kan worden voorkomen. Daar staat een toename van de versterkingsopgave langs de gehele Waal tegenover. Wanneer wordt gekeken naar de contante waarde van de versterkingskosten, dan zijn deze bij alle varianten hoger. De hogere contante kosten komen doordat de dijken op de Waal relatief vroeg worden versterkt, terwijl juist hier een toename van de kosten te verwachten is.

Het ontzien van de Nederrijn-Lek leidt tot een grotere kostenbesparing. Indien de Nederrijn-Lek wordt ontzien bij afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s of hoger te Lobith, dan zijn de totale nominale kosten voor dijkversterking 0,8 miljard euro (9%) lager. De contante kosten voor dijkversterking zijn 0,4 miljard euro lager (7%).

Hoewel het ontzien van de Waal tot aanzienlijke kostenbesparingen kan leiden op de Waal, zijn de totale kosten voor dijkversterking langs de Rijntakken bij de meeste varianten hoger. Alleen wanneer de Waal al bij afvoeren vanaf 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith wordt ontzien vallen de kosten lager uit. De besparing op de nominale kosten voor dijkversterking is dan 0,6 miljard euro (-7%). De contant gemaakte vallen bijna 0,2 miljard euro lager uit (-3%).

### **Overstromingsrisico's van de verschillende varianten**

De contante waarde van het overstromingsrisico bedraagt in de referentiesituatie 9,8 miljard euro. Bij de onderzochte afvoerverdelingsvarianten waarbij is uitgegaan van **vaste** regelwerken kan dit maximaal 170 M€ (2%) hoger tot ruim 300 M€ (3%) lager uitvallen. De grootste risico's worden gevonden wanneer beide regelwerken open staan. De risico's zijn het kleinst wanneer beide regelwerken gesloten zijn.

Wanneer de regelwerken zo worden **aangepast** dat de IJssel al bij Bovenrijnafvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s kan worden ontzien, dan levert dit een substantieel kleiner overstromingsrisico op (ruim 500 M€ kleiner). Het verschil ontstaat vooral doordat de lagere waterstanden op de IJssel leiden tot een kleinere overstromingskans. Omdat de dijken hier relatief laat worden versterkt leidt dit tot een grote baat. De dijken langs de Waal worden relatief vroeg versterkt. Daardoor is slechts kort sprake van grotere overstromingskansen langs deze tak. Netto neemt het risico dus af. Wanneer de IJssel pas bij hogere afvoeren wordt ontzien is de afname in het overstromingsrisico kleiner.

Het ontzien van de Nederrijn-Lek leidt tot verschillen in overstromingsrisico's van maximaal een paar honderd miljoen euro.

De kleinste verandering in overstromingsrisico wordt gevonden wanneer de Waal wordt ontzien en het extra water via de Nederrijn-Lek en IJssel wordt afgevoerd. Het risico is dan maximaal ongeveer 100 M€ kleiner.

#### **Totale kosten (investeringskosten dijkversterking en overstromingsrisico's)**

Bij een vaste instelling van de huidige regelwerken zijn de totale kosten maximaal 285 M€ lager dan in de referentie (wanneer beide regelwerken gesloten zijn) en maximaal 300 M€ hoger (wanneer beide regelwerken open zijn). Omdat de totale kosten in de referentiesituatie 15,6 miljard euro bedragen, zijn de relatieve verschillen klein: plus of min 2%.

Het ontzien van de IJssel levert de laagste totale kosten op wanneer de IJssel al wordt ontzien bij afvoeren te Lobith van 8.000 m<sup>3</sup>/s. In dat geval vallen de totale contante kosten 420 M€ (3%) lager uit. Deze wijziging van de afvoerverdeling vergt echter wel enorme aanpassingen aan de regelwerken en de inrichting van het splitsingspuntengebied om de Waal voldoende afvoer te laten trekken. Volgens Stratelligence (2013) zou extra water naar de Waal kunnen worden gestuurd door een beweegbare drempel te maken in het Pannerdensch Kanaal. De nominale kosten hiervoor zijn geraamd op 210 miljoen euro. Deze drempel zorgt echter voor opstuwung die merkbaar is tot in Duitsland. Dit leidt tot extra kosten voor dijkversterking van 915 M€. Dit betekent dat deze variant waarschijnlijk niet kosteneffectief is.

Het ontzien van de Nederrijn-Lek leidt tot 670 M€ (-4%) lagere kosten, wanneer dit gebeurt bij een Bovenrijnafvoer van 8.000 m<sup>3</sup>/s of meer. Ook hiervoor geldt dat deze baat waarschijnlijk niet opweegt tegen de kosten die nodig zijn om de regelwerken en de inrichting van het splitsingspuntengebied aan te passen. Bij alle andere varianten nemen de totale kosten voor dijkversterking en risico's met 50 tot 150 M€ toe in plaats van af. Deze varianten zijn dus sowieso niet kosteneffectief.

Bij het ontzien van de Waal is alleen de variant waarbij de Waal al bij afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith wordt ontzien goedkoper. De besparing bedraagt dan 230 M€ (-1%). Wanneer de kosten voor aanpassingen in het splitsingspuntengebied worden meegenomen is deze variant niet kosteneffectief.

#### **Gevoeligheidsanalyses**

Uit de analyses is gebleken dat het wel of niet uitvoeren van rivierversuimingsmaatregelen nauwelijks invloed heeft op de in deze studie berekende kosteneffectiviteit van de verschillende afvoerverdelingsvarianten.

Wanneer innovatieve maatregelen worden beschouwd, worden de kosten voor dijkversterking fors lager, maar de invloed hiervan op de verschillen in kosten tussen de verschillende afvoerverdelingsvarianten is klein. De meer of minder kosten van een variant ten opzichte van de referentie blijft vrijwel gelijk. Wel is het verschil procentueel gezien groter omdat de totale kosten voor dijkversterking afnemen van 5,8 naar 4,2 miljard euro.

Een lagere discontovoet leidt tot iets grotere verschillen in totale kosten (30% grotere verschillen) voor de verschillende varianten. Omgekeerd worden de verschillen bij een hogere discontovoet juist (ongeveer 30%) kleiner.

De belangrijkste conclusie van al het bovenstaande is echter dat de volgorde van de varianten, wanneer ze worden gerangschikt naar kosteneffectiviteit, niet verandert. De variant waarbij beide regelwerken gesloten zijn is het meest kosteneffectief. Een vaste instelling op 18.000 m<sup>3</sup>/s of het sluiten van regelwerk Pannerden en het open zetten van de Hondsbroeksche Pleij zijn ook iets kosteneffectiever dan de referentie, maar voor al deze varianten geldt dat de meer- of minderkosten ten opzichte van de totale kosten klein zijn.

#### **Eindoordeel kosteneffectiviteit**

Op basis van kosteneffectiviteit lijkt het niet voor de hand te liggen om de regelwerken en de inrichting van het splitsingspunt grootschalig te veranderen. Een afvoerverdeling die uitgaat van de huidige regelwerken lijkt meer voor de hand te liggen. De verschillen in kosteneffectiviteit van de hier door gerekende varianten met een vaste instelling zijn zeer klein: maximaal 2% duurder of goedkoper. Dit betekent dat er op basis van kosteneffectiviteit geen duidelijke voorkeursvariant aan te wijzen is, en dat andere overwegingen een belangrijke rol kunnen spelen bij de uiteindelijke keuze.

#### **Overige beslisinformatie**

##### *Inzetsfrequentie hoogwatergeul Veessen-Wapenveld*

Bij de varianten die uitgaan van een vaste instelling van de regelwerken, treedt de grootste verandering in inzetfrequentie op wanneer beide regelwerken helemaal open of dicht staan. Indien beide regelwerken helemaal open staan, dan neemt de inzetfrequentie toe met een factor 1,3 (1 keer per 80 jaar in plaats van 1 keer per 100 jaar). Indien beide regelwerken dicht staan, dan neemt de inzetfrequentie af van 1 keer per 100 jaar naar 1 keer per 370 jaar.

Wanneer de IJssel wordt ontzien vanaf afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s of 10.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith, dan zal Veessen-Wapenveld nooit meer mee stromen. Het ontzien van de IJssel bij hogere afvoeren heeft nauwelijks effect op de inzetfrequentie.

Wanneer de Nederrijn-Lek wordt ontzien en de extra afvoer via de Waal wordt afgevoerd heeft dat ook geen effect op de inzetfrequentie van Veessen-Wapenveld. De extra afvoer gaat immers naar de Waal.

Wanneer de Waal wordt ontzien bij afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s of 10.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith, dan neemt de inzetfrequentie fors toe. In plaats van 1 keer per 100 jaar, zal de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld dan gemiddeld eens per 20 of eens per 50 jaar mee stromen. Het ontzien van de Waal bij afvoeren van 13.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith of meer heeft geen effect op de inzetfrequentie. Wel zal het gebied dan bij extreme afvoeren dieper onder water komen te staan.

De inzetfrequentie zal echter ook veranderen als gevolg van klimaatverandering. Uitgaande van het W+ klimaatscenario (dat is het scenario met de grootste toename van de rivierafvoeren), zal Veessen-Wapenveld in het jaar 2050 een kans van 1:35 per jaar in plaats van 1:100 per jaar hebben om mee te stromen. In het jaar 2100 zal de kans zelfs 1:15 per jaar bedragen. De veranderingen als gevolg van dit scenario voor klimaatverandering zijn dus groter dan de veranderingen als gevolg van de meeste hierboven verkende afvoerverdelingsvarianten.

#### *Overstromingsfrequentie buitengedijkte gebieden Cortenoever en Voorsterklei*

De grootste toename van de overstromingsfrequentie is te verwachten bij de variant Waal ontzien vanaf 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. De beide gebieden overstromen dan gemiddeld iedere 10 jaar in plaats van iedere 25 jaar. Bij de varianten die zijn gebaseerd op de huidige regelwerken, heeft de variant waarbij beide regelwerken open staan het grootste effect. De buitengedijkte gebieden bij Cortenoever en Voorsterklei overstromen dan gemiddeld een keer per 15 jaar.

Ter vergelijking, door klimaatverandering zal de overstromingsfrequentie van Cortenoever en Voorsterklei sowieso toenemen. De huidige afvoer met een overschrijdingskans van 1:25 per jaar heeft in klimaatscenario W+ in 2050 een overschrijdingskans van ongeveer 1:10 per jaar en in 2100 1:6 per jaar.

#### *Effect op de Rijn-Maasmonding*

De afvoerverdelingsvarianten die uitgaan van de huidige (vaste) regelwerken leiden tot redelijk vergelijkbare belastingen in de Rijn-Maasmonding. Wel kan er in het ene geval wat meer water worden aangevoerd via de Waal en in het andere geval juist wat meer via de Nederrijn-Lek. Hierdoor kunnen er per riviertak verschillen zijn in de opgave voor dijkversterking, maar voor de Rijn-Maasmonding als geheel zijn de verschillen klein.

Het ontzien van de IJssel bij lage afvoeren te Lobith zal wel leiden tot hogere kosten voor dijkversterking in de Rijn-Maasmonding. Het ontzien van de Nederrijn-Lek heeft geen effect omdat is aangenomen dat de extra afvoer via de Waal alsnog naar de Rijn-Maasmonding wordt afgevoerd. Het ontzien van de Waal pakt gunstig uit voor de Rijn-Maasmonding, omdat een deel van deze afvoer via de IJssel naar het IJsselmeer gaat.

Wanneer meer water afgevoerd dient te worden via de Rijn-Maasmonding zal dit gevolgen hebben voor de benodigde afvoercapaciteit aldaar, echter dit zal een uitwisseling zijn met de benodigde afvoercapaciteit op het IJsselmeer. De totale hoeveelheid water dat bij Lobith het land binnen komt verandert immers niet.

#### *Effect op het IJsselmeer*

Uitgaande van een vaste instelling van de regelwerken, leidt de variant waarbij beide regelwerken open staan tot de sterkste toename van de belastingen op het IJsselmeer. Volgens een zeer grove schatting zouden de kosten voor dijkversterking met 0,5 miljard euro (contante waarde) af kunnen nemen wanneer de IJssel al wordt ontzien bij afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. De benodigde pompcapaciteit in 2075 neemt met 100 m<sup>3</sup>/s af (van 1.100 naar 1.000 m<sup>3</sup>/s). Wanneer de IJssel pas bij hogere afvoeren wordt ontzien, dan zal het effect klein zijn.

Het ontzien van de Nederrijn-Lek heeft geen effect op de afvoer naar het IJsselmeer. En het ontzien van de Waal leidt tot een toename van de kosten voor dijkversterking langs het IJsselmeer.

Wanneer de Waal al bij een afvoer van 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith wordt ontzien, dan zullen de kosten voor dijkversterking met 1 miljard euro toenemen. De benodigde pompcapaciteit zal mogelijk met 200 m<sup>3</sup>/s toenemen.

#### *Behoud regelbereik*

Om zo veel mogelijk 'naar 2 kanten' regelbereik te behouden verdient een variant waarbij beide regelwerken half open staan. Dit is min of meer het geval bij een vaste instelling op 17.000 m<sup>3</sup>/s. Wanneer rekening wordt gehouden met toekomstige rivierverruimingsmaatregelen nabij het splitsingspunt, dan kan een open stand voordelen hebben: na realisatie van de rivierverruimingsmaatregelen kan het regelwerk verder worden dicht gezet om te voorkomen dat de tak waarop rivierverruiming is uitgevoerd te veel afvoer gaat trekken.

Wanneer de bodemerosie op de Rijntakken niet wordt tegengegaan dan kan dat er ook toe leiden dat een tak meer afvoer gaat trekken. De lange-termijntrend van de afgelopen jaren lijkt te duiden op een toename van de afvoer naar het Pannerdensch Kanaal. Als deze trend zich doorzet en ook bij hoge afvoeren merkbaar is, dan zou men dit effect kunnen compenseren door de regelwerken nu relatief ver open te zetten. In de toekomst kan men een verschuiving van de afvoerverdeling voorkomen door de regelwerken verder dicht te zetten.

#### *Morfologie*

De grootste morfologische risico's doen zich waarschijnlijk voor bij de IJsselkop, vooral wanneer gekozen wordt voor een variant waarbij de afvoer naar de IJssel toeneemt. Doordat het verhang op de bovenloop van de IJssel groter is dan op de bovenloop van de Nederrijn, ontstaat een verhang van west naar oost over de IJsselkop. Bij extreem hoogwater duiden modellen op dermate grote stroomsnelheden dat een grasmat die in slechte conditie verkeert kan eroderen, waarna ook het onderliggende materiaal weg kan spoelen. Dit zou kunnen zorgen voor een plotselinge toename van de afvoer naar de IJssel. Ook de afpleisterlaag op de boven-IJssel vormt een potentieel gevaar. Wanneer deze laag opbreekt tijdens (extreme) hoogwatercondities kan versnelde erosie optreden van de bodem, met een toename van de afvoer over de IJssel tot gevolg. Hoe groot de kans hierop is, is niet exact bekend. De kans hierop kan worden verkleind door bodembescherming aan te brengen.

#### **Conclusie**

De interpretatie van de huidige beleidsmatige afspraken over de afvoerverdeling is veelal dat de afvoer op de Nederrijn-Lek in het afvoerbereik van 16.000 m<sup>3</sup>/s tot 18.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith niet verder toeneemt dan 3.380 m<sup>3</sup>/s. In modelstudies wordt hiertoe uitgegaan van tijdens hoogwater stuurbare regelwerken. Uit de berekeningen die zijn uitgevoerd in het kader van deze studie blijkt echter dat in tegenstelling tot wat bij modelstudies wordt aangenomen, aanpassing van de instelling van beide regelwerken bij hoogwater niet of slechts zeer beperkt mogelijk is. Dit betekent dat de Nederrijn-Lek met de huidige regelwerken niet op die manier kan worden ontzien. Op basis van kosten-effectiviteit lijkt het niet voor de hand te liggen om de regelwerken dynamisch stuurbaar te maken. De kosteneffectiviteit van afvoerverdelingsvarianten die uitgaan van stuurbare regelwerken is vergelijkbaar met de kosteneffectiviteit van varianten die uitgaan van een vaste instelling.

De beoordeling van de verschillende in deze studie beschouwde afvoerverdelingsvarianten op kosteneffectiviteit en overige beslisinformatie, is weergegeven in onderstaande tabel. Hieruit kan geconcludeerd worden dat dit geen eenduidig beeld oplevert en er geen duidelijke voorkeursvariant uit komt rollen. De kostenbesparingen (dijkversterking en risicoreductie) bij de inzet van een andere afvoerverdeling zijn relatief beperkt: veelal een paar honderd miljoen euro, maar dat is slechts 2% van het totaal.

Een + als beoordeling bij kosteneffectiviteit betekent dus maar een kostensparing van een paar procent. Kosteneffectiviteit is daarmee geen doorslaggevend criterium. Omdat de scores op de andere criteria sterk wisselen, zal het eindoordeel erg afhankelijk zijn van hoe deze criteria gewogen worden. Op basis van deze resultaten lijkt er geen directe aanleiding te zijn om het beleid helemaal om te gooien, en bijvoorbeeld te gaan werken met dynamische regelwerken. Volstaan kan worden met een vaste instelling van de regelwerken.

Indien wordt gekozen voor een vaste instelling van de regelwerken, en men waarde hecht aan behoud van het regelbereik, dan lijkt een vaste instelling op 17.000 m<sup>3</sup>/s een goede keuze. De kosteneffectiviteit is neutraal, en de score op de inzetfrequentie van Veessen-Wapenveld is positief voor de landbouw (maar negatief voor de natuur) en compenseert mogelijk het effect van de klimaatverandering. Dit geldt ook voor de overstromingsfrequentie van de buitengedijkte gebieden bij Cortenoever en Voorsterklei.

Een vaste instelling op 18.000 m<sup>3</sup>/s scoort beter op kosteneffectiviteit, maar heeft als nadeel dat 1 regelwerk ver dicht staat. Daardoor is het regelbereik eenzijdig.

Variant	kosten dijkversterking (contante waarde, M€)	overstromingsrisico's (contante waarde, M€)	totale kosten (contante waarde, M€)	kosteneffectiviteit	inzetfrequentie Veessen-Wapenveld (1/jaar)	overstromingskans Cortenoever- Voorsterklei (1/jaar)	Effect op Rijn- Maasmonding	Effect op Jsselmeer	Behoud regelbereik	Effect op morfologie
referentie OI	5814	9753	15566	-	1:100	1:25	0	0	+	0
vast 16.000 m3/s	5927	9783	15710	-	1:100	1:25	0	0	0	0
vast 17.000 m3/s	5847	9686	15533	0	1:104	1:28	-/0	0/+	+	0/+
vast 18.000 m3/s	5759	9572	15330	+	1:300	1:31	-/0	0/+	0	0/+
beide open	5945	9923	15867	-	1:78	1:15	+	--	+	--
beide gesloten	5843	9438	15281	+	1:370	1:16	0	-	--	-
RP dicht, HP open	5766	9620	15387	+	1:106	1:27	-/0	0/+	0	0/+
RP open, HP dicht	5932	9812	15744	-	1:99	1:25	0	0	0	0
IJ8000	5943	9202	15145	--	nooit	nooit	--	++	++	+
IJ10000	5978	9304	15282	--	nooit	nooit	--	++	++	+
IJ13000	5931	9356	15287	--	1:100	1:25	-	+	++	+
IJ15000	5915	9442	15357	--	1:100	1:25	-	+	++	+
IJ16000	5912	9587	15499	-	1:100	1:25	0	0	++	+
IJ17000	5886	9604	15490	-	1:100	1:25	0	0	++	+
IJ18000	5869	9617	15486	-	1:100	1:25	0	0	++	+
NR8000	5410	9490	14900	-	1:100	1:25	0	0	++	0
NR10000	5778	9892	15670	--	1:100	1:25	0	0	++	0
NR13000	5928	9781	15709	--	1:100	1:25	0	0	++	0
NR15000	5909	9713	15622	--	1:100	1:25	0	0	++	0
NR16000	5927	9746	15673	-	1:100	1:25	0	0	++	0
WL8000	5615	9721	15336	--	1:20	1:10	++	--	++	--
WL10000	5859	9761	15620	--	1:50	1:19	++	--	++	--
WL13000	6144	9757	15902	--	1:100	1:25	+	-	++	--
WL15000	6016	9641	15657	--	1:100	1:25	+	-	++	--
WL16000	5974	9647	15621	-	1:100	1:25	0	0	++	--
WL17000	5933	9654	15587	-	1:100	1:25	0	0	++	--
WL18000	5915	9658	15573	-	1:100	1:25	0	0	++	--

Overzicht beoordeling afvoerverdelingsvarianten op kosteneffectiviteit en een aantal aanvullende criteria (Een donkeroranje kleur duidt op een slechte score op dit criterium. Omgekeerd duidt een donkergroene kleur juist op een zeer positieve score).



# 1 Inleiding

## 1.1 Kader

Voor het water dat bij Lobith via de Rijn ons land binnenkomt, is in 2006 door het beleid vastgesteld hoe de toen geldende maatgevende afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s verdeeld dient te worden over de riviertakken. Het beleidsuitgangspunt van de afvoerverdeling is vastgelegd in de PKB Ruimte voor de Rivier deel 4:

*'De procentuele afvoerverdeling over de verschillende Rijntakken bij de maatgevende rivierafvoer, geldend voor 15.000 m<sup>3</sup>/s, wordt ook bij de in 2001 vastgestelde maatgevende afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s gehandhaafd. Bij een verdere toename van de maatgevende rivierafvoer boven 16.000 m<sup>3</sup>/s wordt de extra afvoer verdeeld over de Waal en de IJssel.'*

In dit uitgangspunt ligt besloten dat sprake is van een enkelvoudige maatgevende afvoer. Ook is vastgesteld dat wanneer deze enkelvoudige maatgevende afvoer in de toekomst door klimaatverandering toe zou nemen tot boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith, de afvoer via de Nederrijn-Lek niet zou mogen toenemen ('Lek ontzien') en dat het meerdere boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s over Waal en IJssel verdeeld wordt.

Bij de afspraken over de beleidsmatige afvoerverdeling die in 2006 zijn vastgelegd, ging men uit van één maatgevende afvoer. Alleen bij die maatgevende omstandigheden zou de afvoer conform het beleidsuitgangspunt verdeeld moeten worden. De toen geldende maatgevende afvoerverdeling was 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. De regelwerken bij de Pannerdensche Kop en de IJsselkop worden sindsdien zo ingesteld dat bij deze afvoer 10.165 m<sup>3</sup>/s naar de Waal, 2.459 m<sup>3</sup>/s naar de IJssel en 3.376 m<sup>3</sup>/s naar de Nederrijn-Lek gaat. Indien deze enkelvoudige maatgevende afvoer toe zou nemen, bijvoorbeeld als gevolg van klimaatverandering, dan zou de instelling van de regelwerken worden aangepast, zodat bij deze hogere maatgevende afvoer voldaan zou worden aan de daarvoor geldende verdeling.

De nieuwe beschermingsnormen die sinds 1 januari 2017 van kracht zijn, zijn echter niet langer gericht op het keren van één maatgevende waterstand, maar op het voldoen aan een maximaal toelaatbare overstromingskans. Dat betekent dat de hele range aan afvoeren en bijbehorende waterstanden moet worden beschouwd en dat dus ook voor de hele range aan afvoeren bij Lobith van belang is hoe deze over de verschillende Rijntakken verdeeld worden.

## 1.2 Vraagstelling huidig onderzoek

De vraag die nu voorligt luidt: Hoe kunnen we de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling interpreteren in het licht van de nieuwe risicobenadering, waarin we niet langer uitgaan van een enkelvoudige maatgevende afvoer?

Om op deze vraag een antwoord te kunnen geven, moeten eerst de volgende deelvragen worden beantwoord:

- Hoe wordt de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling op dit moment in modellen meegenomen en hoe wordt getracht deze in de praktijk te realiseren?

- Is het mogelijk om de regelwerken bij de Pannerdensche kop en de IJsselkop tijdens hoogwater te wijzigen?
- Als dit niet mogelijk is, zijn er dan redenen (bijvoorbeeld kosteneffectiviteit) om de regelwerken zo aan te willen passen dat dynamische sturing wel mogelijk is?
- Welke afvoerverdelingsvarianten zijn mogelijk wanneer de regelwerken statisch worden ingezet en wat zijn de bijbehorende kosten en baten van iedere variant (welke optie is het meest kosteneffectief)?
- Indien de regelwerken worden aangepast, welke varianten zijn dan mogelijk, en zijn deze varianten kosteneffectief?
- Welke aanvullende criteria zijn naast kosteneffectiviteit in ieder geval ook van belang bij de keuze voor een specifieke afvoerverdeling en hoe scoren de onderzochte varianten op deze criteria?

### 1.3 Dit rapport

Dit rapport doet verslag van de analyses die zijn uitgevoerd om te komen tot een nieuwe interpretatie van de beleidsmatig vast te stellen afvoerverdeling, die aansluit bij de nieuwe risicobenadering.

Na deze inleiding wordt in hoofdstuk 2 de algemene aanpak besproken die is gehanteerd bij de verschillende onderdelen in deze studie. Allereerst wordt ingegaan op de aanpak die gebruikt is om te beoordelen of dynamische sturing met de huidige regelwerken mogelijk is (is de instelling van de regelwerken tijdens een hoogwater bij te stellen?). Vervolgens worden de onderzochte afvoerverdelingsvarianten besproken. Daarna volgt een beschrijving van de methode die is gebruikt om de kosten in termen van investeringskosten voor dijkversterking en overstromingsrisico te bereken. Tot slot wordt in dit hoofdstuk kort ingegaan op de overige beslisinformatie. Hoofdstuk 3 beschrijft de resultaten van het onderzoek naar de regelbaarheid van de huidige regelwerken. De kosten voor dijkversterking en de berekende overstromingsrisico's zijn gerapporteerd in Hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 beschrijft de overige beslisinformatie. En de conclusies staan kort samengevat in Hoofdstuk 6.

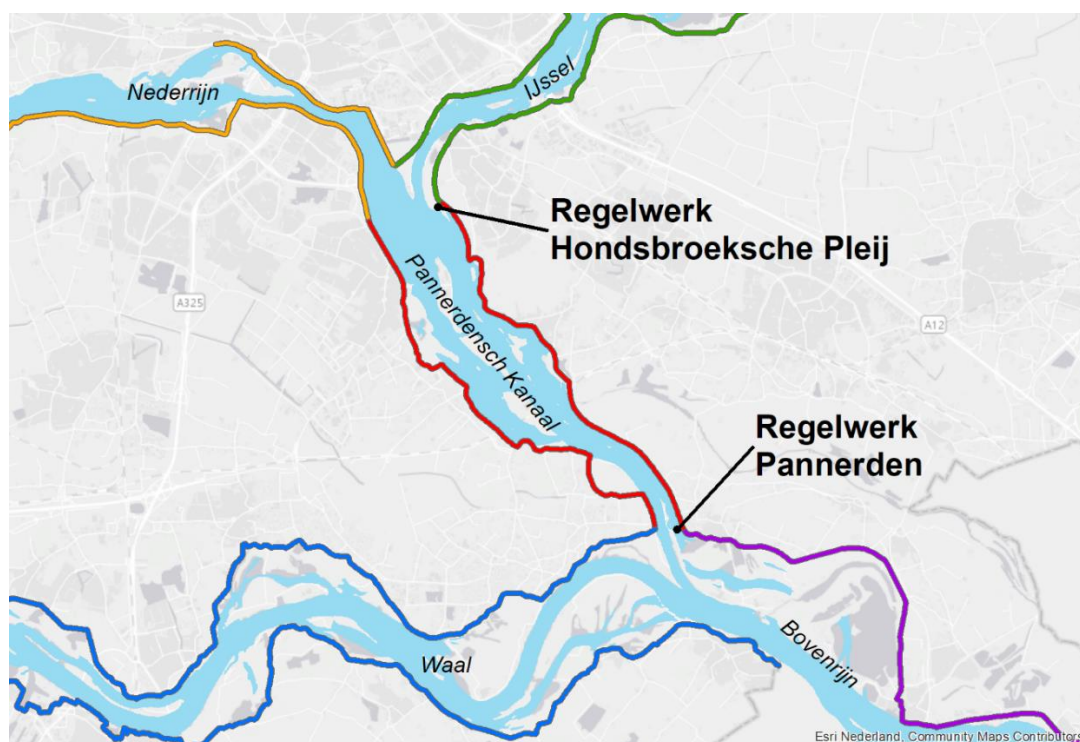
## 2 Aanpak

### 2.1 Aanpasbaarheid regelwerken tijdens hoogwater

Om invulling te kunnen geven aan de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling is allereerst stil gestaan bij de vraag welke afvoerverdelingsvarianten mogelijk zijn met de huidige regelwerken en eventueel met aangepaste regelwerken. Een vraag die beantwoord moet worden is of het mogelijk is om de instelling van de regelwerken tijdens hoogwater aan te passen. Indien dit niet mogelijk is, beperkt dat het aantal door te rekenen varianten voor de huidige situatie.

#### 2.1.1 Huidige regelwerken: kenmerken en werking op hoofdlijnen

In onderstaande kaart is de ligging van de regelwerken bij Pannerden en de Hondsbroeksche Pleij aangegeven.



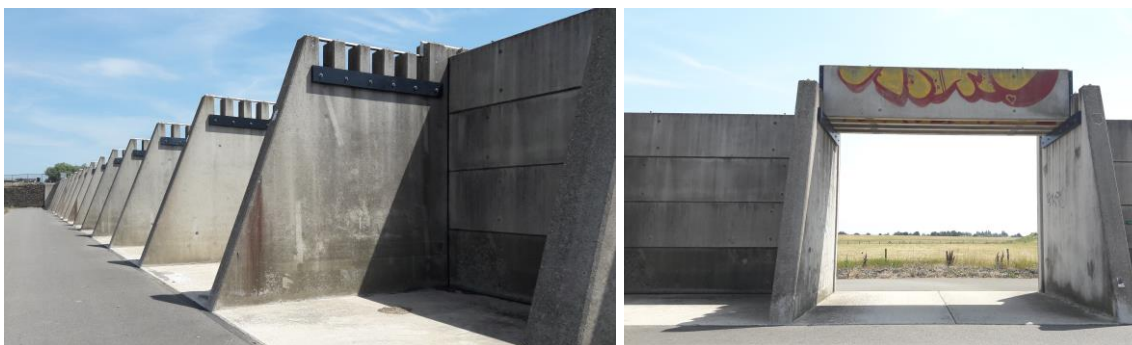
Figuur 2.1 Ligging regelwerken Pannerden en Hondsbroeksche Pleij

Het regelwerk Pannerden is een betonnen constructie van 175 meter breed, met 32 openingen en staanders van 5 meter hoog. Tussen de staanders kunnen betonnen schotten worden geplaatst van 1 bij 5 meter. Door meer of minder betonnen schotten in het regelwerk te plaatsen, wordt de hoeveelheid water die er bij hoogwater doorheen kan stromen gereguleerd. Het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij lijkt op het regelwerk Pannerden, alleen is dit bouwwerk 160 meter lang. Het heeft 30 openingen, waarin elk 4 schotten op elkaar passen. Net als bij het regelwerk Pannerden hebben de schotten een afmeting van 5 bij 1 meter en een dikte van 20 centimeter.

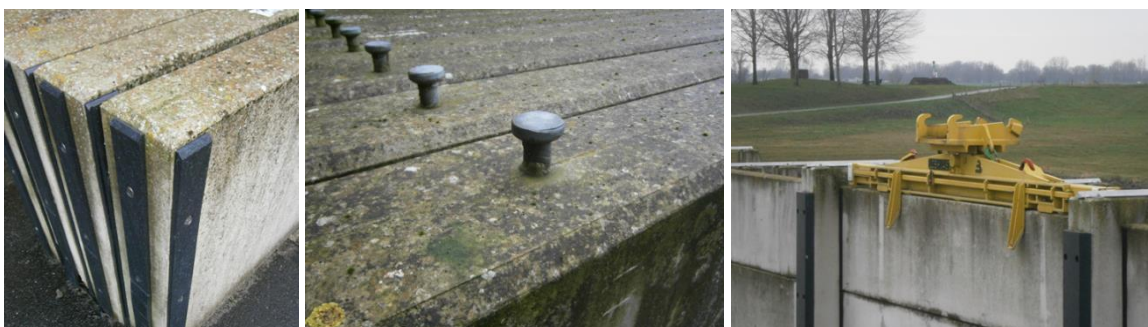


Figuur 2.2 Regelwerk Hondsbroeksche Pleij, van de 30 openingen is er slechts 1 open (foto N. Asselman).

Elk jaar, voor de start van het hoogwaterseizoen, worden beide regelwerken ingesteld om de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling bij 16.000 m<sup>3</sup>/s te realiseren<sup>1</sup>. Door het bijplaatsen of wegnemen van betonnen schotten verandert de hoogte of de breedte van het regelwerk. Dat bepaalt hoeveel water door het regelwerk kan stromen in geval van hoogwater. De schotten worden geplaatst met een mobiele hijskraan. De schotten die niet nodig zijn, worden bovenop de staanders opgeborgen. Bij de Hondsbroeksche Pleij zijn meerpalen geplaatst zodat hier tijdens hoogwater een ponton aan kan meren waarop een kraan past om extra schotten te plaatsen of weg te nemen. Het plaatsen van schotten kan alleen wanneer de schotten zakken onder hun eigen gewicht. Bij regelwerk Pannerden zijn geen voorzieningen om tijdens hoogwater schotten te plaatsen of te trekken.



Figuur 2.3 Staanders met daartussen op elkaar gestapelde schotten (links). Schotten die niet nodig zijn worden bovenop de staanders opgeborgen (rechts) (foto's N. Asselman)



Figuur 2.4 Links: schotten met aan de uiteindes kunststof strippen om de wrijving bij het plaatsen en trekken van schotten te verminderen, Midden: trekogen aan de bovenkant van de schotten, rechts: adapter die gebruikt wordt om ook onder water de trekogen te kunnen vinden en schotten te kunnen trekken. (foto's M. Schropp)

<sup>1</sup> Dit gebeurt op basis van berekeningen met het meest recente actuele hydraulische model dat in de zomer voorafgaand aan het hoogwaterseizoen beschikbaar komt. Voor het hoogwaterseizoen van 2018/2019 is dit het waqua-rijn-j18\_5-v1 model.

## 2.1.2 Aanpak onderzoek

Om na te gaan of de schotten in beide regelwerken kunnen zakken onder invloed van hun eigen gewicht zijn de volgende werkzaamheden uitgevoerd:

- Met verschillende WAQUA modellen is een beeld verkregen van de waterstanden bij de regelwerken en het verval over de regelwerken bij verschillende rivierafvoeren te Lobith.
- Vervolgens zijn de krachten in beeld gebracht die op de schotten werken. Dit zijn:
  - Horizontale belastingen door verval;
  - Verticale krachten als gevolg van gewicht;
  - Verticale krachten door onderstroming: wanneer een schot deels in het water hangt zal er ook een verticale kracht werken door de (hoge) stroomsnelheid langs de onderrand van het schot);
  - Wrijving tussen schotten en pijlers: Om de schotten op eigen gewicht te kunnen laten zakken, moet het eigen gewicht (in combinatie met de hydrodynamische krachten door onderstroming of overstort) groter zijn dan de wrijvingskracht tussen de schotten en de pijlers. Die wrijving wordt bepaald door de materialen die op elkaar gedrukt worden. Op dit moment wordt het Hakorit op de schotten tegen het beton van de pijlers gedrukt. Hiervan wordt een (zeer) grote wrijving verwacht, hoewel lager dan de wrijving tussen beton en beton.
- Op basis van deze bevindingen is beoordeeld of het wel of niet mogelijk is om de instelling van de regelwerken tijdens hoogwater aan te passen.
- Ook worden suggesties gedaan voor aanpassing van de regelwerken om het plaatsen of trekken van schotten te vereenvoudigen.

## 2.2 Vaststellen afvoerverdelingsvarianten

Voor het water dat bij Lobith via de Rijn ons land binnenkomt, is in 2006 door het beleid vastgesteld hoe de toen geldende maatgevende afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s verdeeld dient te worden over de riviertakken. Hierbij is uitgegaan van een enkelvoudige maatgevende afvoer.

De interpretatie van de huidige beleidsmatige afspraken over de afvoerverdeling in de modellen is veelal dat de afvoer op de Nederrijn-Lek in het afvoerbereik van 16.000 m<sup>3</sup>/s tot 18.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith niet verder toeneemt dan 3.380 m<sup>3</sup>/s. In modelstudies wordt hiertoe uitgegaan van tijdens hoogwater stuurbare regelwerken. De indruk bestaat echter dat deze dynamische sturing met de huidige regelwerken in een hoogwater-situatie niet realistisch is. Dit wordt nader onderzocht in (zie Hoofdstuk 3).

Met de overstromingsrisicobenadering dient de hele range aan afvoeren en bijbehorende waterstanden te worden beschouwd en is het dus voor de hele range aan afvoeren bij Lobith van belang is hoe deze over de verschillende Rijntakken verdeeld worden. In deze paragraaf wordt beschreven hoe nu in modellen met de beleidsmatige afvoerverdeling wordt omgegaan, en welke verdelingen met de huidige regelwerken en het huidig regelbereik mogelijk zijn, om daarmee in deze studie te kunnen verkennen wat in deze systematiek een 'optimale afvoerverdeling' is.

### 2.2.1 Referentie

#### **Referentievariant: conform het OntwerpInstrumentarium (OI)**

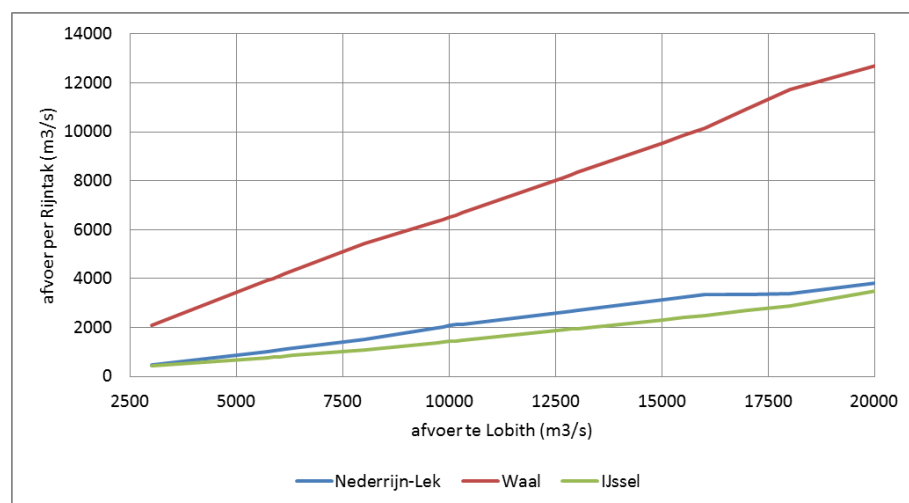
De verdeling zoals die momenteel wordt aangehouden bij het OntwerpInstrumentarium (OI) wordt gebruikt als referentievariant.

Binnen het Ontwerpinstrumentarium voor Rivieren wordt gewerkt met de GRADE-afvoerstatistiek in combinatie met de database van het Deltamodel voor zichtjaar 2015 (zie ook de uitgangspunten in Bijlage A). Er worden dus binnen het OI zelf geen berekeningen uitgevoerd, maar de resultaten van het Deltamodel worden gebruikt. Het Deltamodel hanteerde verschillende instellingen voor verschillende zichtjaren, er vanuit gaande dat de maatgevende afvoer in de loop van de tijd zou worden verhoogd van 16.000 m<sup>3</sup>/s (huidige situatie), naar 17.000 m<sup>3</sup>/s in 2050 en 18.000 m<sup>3</sup>/s in het jaar 2100. Bij het OI wordt uitgegaan van een vaste aansturing voor de hele periode. Dit is de aansturing behorend bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Het regelwerk Pannerden wordt in het Deltamodel geschematiseerd als een overlaat met een hoogte van NAP 13,75 m. Het regelwerk Hondsbroeksche Pleij wordt actief gestuurd volgens de volgende regels:

- $Q_{Lobith} < 9.980 \text{ m}^3/\text{s}$ : één schuif staat open (breedte van 5 meter)
- $9.980 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{Lobith} < 9.990 \text{ m}^3/\text{s}$ : schuif gaat dicht
- $9.990 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{Lobith} < 16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ : het regelwerk is dicht
- $16.000 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{Lobith}$ : afvoer Neder-Rijn maximaal 3.380 m<sup>3</sup>/s

Met deze instelling wordt de Nederrijn-Lek ontzien (maximale afvoer van 3.380 m<sup>3</sup>/s) voor afvoeren hoger dan 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith. Bij afvoeren groter dan 18.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith kan de Nederrijn-Lek niet langer worden ontzien. De afvoer op de Nederrijn-Lek neemt dan toch verder toe.

Figuur 2.5 toont de afvoer over de verschillende Rijntakken als functie van de afvoer te Lobith.

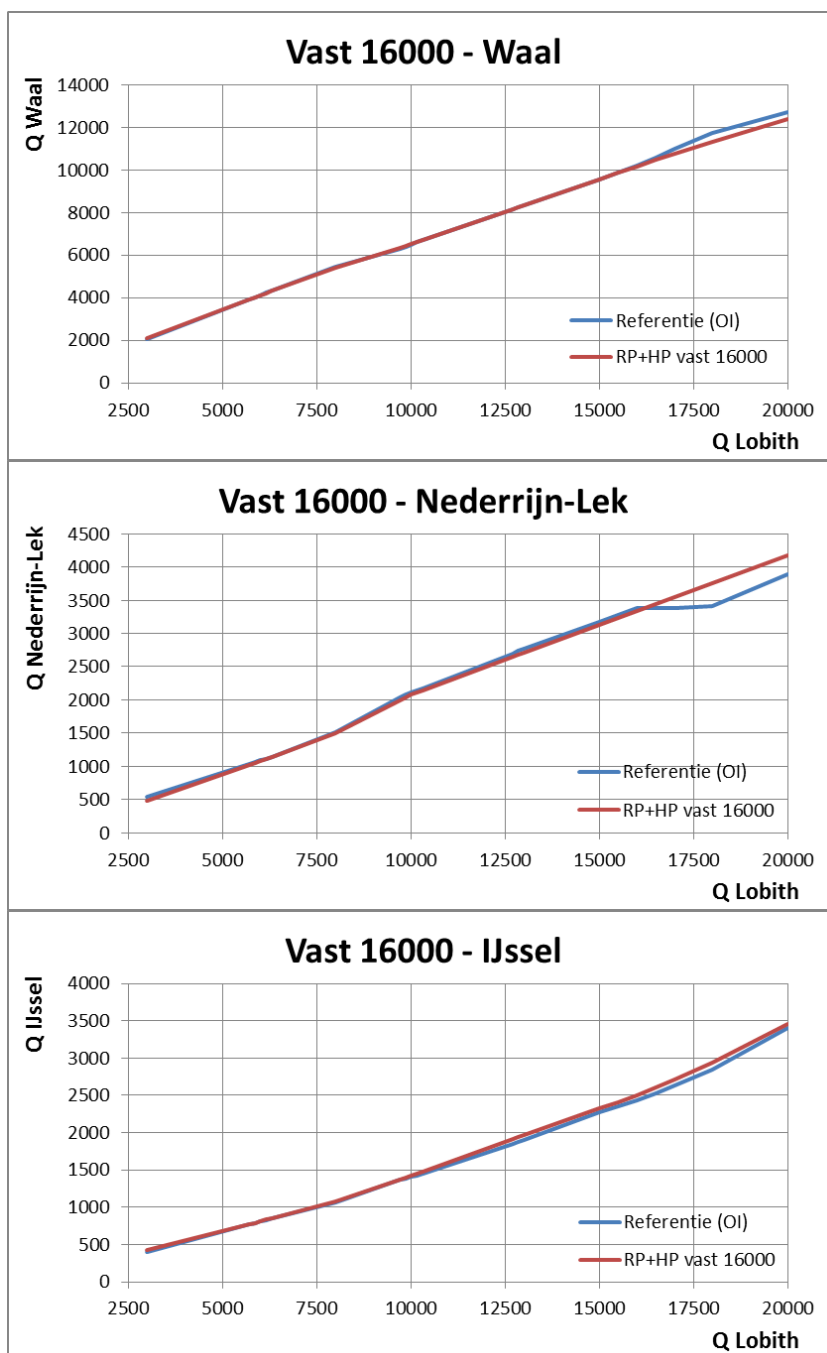


Figuur 2.5 Afvoerverdeling in de referentiesituatie

## 2.2.2 Verdelingen met de huidige regelwerken en het huidige regelbereik

### Vaste instelling op basis van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith

Op dit moment worden de regelwerken aan het begin van het hoogwaterseizoen zo ingesteld dat een rivierafvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith als volgt wordt verdeeld: 10.165 m<sup>3</sup>/s gaat naar de Waal, 3.376 m<sup>3</sup>/s wordt afgevoerd via de Nederrijn/Lek en 2.459 m<sup>3</sup>/s stroomt via de IJssel. De instelling van de regelwerken staat voor dat jaar 'vast' en de regelwerken beïnvloeden vanuit die instelling (logischerwijs) ook andere afvoeren dan 16.000 m<sup>3</sup>/s. De wijze waarop het water vervolgens bij hogere en lagere afvoeren over de Rijntakken wordt verdeeld is berekend met WAQUA (Spruyt en Asselman, 2016).



Figuur 2.6 Afvoerdeling bij een vaste instelling van de regelwerken op een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith

De verdeling over de verschillende Rijntakken als functie van de afvoer te Lobith is te zien in Figuur 2.6. Bij 16.000 m<sup>3</sup>/s is de verdeling identiek aan die in de referentiesituatie, maar bij een afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith gaat er 430 m<sup>3</sup>/s minder naar de Waal en bijna 350 m<sup>3</sup>/s te veel naar de Nederrijn-Lek. De IJssel krijgt 84 m<sup>3</sup>/s extra.

In termen van waterstandsveranderingen komt dit (bij benadering) neer op ruim 20 cm lagere waterstanden op de Waal, terwijl de waterstanden op de Nederrijn-Lek en IJssel respectievelijk bijna 25 cm en 8 cm hoger uitvallen<sup>2</sup>.

De afname van de afvoer op de Waal wordt veroorzaakt doordat in de referentiesituatie, bij afvoeren boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith, het regelwerk Pannerden verder dicht wordt gezet. Dit gebeurt niet bij de vaste instelling op 16.000 m<sup>3</sup>/s. Daardoor stroomt te veel water naar het Pannerdensch kanaal en te weinig naar de Waal.

Bij de Hondsbroeksche Pleij wordt dit teveel aan water verdeeld over Nederrijn-Lek en IJssel. Omdat de Hondsbroeksche Pleij vrijwel helemaal dicht staat, krijgt de IJssel relatief weinig extra water. Het meeste extra water wordt afgevoerd via de Nederrijn-Lek. Deze tak wordt bij deze instelling dus niet ontzien.

### **Vaste instelling op basis van 17.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith**

Bij de tweede doorgerkende variant zijn de regelwerken ingesteld op de gewenste afvoerverdeling bij een maatgevende afvoer van 17.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. De afvoeren per tak zijn niet in een figuur weergegeven, maar zitten tussen de lijnen in Figuur 2.6 en Figuur 2.7 in. Dat betekent dat de verdeling bij 17.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith ongeveer is zoals gewenst, maar dat er bij 16.000 m<sup>3</sup>/s 210 m<sup>3</sup>/s te veel naar de Waal gaat (10 cm waterstandsverhoging) en bijna 240 m<sup>3</sup>/s te weinig naar de Nederrijn-Lek (ruim 15 cm waterstandsvaling), terwijl dit bij een afvoer van 18.000 te Lobith omgekeerd is: dan gaat er 225 m<sup>3</sup>/s te weinig naar de Waal en 160 m<sup>3</sup>/s te veel naar de Nederrijn-Lek. De IJssel krijgt bij beide afvoeren respectievelijk 27 m<sup>3</sup>/s en 67 m<sup>3</sup>/s meer afvoer (waterstand 3 à 6 cm hoger).

### **Vaste instelling op basis van 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith**

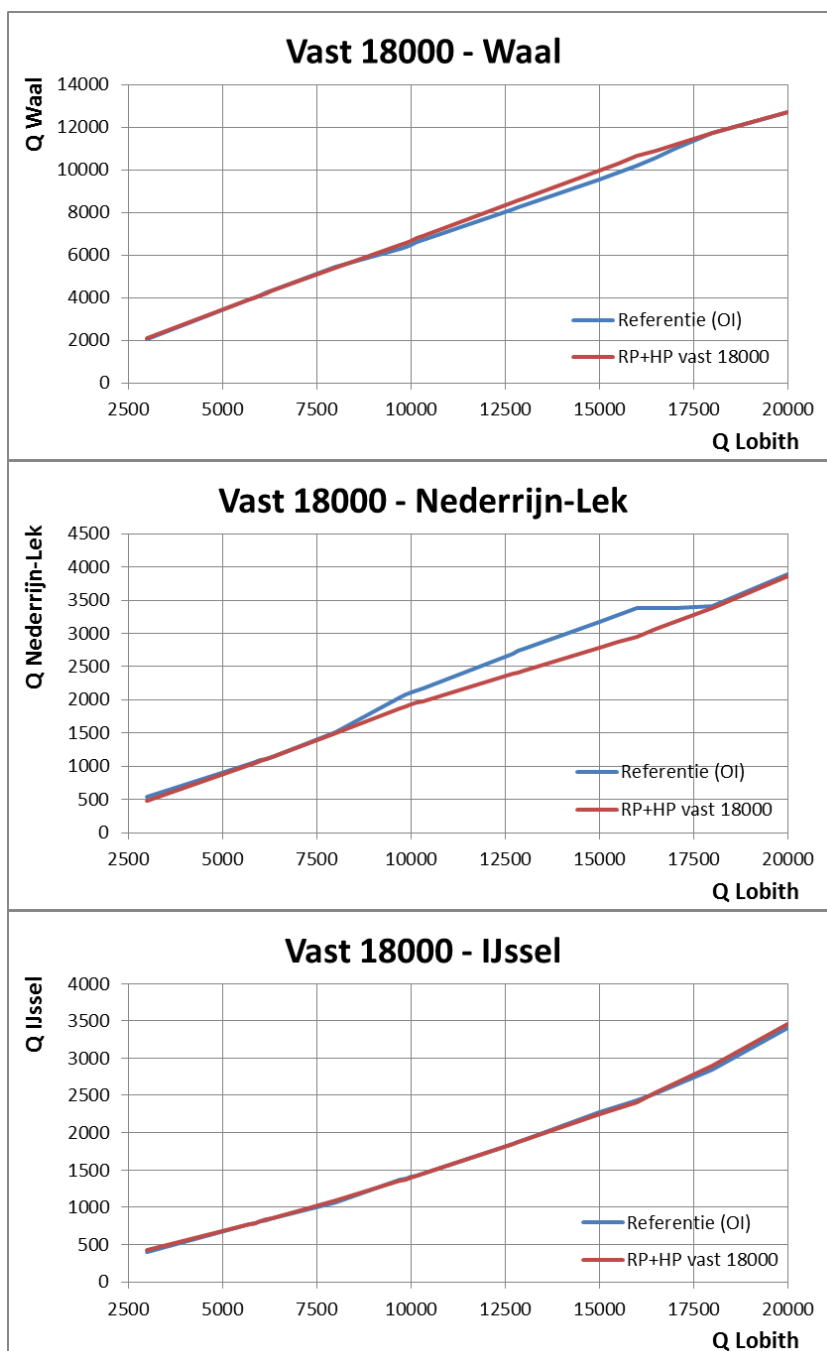
Bij de derde variant zijn de regelwerken ingesteld op de gewenste afvoerverdeling bij een maatgevende afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. De hierbij behorende afvoeren over de verschillende Rijntakken zijn te zien in Figuur 2.7. Bij 18.000 m<sup>3</sup>/s is de verdeling identiek aan die in de referentiesituatie, maar bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith gaat er bijna 450 m<sup>3</sup>/s te veel naar de Waal en 430 m<sup>3</sup>/s te weinig naar de Nederrijn-Lek. De IJssel krijgt 16 m<sup>3</sup>/s minder. Dit leidt tot een ruim 20 cm hogere waterstand op de Waal en lagere waterstanden op de Nederrijn-Lek en IJssel, respectievelijk 30 cm en 1,5 cm.

Deze verschuiving in de afvoerverdeling wordt veroorzaakt doordat in de referentiesituatie het regelwerk Pannerden bij 16.000 m<sup>3</sup>/s ver open staat en dit bij nog hogere afvoeren steeds verder dicht wordt gezet. Bij een vaste instelling op 18.000 m<sup>3</sup>/s staat het regelwerk ook bij lagere afvoeren al zeer ver dicht. Er gaat dan dus te veel afvoer naar de Waal en te weinig naar het Pannerdensch Kanaal.

Bij de Hondsbroeksche Pleij is het omgekeerde het geval. In de referentiesituatie staat het regelwerk bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s nagenoeg dicht. Bij hogere afvoeren wordt het regelwerk verder opengezet. Bij een vaste instelling op 18.000 m<sup>3</sup>/s staat het regelwerk echter bij alle afvoeren al ver open. Daardoor gaat er relatief meer water naar de IJssel. Echter, omdat de afvoer op het Pannerdensch kanaal fors lager uitvalt (een groter deel van de afvoer stroomt immers naar de Waal), is zelfs op de IJssel sprake van een (kleine) afname. De grootste afname treedt op de Nederrijn-Lek op: er stroomt bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith al te weinig water naar het Pannerdensch Kanaal, en van die afvoer stroomt vervolgens ook nog een te groot deel naar de IJssel.

<sup>2</sup> Afhankelijk van wind- en golfplooeffecten hoeft een verandering in waterstand zich niet een op een door te vertalen in een verandering in benodigde kruinhoogte van de dijk.

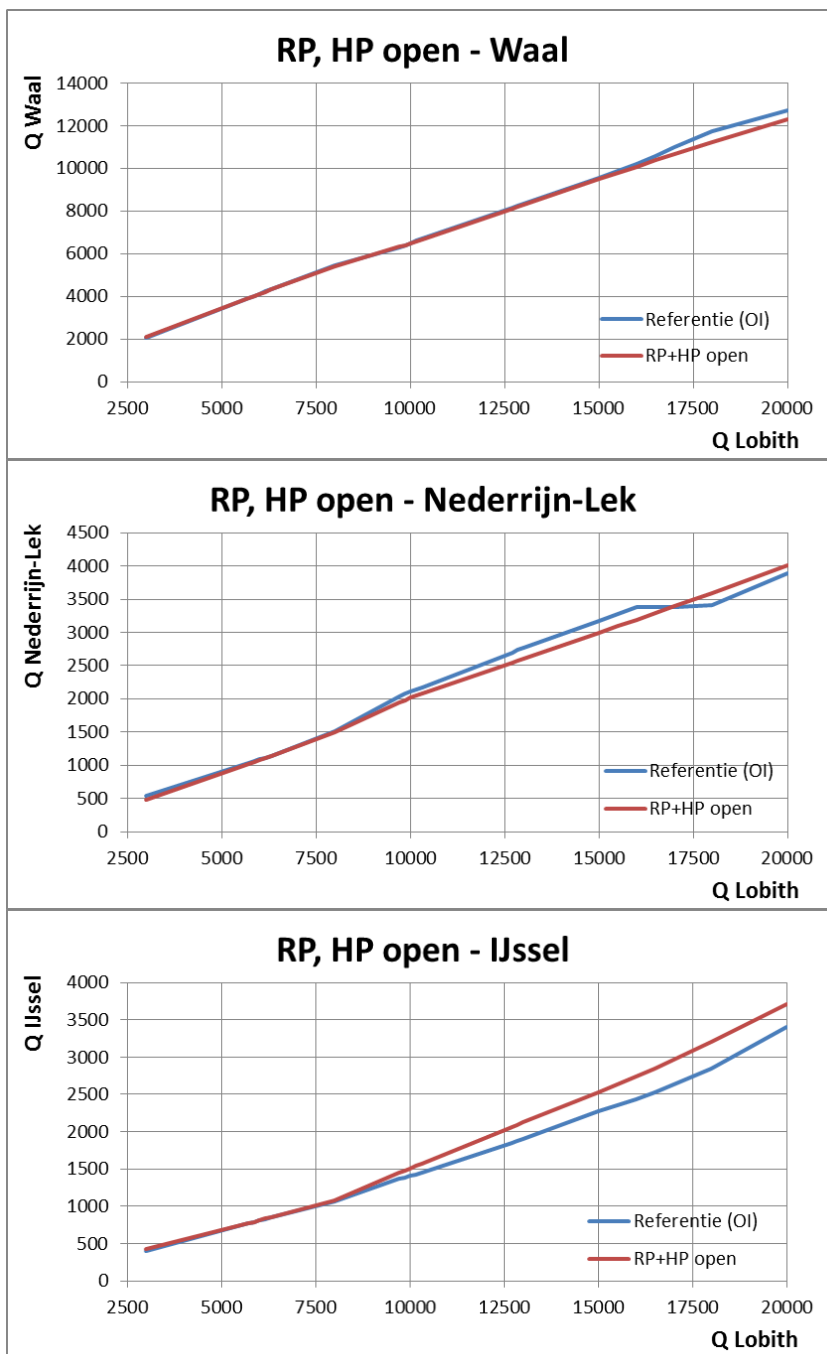




Figuur 2.7 Afvoerverdeling bij een vaste instelling van de regelwerken op een afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith

### Beide regelwerken open

Naast varianten met een gewenste verdeling van de afvoer bij 16.000 m<sup>3</sup>/s, 17.000 m<sup>3</sup>/s en 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith, zijn vier varianten doorgerekend die meer gericht zijn op het verkennen van de hoekpunten. Als eerste is gekeken naar de afvoerverdeling die te verwachten is wanneer beide regelwerken open staan. De hierbij behorende afvoeren over de Rijntakken zijn berekend met WAQUA (Spruyt en Asselman, 2018) en zijn weergegeven in Figuur 2.8.



Figuur 2.8 Afvoerdeling bij een vaste instelling van de regelwerken, waarbij beide regelwerken open staan

De Waal ontvangt bij afvoeren boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith te weinig water. Dit 'tekort' bedraagt maximaal 530 m<sup>3</sup>/s bij een afvoer te Lobith van 18.000 m<sup>3</sup>/s (waterstanden vallen ongeveer 25 cm lager uit). De Nederrijn-Lek ontvangt bij afvoeren onder de 17.000 m<sup>3</sup>/s te weinig water en daarboven te veel water. De IJssel ontvangt al bij relatief lage afvoeren te Lobith te veel water. Dit loopt op tot maximaal 350 m<sup>3</sup>/s extra bij een afvoer te Lobith van 18.000 m<sup>3</sup>/s (gemiddeld ruim 30 cm hogere waterstanden).

De lagere afvoer op de Waal wordt veroorzaakt doordat het regelwerk Pannerden open blijft staan. In de referentie wordt dit regelwerk bij afvoeren boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith verder dichtgezet, waardoor er meer water naar de Waal wordt gestuurd. Bij lagere afvoeren is geen verschil te zien, omdat het regelwerk in de referentie dan ook al bijna helemaal open staat. Omdat het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij ook helemaal open staat gaat vervolgens te veel water naar de IJssel. Dit effect treedt ook al bij lagere afvoeren op, omdat het regelwerk dan in de referentiesituatie juist vrijwel helemaal dicht staat. Bij afvoeren hoger dan 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith neemt de extra afvoer via de IJssel niet verder toe. Dit komt doordat het regelwerk Hondsbroeksche Pleij bij zeer hoge afvoeren in de referentiesituatie ook steeds verder open wordt gezet. De Nederrijn-Lek krijgt dan wel extra afvoer te verwerken.

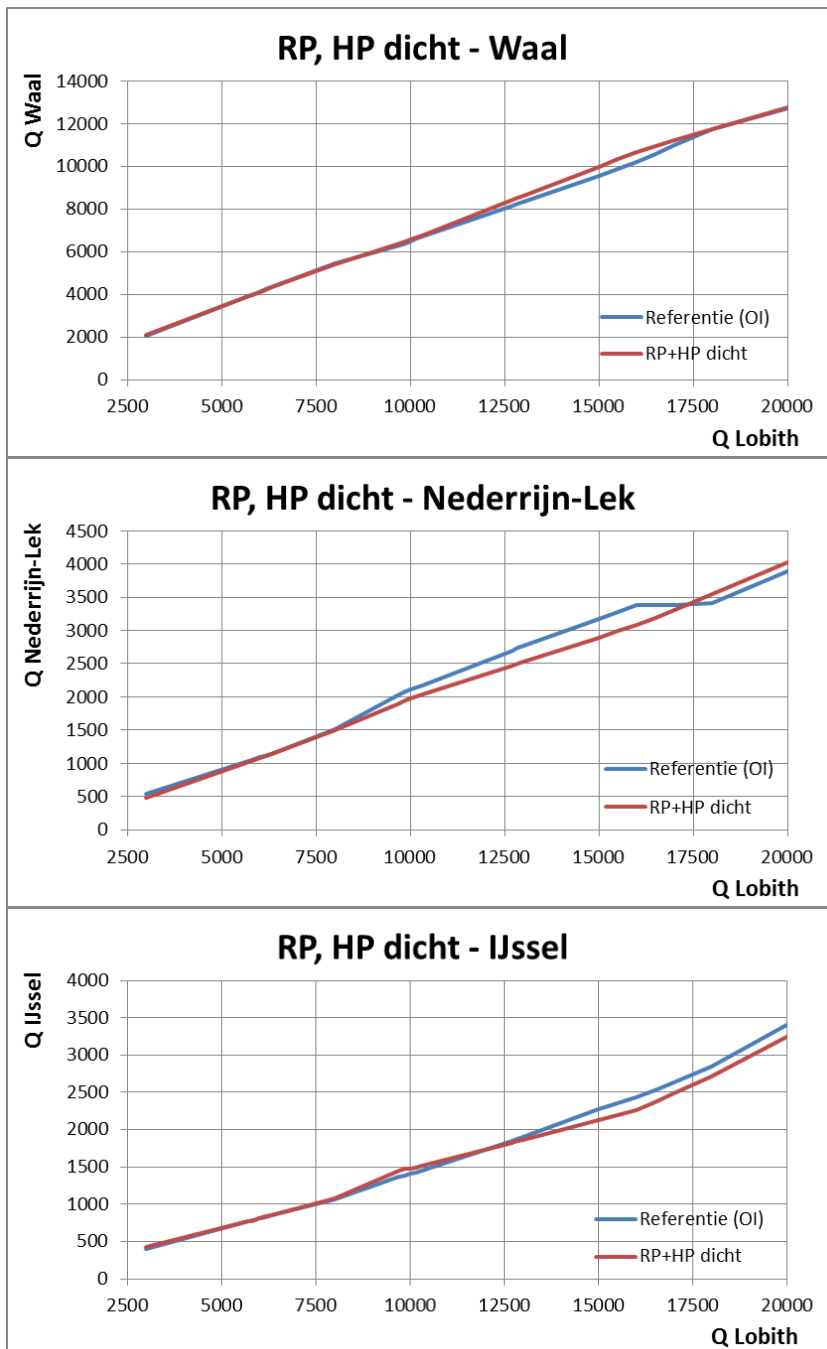
### **Beide regelwerken dicht**

De tweede uiterste situatie, is de situatie waarbij beide regelwerken helemaal gesloten zijn. De verdeling die daarbij optreedt is te zien in Figuur 2.9. Dit leidt tot extra afvoer naar de Waal. Bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith bedraagt de toename op de Waal 480 m<sup>3</sup>/s (waterstandsstijging van ruim 20 cm). Onder deze omstandigheden voert de Nederrijn-Lek ruim 300 m<sup>3</sup>/s minder af (gemiddelde waterstandsdaling ruim 20 cm). Bij afvoeren boven de 17.500 m<sup>3</sup>/s te Lobith, neemt ook op de Nederrijn-Lek de afvoer toe ten opzichte van de referentiesituatie. De IJssel heeft te maken met een afname van de afvoer van ongeveer 150 m<sup>3</sup>/s. Dit resulteert in een waterstandsdaling met ongeveer 15 cm.

De toename van de afvoer over de Waal bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith wordt veroorzaakt door het dichtzetten van het regelwerk Pannerden. In de referentiesituatie staat dit regelwerk bij deze afvoer vrijwel helemaal open. Bij hogere afvoeren wordt het regelwerk Pannerden in de referentiesituatie ook geleidelijk dicht gezet. De afvoer is daardoor bij beide varianten bij zeer hoge afvoeren vrijwel gelijk.

Omdat het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij helemaal dicht staat gaat er verhoudingsgewijs te weinig water naar de IJssel. Bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith is de afname vooral het gevolg van de te lage afvoer op het Pannerdensch Kanaal (in de referentiesituatie staat het regelwerk dan immers ook vrijwel helemaal dicht). Bij hogere afvoeren komt het vooral doordat het regelwerk dicht staat.

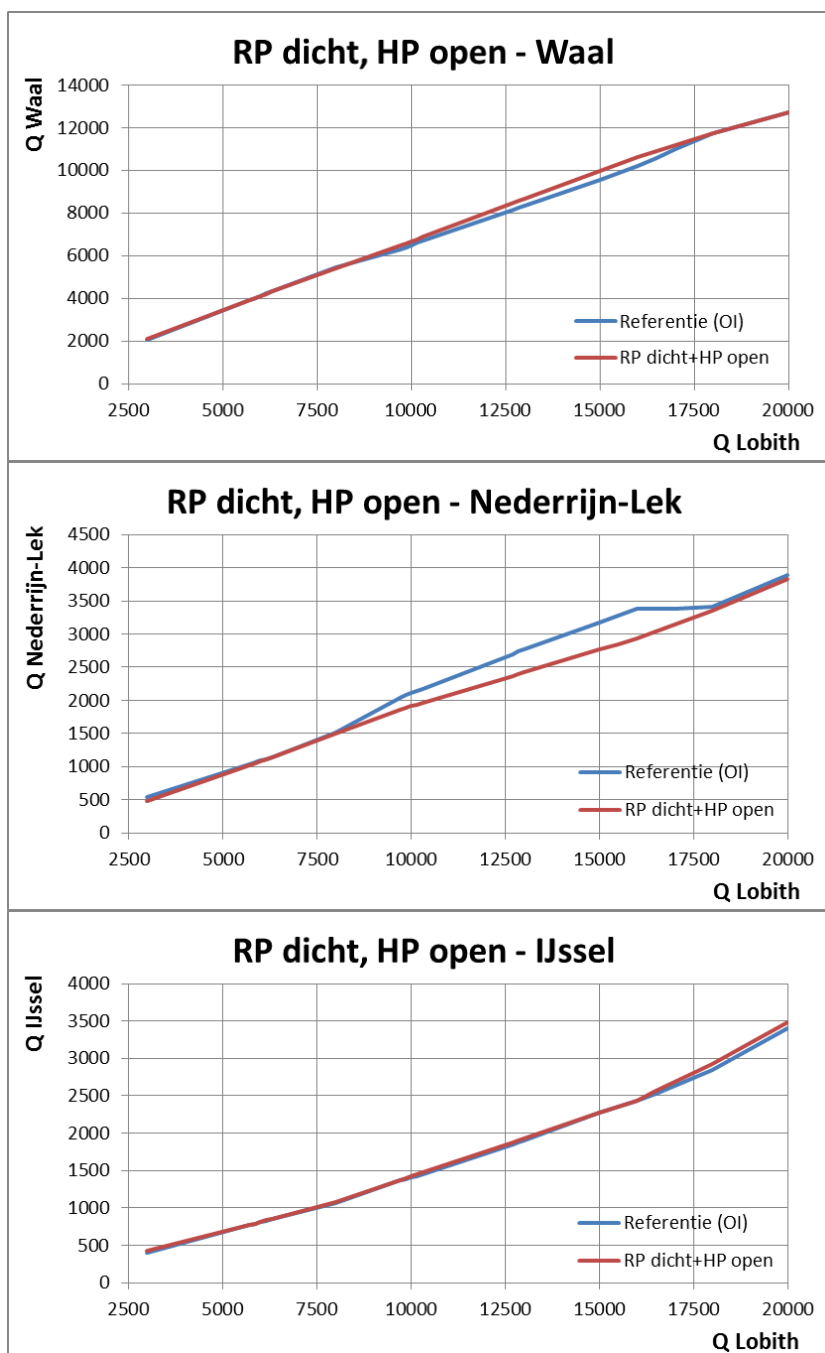
De Nederrijn-Lek krijgt bij middelhoge afvoeren te weinig water. Dit komt vooral doordat er te weinig water via het Pannerdensch Kanaal wordt afgevoerd. Bij hogere afvoeren krijgt de Nederrijn-Lek juist te veel water. Dat komt doordat de afvoer op het Pannerdensch Kanaal onder die omstandigheden vrijwel gelijk is aan de afvoer in de referentiesituatie, terwijl het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij geheel gesloten is. Er wordt daardoor te veel water naar de Nederrijn-Lek gestuurd.



Figuur 2.9 Afvoerdeling bij een vaste instelling van de regelwerken, waarbij beide regelwerken gesloten zijn

### Regelwerk Pannerden gesloten, Hondsbroeksche Pleij open

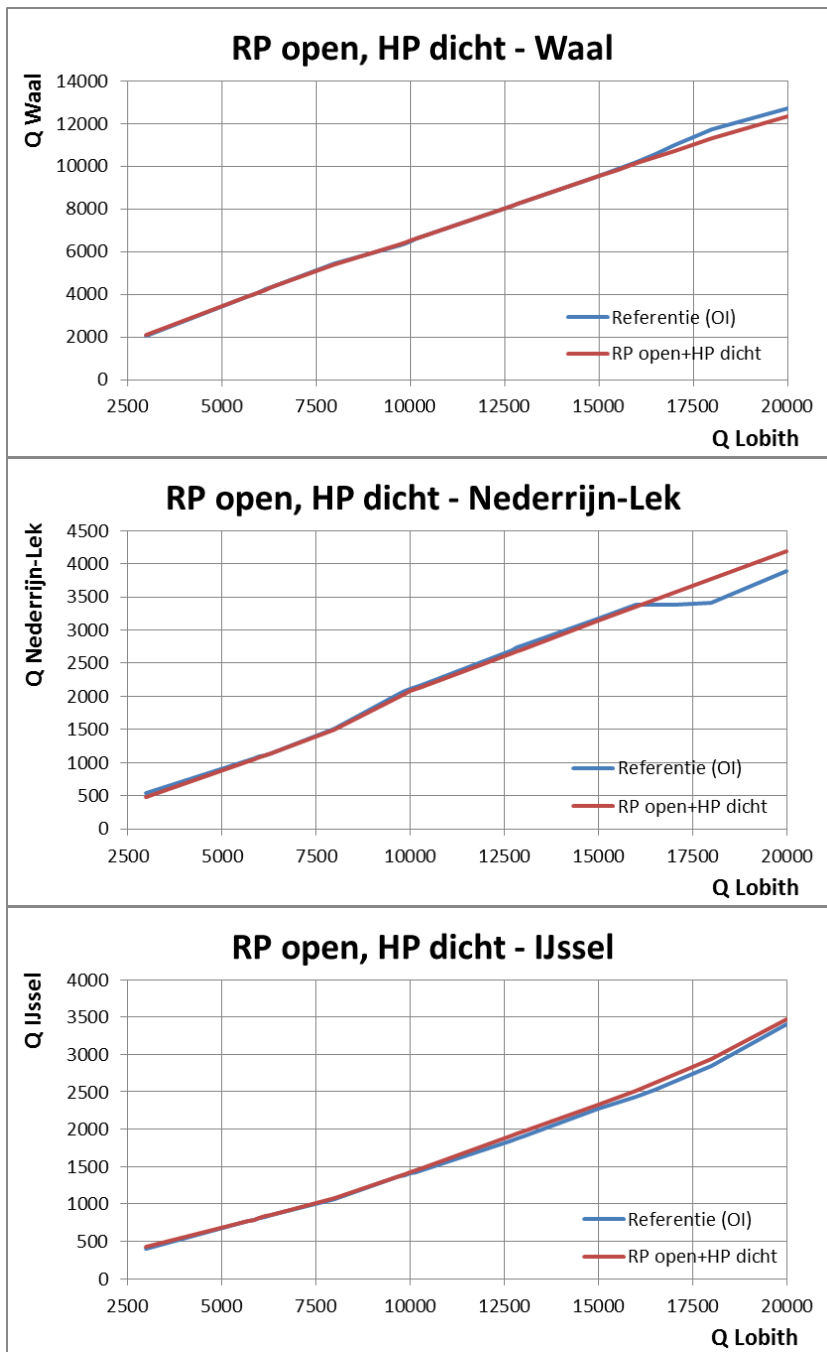
Vervolgens is gekeken naar de afvoerdeling wanneer regelwerk Pannerden geheel gesloten is en de Hondsbroeksche Pleij helemaal open staat. De afvoerdeling die dan optreedt is te zien in Figuur 2.10. Dit hoekpunt lijkt sterk op de vaste instelling van de regelwerken uitgaande van een afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith (zie Figuur 2.7). Onder die omstandigheden is het regelwerk Pannerden immers ook ver gesloten, terwijl het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij vrijwel helemaal open staat.



Figuur 2.10 Afvoerdeling bij een vaste instelling van de regelwerken, waarbij regelwerk Pannerden gesloten is en de Hondsbroeksche Pleij open staat

### Regelwerk Pannerden open, Hondsbroeksche Pleij gesloten

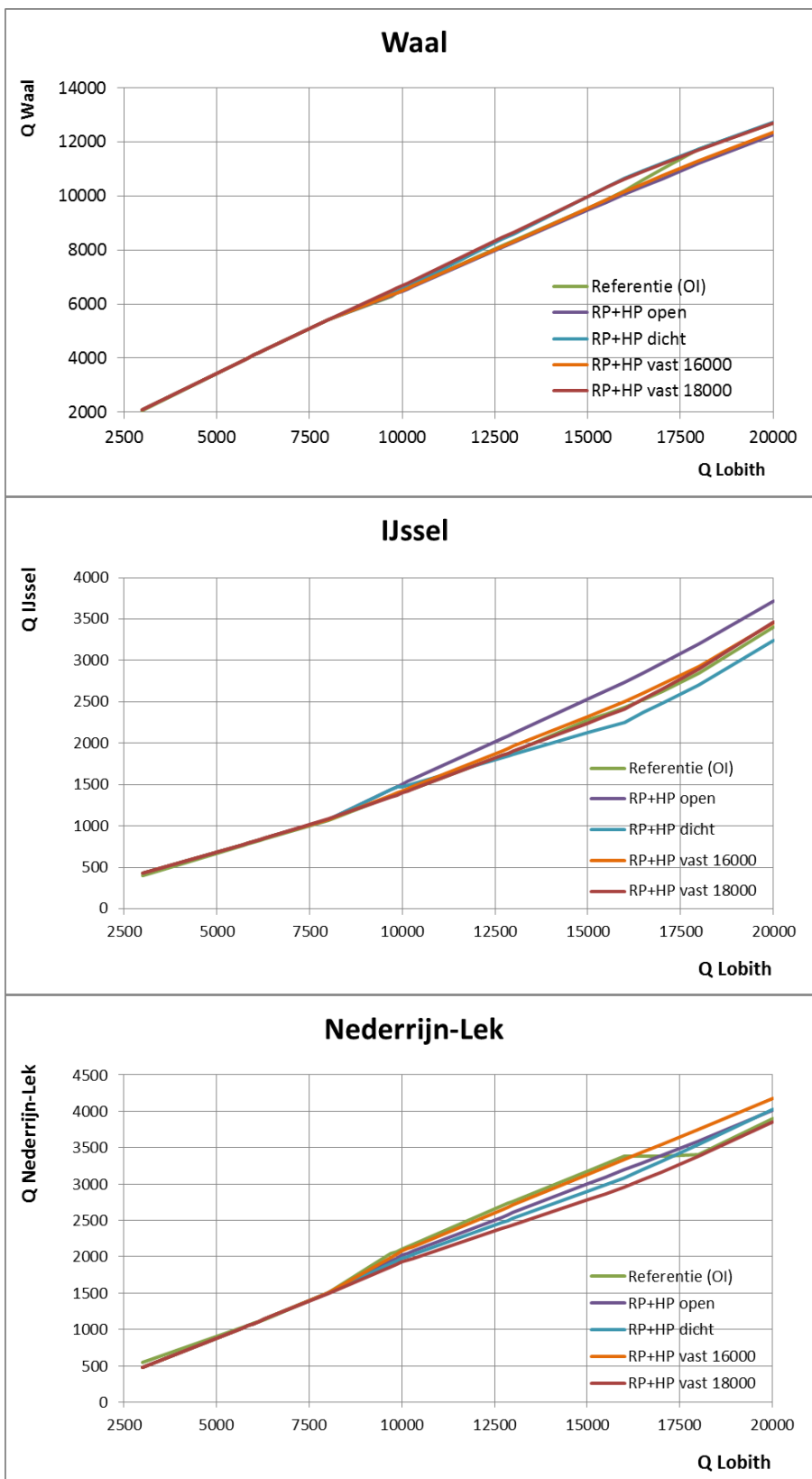
Tot slot is gekeken naar de situatie waarbij het regelwerk Pannerden helemaal open staat en de Hondsbroeksche Pleij gesloten is. Dit hoekpunt lijkt veel op de huidige instelling van de regelwerken. Dit blijkt ook uit de afvoerdeling in Figuur 2.11. Deze lijkt sterk op de verdeling bij een vaste instelling uitgaande van 16.000 te Lobith (zie Figuur 2.6).



Figuur 2.11 Afvoerdeling bij een vaste instelling van de regelwerken, waarbij regelwerk Pannerden open staat en de Hondsbroeksche Pleij gesloten is

## Regelbereik

De verschillende vaste instellingen van de regelwerken leveren meerdere rechte lijnen op in de grafiekjes waarin de afvoer over een Rijntak wordt weergegeven als functie van de afvoer te Lobith. De buitenste lijnen geven een indicatie van het huidige regelbereik (Figuur 2.12).



Figuur 2.12 Regelbereik huidige regelwerken

Wanneer de regelwerken stuurbaar zijn (ofwel: de instelling is tijdens hoogwater te wijzigen), dan kun je 'heen en weer' bewegen tussen de verschillende rechte lijnen in Figuur 2.12. Zoals te zien is aan de groene lijn in de figuur, is in de referentie aangenomen dat de instelling van de regelwerken bij afvoeren tussen de 16.000 m<sup>3</sup>/s en 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith wordt aangepast. Het regelbereik neemt echter niet verder toe.

### 2.2.3 Verdelingen uitgaande van aangepaste regelwerken

Een nog groter regelbereik is alleen haalbaar wanneer de regelwerken worden aangepast. Er kan dan bij een lagere Bovenrijnafvoer al worden afgeweken van onderstaande lijnen en er kunnen verdelingen gerealiseerd worden die buiten deze lijnen vallen. Dit laatste is ook mogelijk door rivierverruimingsmaatregelen (Klimaatpark IJsselpoort kan er voor zorgen dat er meer water naar de IJssel stroomt dan in deze figuur staat), alleen is de stuurbaarheid in dat geval minder groot.

In deze studie is gekeken of het een kostenbesparing oplevert wanneer een tak bij relatief lage afvoeren al wordt ontzien. De redeneerlijn hierachter is dat op deze tak dan mogelijk geen dijkversterking nodig is. Dat levert een relatief grote besparing op. Daar staat tegenover dat de extra afvoer over een of twee andere takken daar mogelijk tot beperkte meerkosten leidt.

#### **IJssel ontzien**

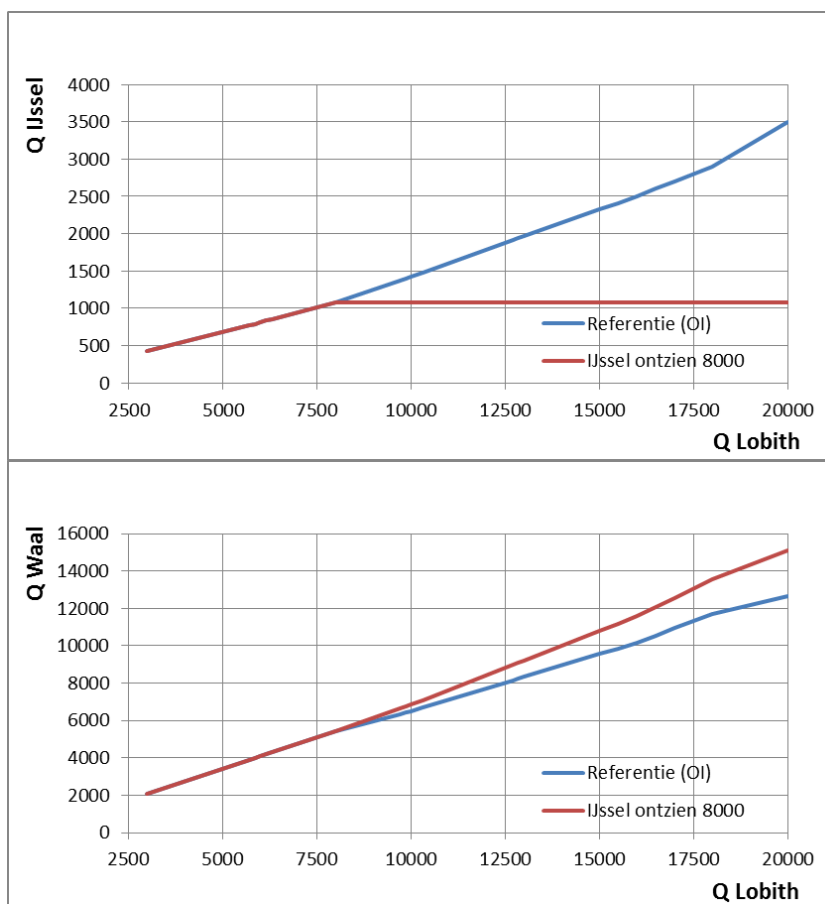
Dit principe is onderzocht voor een aantal varianten waarbij de IJssel is ontzien en de extra afvoer naar de Waal wordt gestuurd. Omdat niet op voorhand te zeggen is bij welke afvoer het ontzien van de IJssel een besparing oplevert, zijn 7 varianten doorgerekend. Bij de meest extreme variant wordt de IJssel ontzien bij afvoeren vanaf 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith<sup>3</sup>. Voor de IJssel en de Waal zijn de afvoeren als functie van de afvoer te Lobith te zien in Figuur 2.13. Bij een afvoer van 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith, bedraagt de afvoer op de IJssel ongeveer 1.080 m<sup>3</sup>/s. Een verdere toename van de afvoer bij Lobith resulteert niet in een toename van de afvoer op de IJssel. Bij een afvoer te Lobith van iets meer dan 8.000 m<sup>3</sup>/s, bedraagt de toename op de Waal nog maar enkele m<sup>3</sup>/s. Dit neemt toe tot maximaal 2.400 m<sup>3</sup>/s extra afvoer, wanneer de afvoer bij Lobith 20.000 m<sup>3</sup>/s zou bedragen. Dit resulteert in een ruim 1 m hogere waterstand op de Waal dan in de referentie. Op de IJssel zijn de waterstanden ruim 2m lager dan in de referentie.

Bij de overige varianten is de afvoer op de IJssel gemaximeerd vanaf Rijnafvoeren van respectievelijk 10.000 m<sup>3</sup>/s, 13.000 m<sup>3</sup>/s, 15.000 m<sup>3</sup>/s, 16.000 m<sup>3</sup>/s, 17.000 m<sup>3</sup>/s, en 18.000 m<sup>3</sup>/s.

---

<sup>3</sup> Dit betreft een theoretische verdeling. Om dit mogelijk te maken moeten de regelwerken worden aangepast.



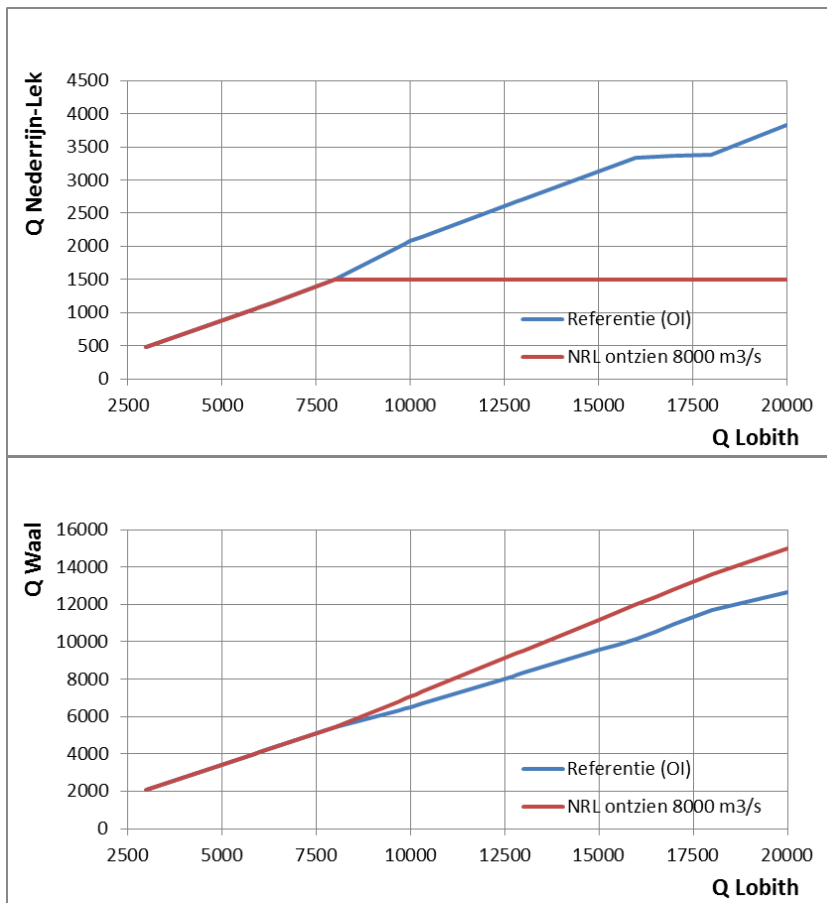


Figuur 2.13 Afvoerverdeling over de IJssel en de Waal wanneer de IJssel bij afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s of meer te Lobith wordt ontzien en de extra afvoer via de Waal wordt afgevoerd

### Nederrijn-Lek ontzien

Op vergelijkbare wijze zijn berekeningen uitgevoerd waarbij de Nederrijn-Lek is ontzien. De extra afvoer (die normaal naar de Nederrijn zou stromen) wordt via de Waal afgevoerd. Er zijn 5 varianten doorgerekend. Bij de meest extreme variant wordt de afvoer via de Nederrijn-Lek gemaximeerd vanaf 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Voor de Nederrijn-Lek en de Waal zijn de afvoeren als functie van de afvoer te Lobith te zien in Figuur 2.14. Bij een afvoer van 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith, bedraagt de afvoer op de Nederrijn-Lek ongeveer 1.500 m<sup>3</sup>/s. Een verdere toename van de afvoer bij Lobith resulteert dan niet in een verdere toename van de afvoer op de Nederrijn-Lek. Bij een afvoer te Lobith van iets meer dan 8.000 m<sup>3</sup>/s, bedraagt de toename op de Waal nog maar enkele m<sup>3</sup>/s. Dit neemt toe tot ruim 2.300 m<sup>3</sup>/s extra afvoer, wanneer de afvoer bij Lobith 20.000 m<sup>3</sup>/s bedraagt. Op de Waal leidt dat tot een ongeveer 1m hogere waterstand, terwijl de waterstanden op de Nederrijn-Lek ongeveer 1,7 m lager zijn dan in de referentie.

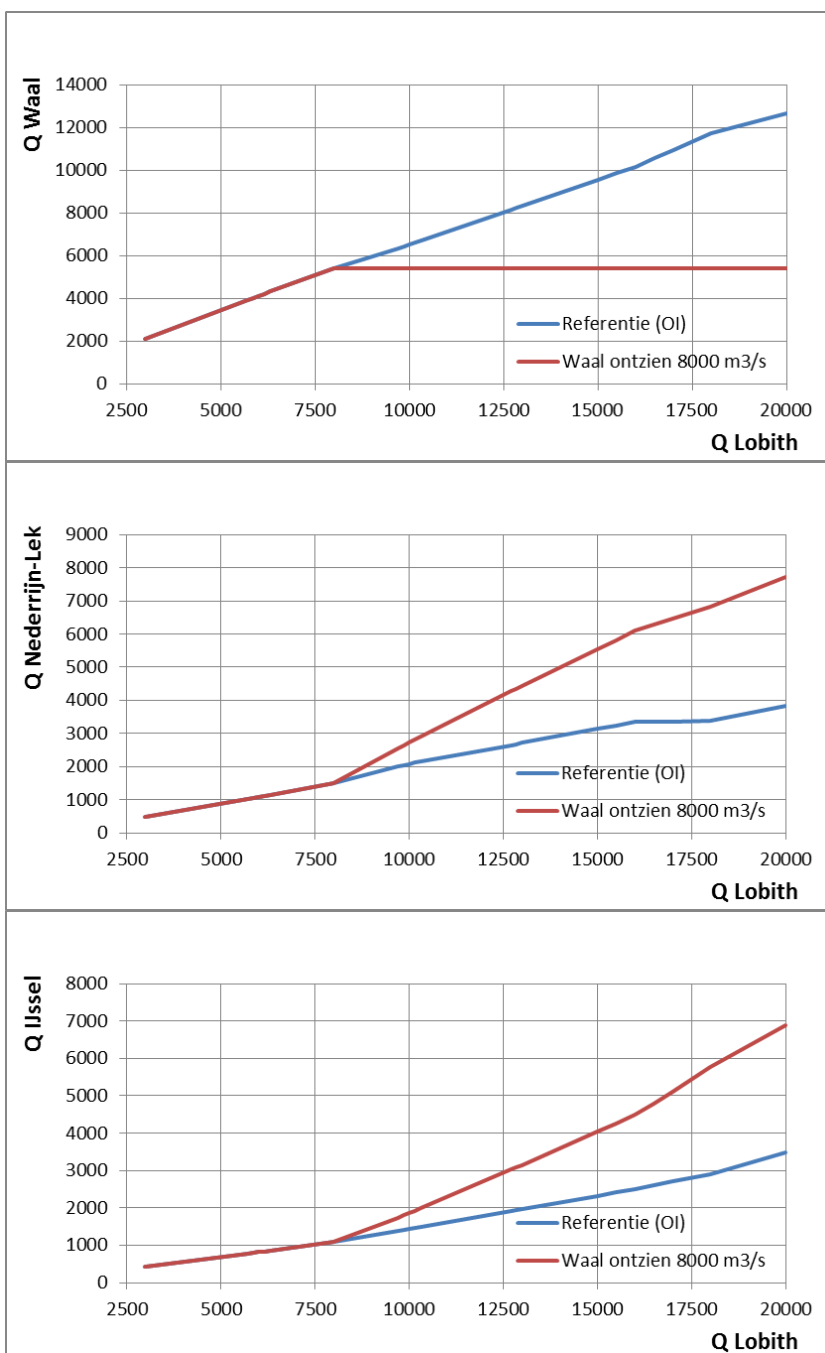
Bij de overige varianten is de afvoer op de Nederrijn-Lek gemaximeerd vanaf een afvoer van 10.000 m<sup>3</sup>/s, 13.000 m<sup>3</sup>/s, 15.000 m<sup>3</sup>/s en 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Ontzien vanaf 17.000 m<sup>3</sup>/s of 18.000 m<sup>3</sup>/s levert geen extra informatie op, omdat de Nederrijn-Lek bij deze afvoeren in de referentiesituatie (blauwe lijn in Figuur 2.14) ook al wordt ontzien (de afvoer op de Nederrijn-Lek is bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s tot 18.000 m<sup>3</sup>/s constant).



Figuur 2.14 Afvoerverdeling over de Nederrijn-Lek en de Waal wanneer de Nederrijn-Lek bij afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s of meer te Lobith wordt ontzien en de extra afvoer via de Waal wordt afgevoerd

## Waal ontzien

Bij de varianten waarbij de Waal wordt ontzien is aangenomen dat de extra afvoer wordt verdeeld over Nederrijn-Lek en IJssel. Wanneer de Waal wordt ontzien bij alle afvoeren boven de 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith resulteert dit in de verdeling zoals getoond in Figuur 2.15. Bij een afvoer van 20.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith, neemt de afvoer op de Waal met ruim 7.000 m<sup>3</sup>/s af. Dit resulteert in een waterstandsdaling van 3,4m. Op de Nederrijn-Lek en de IJssel neemt de afvoer met ongeveer 3.880 m<sup>3</sup>/s toe. Dit resulteert daar in hogere waterstanden: ongeveer 2,9 m hoger op de Nederrijn-Lek en 3,1 m hoger op de IJssel, aannemende dat de dijken daar op gedimensioneerd zouden kunnen worden. Er zijn 7 varianten doorgerekend, waarbij de afvoer op de Waal wordt afgetopt bij afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s, 10.000 m<sup>3</sup>/s, 13.000 m<sup>3</sup>/s, 15.000 m<sup>3</sup>/s, 16.000 m<sup>3</sup>/s, 17.000 m<sup>3</sup>/s, en 18.000 m<sup>3</sup>/s.



Figuur 2.15 Afvoerverdeling over de Waal, Nederrijn-Lek en IJssel wanneer de Waal bij afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s of meer te Lobith wordt ontzien en de extra afvoer via de Nederrijn-Lek en de IJssel wordt afgevoerd

### 2.3 Totale kosten

Alle varianten zijn beoordeeld op kosten. De kosten bestaan uit:

- kosten voor dijkversterking,
- het overstromingsrisico uitgedrukt in geld,
- kosten voor eventuele aanpassing van de regelwerken.

Hieronder wordt besproken hoe de kosten bepaald zijn.

### 2.3.1 Kosten voor dijkversterking

Voor alle varianten zijn de kosten voor dijkversterking berekend met het instrument OKADER (Opgave en Kostenanalyse Dijkversterking en Rivierverruiming). Gewerkt is met de versie van augustus 2018. In deze versie is rekening gehouden met de aanwezige voorlanden (verkleining van de opgave voor *piping*), de aangepaste windstatistiek (meetpunt Deelen in plaats van Schiphol) en onzekerheidstoelagen die zijn gebaseerd op de uitgeïntegreerde waterstanden zoals bepaald door WBI/OI.

In Bijlage A staat een beknopt overzicht van de belangrijkste aannames en uitgangspunten die gehanteerd worden in dit instrument. Een gedetailleerde omschrijving van de methode en alle uitgangspunten is te vinden in Van der Meij et al. (2016). Een beschrijving van de werking van het instrument is te vinden in De Grave et al. (2017a).

Naast de algemene uitgangspunten die gehanteerd zijn bij het opstellen van de methode van Van der Meij et al. (2016), zijn de volgende specifieke uitgangspunten gehanteerd:

- Voor de basisscenario's zijn de kosten voor dijkversterking berekend voor de periode 2025-2125. Dit komt overeen met de periode die is gehanteerd voor de MKBA Lange-TermijnAmbitie Rivieren (LTAR).
- Voor het moment waarop de dijken voor de eerste keer versterkt worden is uitgegaan van de planning van de HWBP programmering en de waterschappen. Deze planning is ook gebruikt bij de 2<sup>e</sup> ronde MKBA-LTAR.
- De ontwerplevensduur van dijken is in het instrument gesteld op 50 jaar.
- In de contante-waardeberekeningen worden de kosten contant gemaakt naar het basisjaar 2025 met een discontovoet van 4,5%. Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de invloed van de waarde van de discontovoet vast te stellen.
- Uitgegaan wordt van prijspeil 2013.
- De kosten worden gecorrigeerd voor de restwaarde die de versterkingen nog hebben aan het einde van de doorgerekende periode. Het kan immers zijn dat in het ene scenario de dijk net versterkt is in 2124, terwijl deze in het andere scenario net in 2126 aan de beurt zou zijn. Dit zou een oneerlijke vergelijking opleveren.

De kosten voor dijkversterking worden berekend voor alle Rijntakken (Bovenrijn, Waal, Pannerdensch Kanaal, Nederrijn-Lek, en IJssel). De kosten voor dijkversterking langs de Bovenrijn worden echter niet getoond in dit rapport omdat deze kosten altijd hetzelfde zijn, ongeacht de gekozen afvoerverdelingsvariant.

Er wordt opgemerkt dat hoogwaterstanden op de Lek niet alleen afhankelijk zijn van de rivierafvoer, maar ook van de kans dat een hoogwater samenvalt met stormopzet en sluiting van de Maeslantkering. Dit betekent dat de belastingen voor iedere afvoerverdelingsvariant opnieuw bepaald zouden moeten worden met HYDRA en dat de *fragility curves* voor overslag/overloop ook voor iedere variant zouden moeten worden aangepast. Door Asselman et al. (2018) is echter geconcludeerd dat, wanneer men geïnteresseerd is in de kosten voor de Nederrijn-Lek als geheel, de fout die ontstaat door de belastingen langs de Lek niet steeds opnieuw met HYDRA te berekenen klein is (enkele procenten). Wanneer men geïnteresseerd is in de kosten voor individuele dijktrajecten, dan kan de fout groter zijn (meer dan 10%). Omdat in deze studie gekeken wordt naar de kosten voor rivierverruiming per riviertak, zijn de belastingen voor de Lek niet voor iedere variant opnieuw bepaald. Bij de IJsseldelta is sprake van een vergelijkbare situatie. Ook hier zijn de belastingen niet per variant opnieuw bepaald.

### 2.3.2 Overstromingsrisico's

#### Kans

Een wijziging in de afvoerverdeling heeft ook gevolgen voor de overstromingsrisico's. Wanneer de belasting op een riviertak bij een variant groter wordt dan in de referentie, dan leidt dit tot een grotere overstromingskans totdat de dijken versterkt zijn. Omgekeerd zullen de overstromingskansen op de riviertak die wordt ontzien afnemen. Dit leidt tot een toename van het overstromingsrisico op de ene tak en een afname op de andere tak.

De overstromingskansen zijn berekend met OKADER. De overstromingsrisico's zijn dus berekend met dezelfde methode en uitgangspunten die zijn gebruikt bij de MKBA Lange-TermijnAmbitie Rivieren (maar wel met een nieuwere versie van OKADER). Een uitgebreide beschrijving van de methode is onder meer te vinden in Asselman et al. (2017).

#### Gevolgen

Ook de gevolgen van een overstroming kunnen veranderen wanneer de belasting op een riviertak verandert. Een hogere buitenwaterstand resulteert in grotere waterdieptes en/of een groter overstroomd oppervlak. Beide aspecten (verandering in overstromingskansen en verandering in de gevolgen in geval van overstromen) worden beschouwd bij het berekenen van de overstromingsrisico's.

Veranderingen in de gevolgen in geval van overstromen zijn berekend met behulp van eerder uitgevoerde overstromingssimulaties (in het kader van VNK), waarbij het verschil in schade is bepaald als functie van de buitenwaterstand door gebruik te maken van overstromingssimulaties bij (1) een buitenwaterstand gelijk aan toetspeil en (2) een buitenwaterstand die een decimeringshoogte<sup>4</sup> hoger is (zie Asselman en Wagenaar, 2016). Daartussen is lineair geïnterpoleerd en erbuiten is geëxtrapolleerd. Bij het bepalen van de gevolgen is rekening gehouden met zowel de economische schade als met de aantallen slachtoffers en getroffen. Deze zijn, net als bij WV21 en het Deltaprogramma Veiligheid, gemonetariseerd (zie Bijlage B voor meer informatie). Omdat de verandering in waterstand niet bij alle afvoeren even groot is, is een gewogen gemiddelde verandering bepaald. In de basisberekeningen is uitgegaan van een normale verdeling van de weegfactoren, waarbij de verandering in waterstand bij 15.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith het zwaarste weegt. Om de gevoeligheid van deze aanname na te gaan zijn de berekeningen herhaald met andere weegfactoren. Bij de eerste gevoeligheidsanalyse is uitgegaan van een Gumbel-verdeling (de verandering bij de 1:100 afvoer telt het zwaarste mee, maar doordat een Gumbel-verdeling schever is dan een normale verdeling, wordt ook aanzienlijk gewicht toe gekend aan veranderingen in waterstanden bij zeer hoge afvoeren). Bij de tweede gevoeligheidsanalyse is uitgegaan van een uniforme verdeling. De verandering telt bij alle afvoeren even zwaar mee.

De kosten en baten als gevolg van een verandering in het overstromingsrisico zijn in de tijd verdisconteerd. Daarbij is uitgegaan van 1,5% economische groei per jaar. Voor de discontovoet is een waarde van 4,5% gebruikt.

### 2.3.3 Aanpassing van de regelwerken

Wanneer de stroomsnelheden te groot zijn om tijdens hoogwater schotten bij te plaatsen of te trekken, dan is een ingrijpende aanpassing van de regelwerken nodig om dynamische regelbaarheid mogelijk te maken.

<sup>4</sup> Dit is een waterstand met een 10 keer kleinere kans van voorkomen,

Een inlaatconstructie zoals gebruikt bij Veessen-Wapenveld is niet geschikt voor dit doel, omdat deze inlaat slechts beperkt kan worden gebruikt om te sturen. De kleppen in deze constructie kunnen alleen helemaal dicht of helemaal open staan. Wanneer de kleppen halfopen staan is de verwachting dat er trillingen op kunnen treden waardoor de inlaatconstructie bezwijkt. Dit betekent dat er een regelwerk gebouwd zou moeten worden dat lijkt op een stuw. Qua kostenindicatie kan uitgegaan worden van de kostenraming voor de bouw van een nieuwe stuw zoals bij Linne.

Bij de KostenEffectiviteitsAnalyse (KEA) die is uitgevoerd voor het Deltaprogramma (Stratelligence, 2013) zijn ook suggesties gedaan voor aanpassing van de splitsingspunten om bepaalde afvoerverdelingen mogelijk te maken. Gekeken is naar:

- Een beweegbare drempel in het zomerbed van het Pannerdensch Kanaal, zodat er minder afvoer naar het Pannerdensch Kanaal gaat en er meer water naar de Waal stroomt. Het op deze manier afbuigen van 2.000 m<sup>3</sup>/s naar de Waal met een drempel of stuw zorgt voor waterstandeffecten stroomopwaarts (tot in Duitsland).
- Verruiming van de Boven-Waal: deze opstuwung kan worden voorkomen wanneer gekozen wordt voor een andere optie, namelijk het verruimen van de Boven-Waal. In de KEA is deze optie niet verder uitgewerkt, maar aangenomen mag worden dat het hier om een zeer forse verruiming gaat waarvoor grote binnendijkse maatregelen nodig zijn.
- Verruiming van het zomerbed in de bovenloop van de IJssel en de Hondsbroeksche Pleij. Deze optie is ook niet nader beschouwd;
- Een regelwerk in de Neder-Rijn in de vorm van een extra stuw met schutsluis nabij Arnhem.

Een overzicht van de maatregelen en de kosten zoals geraamd in de KEA is gegeven in onderstaande tabel.

Tabel 2.1 Kostenramingen maatregelen en constructies om regelwerken dynamisch te maken, en eventueel het regelbereik te vergroten (Bron: Stratelligence 2013)

Maatregel	investeringskosten (M€)	jaarlijkse kosten voor B&O (M€)
Beweegbare drempel	210*	3,2
Extra kosten dijkversterking Duitsland	915	2,3
Verruiming BovenWaal (extra afvoer naar Waal)	?	?
Verruiming bovenloop IJssel	?	?
Stuw in Nederrijn	180	2,7
Scheepvaartsluis naast stuw	92	1,8
Scheepvaartsluis naast drempel	84	1,7

\* afhankelijk van de doorgerekende variant worden deze kosten gebruikt of kosten die 9 miljoen lager liggen.

#### 2.3.4 Gevoeligheidsanalyse

Voor de volgende uitgangspunten is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

##### Koploperprojecten

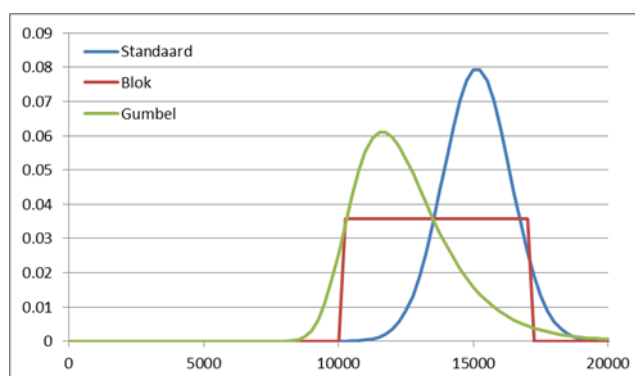
Bij het bepalen van de versterkingsopgave maakt het uit of de zogenaamde koploperprojecten wel of niet worden uitgevoerd. Langs de Rijntakken bestaan de koploperprojecten uit de bypass Varik-Heesselt<sup>5</sup> en Klimaatpark IJsselpoort. Bij de MKBA die in het kader van LTAR is uitgevoerd werd in de referentie aangenomen dat deze koploperprojecten zouden worden uitgevoerd.

<sup>5</sup> De bypass Varik-Heesselt is inmiddels geschrapt. We hebben de berekeningen echter niet herhaald omdat het doel voor dit project vooral is om na te gaan of de uitkomsten erg gevoelig zijn voor eventueel te nemen rivierverruimende maatregelen (in algemene zin).

Later is besloten om dit uitgangspunt aan te passen en alleen inrichtingsmaatregelen mee te nemen waarvoor al een besluit is genomen. Omdat nog geen besluit is genomen over de koploperprojecten, worden deze dus niet langer mee genomen in de referentiesituatie van de MKBA-LTAR. In deze studie is eveneens aangenomen dat de koploperprojecten geen deel uitmaken van de referentiesituatie. Er is een korte analyse uitgevoerd om na te gaan of het uitvoeren van de koploperprojecten tot andere resultaten zou leiden.

### Verandering in gevolgen in geval van overstromen

Zoals beschreven in hoofdstuk 2.3.2 wordt bij het berekenen van de overstromingsrisico's rekening gehouden met een verandering in de gevolgen als gevolg van een hogere of lagere buitenwaterstand. Omdat hierbij wordt uitgegaan van een (gewogen) gemiddelde verandering in buitenwaterstand, zijn analyses uitgevoerd waarbij de weging is aangepast. Naast een normale verdeling is gebruik gemaakt van een Gumbel verdeling en van een uniforme verdeling.



Figuur 2.16 gebruikte weging bij het bepalen van de gewogen gemiddelde waterstandsverandering

### Discontovoet

Investeringskosten en overstromingsrisico's worden beide contant gemaakt. In een gevoeligheidsanalyse is nagegaan of aanpassing van de discontovoet tot andere resultaten zou leiden.

### Innovatieve maatregelen

Omdat OKADER gebruik maakt van 'traditionele' manieren van dijkversterking (in grond of met relatief dure constructies zoals damwanden) en innovatieve maatregelen zoals geotextiel niet zijn meegenomen, vallen de kosten voor dijkversterking relatief hoog uit. In deze gevoeligheidsanalyse is nagegaan wat het effect zou zijn van het meenemen van innovatieve maatregelen om de pipingopgave op te lossen.

Voorbeelden van innovatieve maatregelen om de pipingopgave op te lossen zijn:

- - DMC-drainagebuizen;
- - Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG);
- - Verticaal ingebracht grof-zandfilter.

Van deze drie innovatieve maatregelen liggen de kosten van het grof-zand filter het laagst, en de DMC drainagetechnieken het hoogst. De kosten van het Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG) liggen ertussenin. Omdat de verwachting is dat deze techniek op de meeste plekken kan worden toegepast, en omdat voor deze techniek de meeste gegevens beschikbaar zijn, is voor deze innovatieve pipingmaatregel een kostenkental vastgesteld. Hiervoor is gebruik gemaakt van ramingen die Waterschap Rivierenland heeft ontvangen van diverse aannemers. Deze kosten komen neer op 1,2 M€/km aan totale investeringskosten incl. BTW.

Dit betekent dat bij deze gevoeligheidsanalyses de volgende uitgangspunten zijn gehanteerd:

- Voor noodzakelijke pipingbermen smaller dan 20 meter wordt traditioneel versterkt. De kostenraming wordt dan niet aangepast.
- Voor noodzakelijke pipingbermen breder dan 20 meter wordt de berm afgekapt op 20 meter. Er wordt dus maximaal een berm van 20 meter lang berekend. Aanvullend wordt 1,2 M€ per km gerekend om de pipingopgave op te lossen met een innovatieve maatregel.

Deze uitgangspunten liggen ook ten grondslag aan de gevoeligheidsanalyses die zijn uitgevoerd voor de MKBA-LTAR. Meer informatie over de totstandkoming van het kostenkental is te vinden in De Grave (2017a).

## 2.4 Overige beslisinformatie

Behalve de totale kosten kunnen nog andere criteria relevant zijn voor een besluit over de te hanteren afvoerverdeling. Het gaat hierbij onder meer (dus niet-limitatief) om:

- Inzetsfrequentie bypass Veessen-Wapenveld: Bij een waterstand van NAP +5,65 m bij de inlaat worden de kleppen geopend en gaat de bypass Veessen-Wapenveld meestromen. Dit zou overeenkomen met een afvoer die nu een kans van voorkomen heeft van ongeveer 1:100 per jaar. Wanneer de afvoerverdeling zo wordt gewijzigd dat er bij lagere afvoeren al meer water naar de IJssel stroomt, dan zal de inzetsfrequentie van Veessen-Wapenveld groter worden. Hoewel de inzetsfrequentie geen harde afspraak is (de inzet is immers gekoppeld aan de lokale waterstand), is nagegaan hoe de inzetsfrequentie van Veessen-Wapenveld bij de verschillende afvoerverdelingsvarianten verandert.
- Door de dijkverleggingen bij Cortenoever en Voorsterklei zijn gebieden die eerst binnendijks lagen buitendijks komen te liggen. Afsproken is dat de overstromingsfrequentie van deze gebieden, met nog deels een landbouwfunctie, 1:25 per jaar is. Voor alle varianten is nagegaan hoe de overstromingskans van dit gebied verandert bij de verschillende afvoerverdelingsvarianten.
- Een verandering van de afvoerverdeling beïnvloedt de combinaties van afvoer en stormvloed in de overgangsgebieden (Merwede, Lek, IJsseldelta). Veranderingen in het samenvallen van storm met hogere rivierafvoeren kunnen vooral optreden als de afvoerverdeling al bij middelhoge afvoeren te Lobith wordt gewijzigd. Er wordt een indicatie gegeven van de verwachte effecten van de verschillende afvoerverdelingsvarianten op de hoogwaterstanden in het overgangsgebied.
- De wens 'naar 2 kanten' regelbereik te hebben: wanneer de regelwerken dicht staan, kan slechts naar 1 kant worden bijgesteld, namelijk door de regelwerken verder open te zetten. Wanneer een regelwerk openstaat, kan alleen bijgestuurd worden door het regelwerk te sluiten. Wanneer beide regelwerken in een middenstand staan, dan is op beide locaties sprake van regelbereik 'naar 2 kanten'.
- Behoud regelbereik ter compensatie van autonome ontwikkeling van de afvoerverdeling als gevolg van bodemerisatie: Kroekenstoel en van den Berg (2011) geven aan dat bij geopende stuwen sprake is van een groeiende afvoer naar het Pannerdensch Kanaal en een afnemende afvoer naar de Waal. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt doordat de bodem van het Pannerdensch Kanaal sneller uitschuurt dan de bodem van de Boven-Waal. Voor extremere hoogwaters zijn onvoldoende gegevens beschikbaar om langetermijntrends te kunnen vaststellen. Wanneer deze trend ook bij hogere afvoeren optreedt en zich in de toekomst doorzet, dan kan het wenselijk zijn om de instelling van de regelwerken aan te kunnen passen om dit effect te kunnen compenseren. Dit betekent dat het regelwerk Pannerden nu ver genoeg open moet staan, zodat men hier in de toekomst extra schotten kan plaatsen om meer water naar de Waal te sturen.



- Behoud regelbereik bij realisatie IJsselpoort: realisatie van de rivierverruimingsmaatregel Klimaatpark IJsselpoort leidt tot een verschuiving van de afvoerverdeling naar de IJssel. Wanneer nu wordt gekozen voor een afvoerverdeling waarbij de Hondsbroeksche Pleij nagenoeg dicht staat, dan is het niet mogelijk om in een latere fase extra te compenseren voor Klimaatpark IJsselpoort. Indien men serieus overweegt om deze rivierverruimingsmaatregel uit te voeren, dan zou de Hondsbroeksche Pleij nu zo ver mogelijk open moeten staan.
- Mogelijke morfologische effecten.



### 3 Aanpasbaarheid regelwerken tijdens hoogwater

#### 3.1 Inleiding

Zoals beschreven in hoofdstuk 2.1 worden de regelwerken ieder jaar, voor de start van het hoogwaterseizoen, ingesteld om de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling bij 16.000 m<sup>3</sup>/s te realiseren. De te gebruiken instelling wordt berekend met het meest actuele hydraulische model dat in de zomer voorafgaand aan het hoogwaterseizoen beschikbaar komt. Voor het hoogwaterseizoen van 2018/2019 is dit het waqua-rijn-j18\_5-v1 model.

Bij de Hondsbroeksche Pleij zijn meerpalen geplaatst zodat hier tijdens hoogwater een ponton aan kan meren om extra schotten te plaatsen of weg te nemen. Bij regelwerk Pannerden zijn geen voorzieningen om tijdens hoogwater schotten te plaatsen of te trekken. Omdat er nog geen ervaring is opgedaan met het plaatsen of trekken van schotten, is niet zeker of de instelling van de regelwerken aan te passen is tijdens hoogwater. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op deze vraag. Ook wordt beschreven hoe de sturing van de regelwerken in de modellen plaatsvindt en of dit aansluit bij de huidige praktijk en de huidige mogelijkheden. De bevindingen in dit hoofdstuk zijn ook vastgelegd in een apart memo (Weiler, 2018).

#### 3.2 Bevindingen op hoofdlijnen

Een uitgebreide rapportage over de uitgevoerde analyses is te vinden in Bijlage C. Hier volgt een beknopt overzicht van de belangrijkste bevindingen.

##### **Sturing in modellen**

Allereerst is nagegaan hoe de aansturing van de regelwerken is meegenomen in de verschillende WAQUA modellen. Het blijkt dat bij het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij doorgaans wordt aangenomen dat dit regelwerk dynamisch regelbaar is tijdens een hoogwater. Voor regelwerk Pannerden wordt tijdens het doorrekenen van een hoogwater uitgegaan van een vaste instelling. Deze instelling is echter wel afhankelijk van de hoogte van de door te rekenen afvoerpiek. Dit impliceert ook een beperkte mate van bijsturing tijdens hoogwater (voorafgaand aan een hoogwater is immers nog niet bekend hoe hoog de afvoerpiek zal worden).

##### **Regelbaarheid in de huidige situatie**

Vervolgens is gekeken of het in de huidige situatie mogelijk is om tijdens een hoogwater de instelling van de regelwerken te veranderen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de twee locaties, te weten Hondsbroeksche Pleij en Pannerden, en tussen het plaatsen en wegnemen van schotten.

Het plaatsen van schotten lijkt niet mogelijk te zijn: als gevolg van de vervalbelasting op de schotten is de wrijvingskracht op de schotten in de sponningen groter dan het eigen gewicht, waardoor de schotten niet zullen zakken. Dit geldt voor beide locaties. Bovendien geldt bij Pannerden dat de waterstand hoger zou kunnen worden dan de bovenkant van de sponning, waardoor, bij het plaatsen van een schot, de onderrand van het schot het water zou raken voordat het schot door de sponning op zijn plaats gehouden wordt.

Bij een toenemende afvoer (van 16.000 m<sup>3</sup>/s naar 18.000 m<sup>3</sup>/s) zouden er bij Hondsbroeksche Pleij schotten moeten worden weggenomen. Wat betreft de verticale krachten lijkt dit mogelijk. Een werkwijze hiervoor is voorgesteld door de aannemer (zie Biggelaar & Royal Haskoning, 2008). Of dit ook nader is uitgewerkt, getoetst en getest is niet bekend. Bij eerste beschouwing lijkt het dat er vragen te stellen zijn over de betrouwbaarheid (kan een schot scheef komen te hangen doordat het ponton niet horizontaal blijft liggen, etc.) en de veiligheid.

Voor het wegnemen van schotten bij Pannerden zouden de verticale krachten nader moeten worden bepaald: het is de vraag of de hijspunten aan de schotten sterk genoeg zijn.

### **Mogelijke aanpassingen**

Om zowel het plaatsen als het wegnemen van schotten mogelijk te maken op de beide locaties zijn een aantal mogelijke aanpassingen geïdentificeerd. Deze aanpassingen zijn relatief beperkt van aard en omvang: de vaste delen (pijlers etc.) van de constructie kunnen blijven staan, en blijven hun functie behouden. Daarmee blijft de waarde van reeds gedane investering behouden. Mogelijke aanpassingen zijn:

- Om een schot te kunnen plaatsen bij een hoge waterstand zou de geleiding (invoer naar de sponning) voldoende ver boven de maximale waterstand moeten reiken, en dat betekent dat deze bij Pannerden moeten worden verlengd.
- Eventueel moet de opslag-positie van de schotten worden aangepast om deze op voldoende hoogte te brengen; dit vraagt nadere beschouwing van de hydraulische condities.
- Om een schot te kunnen laten zakken op het eigen gewicht moet de wrijving tussen het schot en de sponning worden beperkt. Een mogelijkheid hiertoe is het bekleden van de sponning met een roestvrijstalen U-profiel. Om voldoende speling te houden tussen het schot en de sponning zouden de einden van de schotten (en/of de Hakorit strips) dunner moeten worden gemaakt, of de sponning moet worden verbreed.
- Over de pijlers heen zou een kraanbaan aangebracht kunnen worden die de schotten op een veilige en betrouwbare manier zou kunnen uitnemen uit de sponning en plaatsen in de opslag, of zou kunnen oppakken uit de opslag, en plaatsen in de sponningen. De constructie en de werkwijze lijkt op de bediening van een Poirée-stuw zoals aanwezig in de Maas.

## 4 Kosteneffectiviteit onderzochte afvoerverdelingen

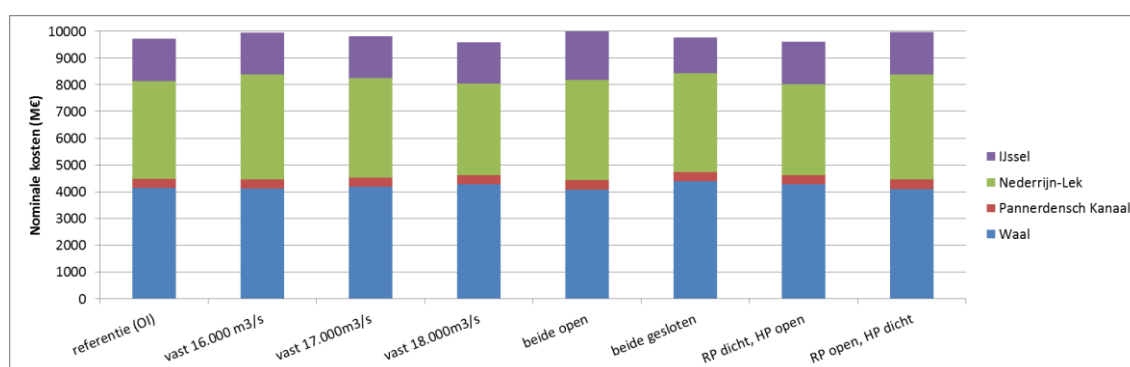
### 4.1 Investeringskosten dijkversterking

#### 4.1.1 Huidige regelwerken met huidig regelbereik

##### Nominale kosten

Voor de verschillende afvoerverdelingsvarianten zijn de kosten voor dijkversterking berekend. De nominale kosten (tot 2125) zijn te zien in Figuur 4.1 en Tabel 4.1.

Uitgaande van de afvoerverdeling die wordt aangehouden bij het OI bedragen de nominale kosten voor dijkversterking tot het jaar 2125 9,7 miljard euro. De meeste kosten worden gemaakt langs de Waal (4,1 miljard euro), gevolgd door de Nederrijn-Lek (3,7 miljard euro). De nominale kosten voor dijkversterking langs de IJssel komen uit op 1,6 miljard euro (zie Tabel 4.1).



Figuur 4.1 Nominale kosten voor dijkversterking berekend voor verschillende afvoerverdelingen

Tabel 4.1 Nominale kosten voor dijkversterking berekend voor verschillende afvoerverdelingen (in M€)

	referentie (OI)	vast 16.000 m³/s	vast 17.000 m³/s	vast 18.000 m³/s	beide open	beide gesloten	RP dicht, HP open	RP open, HP dicht
Waal	4144	4110	4188	4279	4080	4398	4277	4107
Pan. Kanaal	335	350	340	332	352	330	332	350
Nederrijn-Lek	3657	3914	3725	3440	3749	3708	3419	3918
IJssel	1580	1577	1558	1534	1887	1339	1575	1592
Totaal	9715	9951	9812	9585	10068	9775	9603	9966

Wanneer de regelwerken worden vastgezet op de huidige instellingen (gewenste verdeling van de afvoer bij een afvoer van 16.000 m³/s te Lobith) zijn de kosten 235 M€ hoger. Dit is te zien aan de hogere kolom in Figuur 4.1, maar is beter te zien in Tabel 4.2. Deze tabel toont de verschillen in geraamde kosten voor dijkversterking ten opzichte van de referentievariant. De hogere investeringskosten komen vooral doordat de kosten langs de Nederrijn-Lek hoger uitvallen. Dit komt doordat bij deze instelling van de regelwerken de Nederrijn-Lek niet wordt ontzien. Hoewel 235 M€ een groot bedrag lijkt, blijkt uit Tabel 4.3 dat het procentuele verschil klein is: de meerkosten bedragen slechts 2%.

Tabel 4.2 Verschillen in nominale kosten voor dijkversterking ten opzicht van de referentiesituatie (M€)

	referentie (OI)	vast 16.000 m <sup>3</sup> /s	vast 17.000 m <sup>3</sup> /s	vast 18.000 m <sup>3</sup> /s	beide open	beide gesloten	RP dicht, HP open	RP open, HP dicht
Waal	0	-34	44	135	-64	254	133	-37
Pan. Kanaal	0	15	6	-2	18	-5	-3	15
Nederrijn-Lek	0	257	68	-216	92	51	-237	261
IJssel	0	-3	-22	-46	307	-241	-5	12
Totaal	0	235	97	-130	353	60	-112	251

Tabel 4.3 Procentuele verschillen in nominale kosten voor dijkversterking ten opzicht van de referentiesituatie

	referentie (OI)	vast 16.000 m <sup>3</sup> /s	vast 17.000 m <sup>3</sup> /s	vast 18.000 m <sup>3</sup> /s	beide open	beide gesloten	RP dicht, HP open	RP open, HP dicht
Waal	-	-1%	1%	3%	-2%	6%	3%	-1%
Pan. Kanaal	-	4%	2%	-1%	5%	-1%	-1%	4%
Nederrijn-Lek	-	7%	2%	-6%	3%	1%	-6%	7%
IJssel	-	0%	-1%	-3%	19%	-15%	0%	1%
Totaal	-	2%	1%	-1%	4%	1%	-1%	3%

Indien de regelwerken vast worden ingesteld op een Bovenrijnafvoer van 17.000 m<sup>3</sup>/s nemen de investeringskosten minder sterk toe: +97 M€. Indien de regelwerken worden ingesteld op een afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s nemen de investeringskosten af met 130 M€.

De grootste toename in investeringskosten valt te verwachten wanneer beide regelwerken open staan. De toename bedraagt 350 M€ (4%). De toename komt vooral door een sterke toename van de kosten langs de IJssel. Dat is logisch, omdat de afvoer op de IJssel toeneemt wanneer beide regelwerken open staan. De afvoer op de Waal neemt af. Dit is terug te zien in een (beperkte) afname van de kosten langs deze tak.

Wanneer beide regelwerken gesloten zijn, nemen te investeringskosten ook toe. In dit geval met 60 M€. De toename is relatief gering omdat de sterke toename van de kosten langs de Waal (250 M€) bijna worden gecompenseerd door de afname van de kosten langs de IJssel (-240 M€).

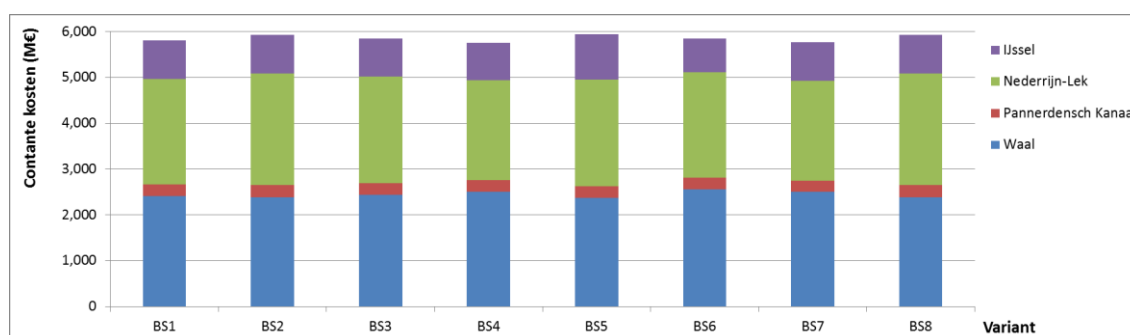
Wanneer het regelwerk Pannerden dicht staat en de Hondsbroeksche Pleij open staat, nemen de kosten langs alle Rijntakken samen af met 110 M€. De afname is het gevolg van een relatief grote afname van de kosten op de Nederrijn-Lek en een toename van de kosten op de Waal. Dit is vergelijkbaar met het verschil in kosten wanneer wordt uitgegaan van de vaste instelling bij 18.000 m<sup>3</sup>/s. Dat is ook logisch, omdat bij een vaste instelling bij 18.000 m<sup>3</sup>/s het regelwerk bij Pannerden vrijwel helemaal dicht staat, terwijl het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij vrijwel geheel geopend is.

De laatste variant, waarbij het regelwerk Pannerden open staat en de Hondsbroeksche Pleij dicht staat, lijkt sterk op de vaste instelling bij 16.000 m<sup>3</sup>/s. De toename van de investeringskosten is daardoor ook vergelijkbaar (toename met 250 M€, vooral door een toename van de kosten langs de Nederrijn-Lek).

### Contante waarde

De investeringskosten per jaar zijn ook contant gemaakt. De contante waarden voor de dijkversterkingskosten voor alle afvoerverdelingsvarianten zijn te zien in Figuur 4.2 en Tabel 4.4. De absolute verschillen ten opzichte van de referentie zijn te zien in Tabel 4.5. Tabel 4.6 toont de relatieve verschillen.

Doordat kosten die ver in de toekomst worden gemaakt minder zwaar meetellen in de contante waarde, zijn de contante waarden lager dan de nominale kosten (vergelijk bedragen in Figuur 4.2 met die in Figuur 4.1). De absolute verschillen zijn ook kleiner. De relatieve verschillen zijn echter van dezelfde orde.



Figuur 4.2 Contante waarde investeringskosten voor dijkversterking berekend voor verschillende afvoerverdelingen

Tabel 4.4 Contante waarden van de kosten voor dijkversterking berekend voor verschillende afvoerverdelingen (in M€)

	referentie (OI)	vast 16.000 m <sup>3</sup> /s	vast 17.000 m <sup>3</sup> /s	vast 18.000 m <sup>3</sup> /s	beide open	beide gesloten	RP dicht, HP open	RP open, HP dicht
Waal	2404	2385	2440	2499	2364	2552	2498	2382
Pan. Kanaal	255	263	257	254	264	253	254	263
Nederrijn-Lek	2312	2436	2316	2184	2329	2301	2176	2439
IJssel	843	842	834	822	987	737	839	847
Totaal	5814	5927	5847	5759	5945	5843	5766	5932

Tabel 4.5 Contante waarden van de kosten voor dijkversterking berekend voor verschillende afvoerverdelingen (in M€)

	referentie (OI)	vast 16.000 m <sup>3</sup> /s	vast 17.000 m <sup>3</sup> /s	vast 18.000 m <sup>3</sup> /s	beide open	beide gesloten	RP dicht, HP open	RP open, HP dicht
Waal	0	-18	36	95	-40	148	94	-22
Pan. Kanaal	0	8	2	-1	9	-1	-1	8
Nederrijn-Lek	0	124	3	-128	17	-11	-136	127
IJssel	0	-1	-9	-21	145	-106	-3	4
Totaal	0	113	33	-55	131	29	-47	118

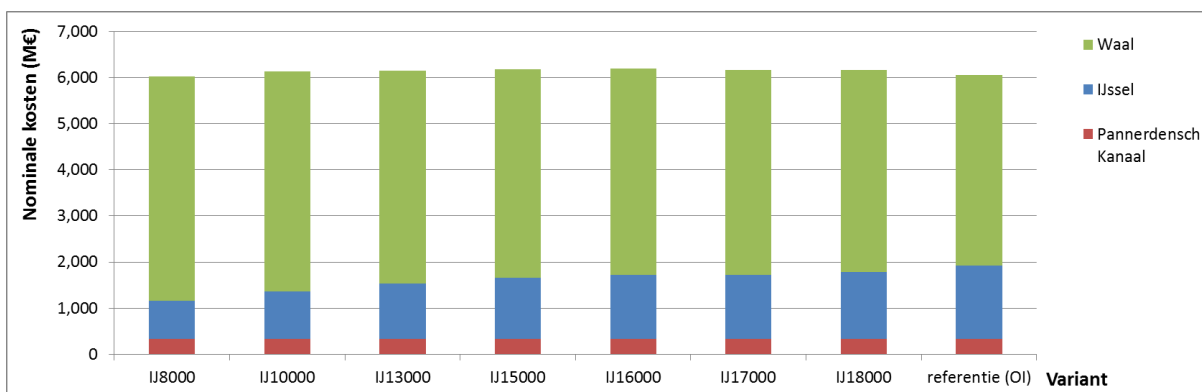
Tabel 4.6 Procentuele verschillen in contante waarden ten opzichte van de referentie

	referentie (OI)	vast 16.000 m <sup>3</sup> /s	vast 17.000 m <sup>3</sup> /s	vast 18.000 m <sup>3</sup> /s	beide open	beide gesloten	RP dicht, HP open	RP open, HP dicht
Waal	-	-1%	2%	4%	-2%	6%	4%	-1%
Pan. Kanaal	-	3%	1%	-1%	4%	-1%	-1%	3%
Nederrijn-Lek	-	5%	0%	-6%	1%	0%	-6%	5%
IJssel	-	0%	-1%	-2%	17%	-13%	0%	1%
Totaal	-	2%	1%	-1%	2%	1%	-1%	2%

## 4.1.2 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: IJssel ontzien

In de referentiesituatie (conform het OI) bedragen de nominale kosten voor dijkversterking 9,7 miljard euro. Ongeveer 1,5 miljard euro komt voor rekening van de benodigde dijkversterking langs de IJssel. Onderzocht is of deze kosten significant afnemen wanneer de IJssel wordt ontzien en het extra water via de Waal wordt afgevoerd.

Figuur 4.3 toont de dijkversterkingskosten langs de Waal, IJssel en het Pannerdensch Kanaal wanneer de IJssel wordt ontzien en het extra water via de Waal wordt afgevoerd (zie ook Tabel 4.7). Deze kosten zijn exclusief de kosten voor aanpassing van de regelwerken.



Figuur 4.3 Nominale investeringskosten voor dijkversterking langs IJssel, Pannerdensch Kanaal en Waal wanneer de IJssel wordt ontzien en het extra water via de Waal wordt afgevoerd

Tabel 4.7 Nominale kosten voor dijkversterking langs IJssel, Pannerdensch Kanaal en Waal wanneer de IJssel wordt ontzien en het extra water via de Waal wordt afgevoerd (in M€)

Variant	Riviertak				totaal	Verschil in totale kosten t.o.v. referentie (absoluut en procentueel)	
	IJssel	Pan.Kanaal	Waal	Nederrijn-Lek			
IJ8000	829	323	4871	3657	9679	-36	-2%
IJ10000	1028	333	4781	3657	9799	83	5%
IJ13000	1197	330	4625	3657	9809	94	6%
IJ15000	1320	330	4533	3657	9840	125	8%
IJ16000	1384	331	4484	3657	9855	140	9%
IJ17000	1396	330	4439	3657	9822	106	7%
IJ18000	1447	330	4392	3657	9826	110	7%
Referentie (OI)	1580	335	4144	3657	9715	0	0%

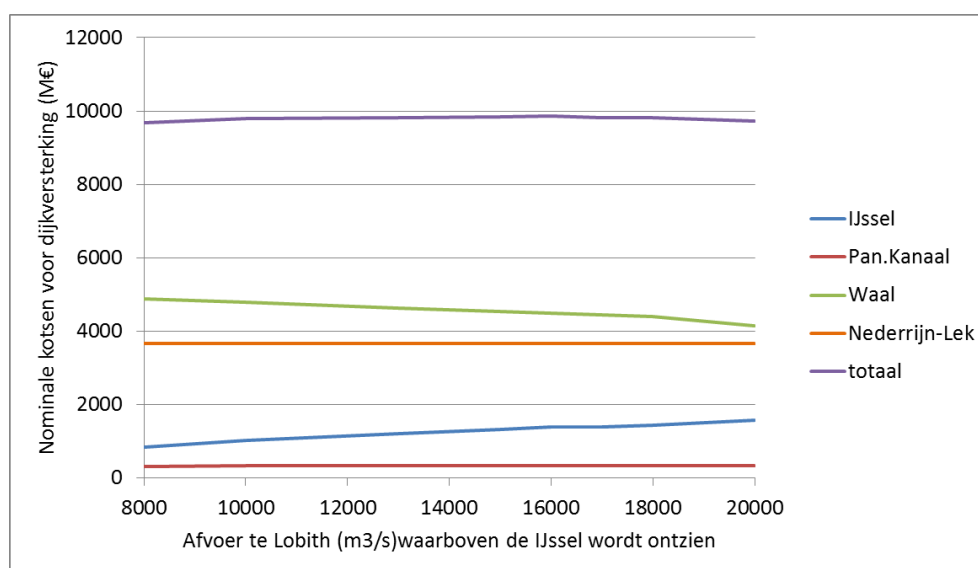


Zoals te verwachten zijn de kosten voor dijkversterking langs de IJssel het laagst wanneer de IJssel al bij zeer lage afvoeren wordt ontzien. Indien de IJssel wordt ontzien bij afvoeren te Lobith van 8.000 m<sup>3</sup>/s of hoger, dan nemen de kosten langs de IJssel af van 1,6 miljard euro naar 0,8 miljard euro. Hoewel dit een halvering van de kosten oplevert, kan nog steeds niet worden voorkomen dat de keringen langs de IJssel moeten worden versterkt. Langs verreweg de meeste normtrajecten zijn dijkvakken te vinden die nog moeten worden versterkt voor piping. De opgaven voor overloop/overslag en macrostabiliteit zijn wel opgelost.

Wanneer de IJssel al bij een afvoer van 8.000 m<sup>3</sup>/s wordt ontzien, dan leidt dit tot een relatief grote toename van de afvoer over de Waal. Dit leidt daar tot een aanzienlijke toename van de kosten van 4,1 miljard euro naar 4,9 miljard euro. De toename is het gevolg van een veel grotere versterkingsopgave voor alle faalmechanismen.

De totale kosten voor dijkversterking langs alle Rijntakken nemen bij deze variant wel iets af. De totaalkosten zijn 36 M€ lager (<1% van de totale versterkingskosten).

Wanneer de IJssel pas bij hogere afvoeren wordt ontzien, dan levert dit een minder grote kostenbesparing op langs IJssel. Dit is te zien in Tabel 4.7, maar ook in Figuur 4.4 (blauwe lijn). Daar staan echter minder hoge kosten langs de Waal tegenover. Voor alle overige varianten geldt echter dat de kostenbesparing langs de IJssel niet opweegt tegen de hogere kosten langs de Waal. De totale kosten nemen daardoor (beperkt) toe. Het grootste verschil bedraagt 140 M€ (1% van de totale versterkingskosten) en wordt gevonden wanneer de IJssel wordt ontzien bij afvoeren van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith of hoger.



Figuur 4.4 Nominale kosten voor dijkversterking wanneer de IJssel wordt ontzien en de extra afvoer via de Waal wordt afgevoerd

Wanneer wordt gekeken naar de contante waarde van de versterkingskosten, dan zijn deze bij alle varianten hoger dan in de referentie. Dat komt doordat de dijken langs de Waal relatief vroeg worden versterkt. De hogere kosten langs de Waal tellen daardoor zwaar mee in de contante waarde. Omdat veel dijktrajecten langs de IJssel pas later worden versterkt, wordt de kostenbesparing pas later gerealiseerd. Deze besparingen tellen minder hard mee in de contante waarde. De hoogste contante kosten worden gevonden wanneer de IJssel wordt ontzien bij Bovenrijnafvoeren boven de 10.000 m<sup>3</sup>/s, namelijk 164 M€ (19%, zie Tabel 4.8).

Tabel 4.8 Contante waarden kosten voor dijkversterking berekend voor verschillende afvoerverdelingen (in M€)

Variant	Riviertak				totaal	verschil in totale kosten t.o.v. referentie (absoluut en procentueel)	
	IJssel	Pan. Kanaal	Waal	Nederrijn-Lek			
IJ8000	503	242	2886	2312	5943	129	15%
IJ10000	599	251	2816	2312	5978	164	19%
IJ13000	676	254	2689	2312	5931	117	14%
IJ15000	730	254	2619	2312	5915	102	12%
IJ16000	758	255	2587	2312	5912	98	12%
IJ17000	761	254	2558	2312	5886	72	9%
IJ18000	776	255	2526	2312	5869	55	7%
Referentie (OI)	843	255	2404	2312	5814	0	0%

#### 4.1.3 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: Nederrijn-Lek ontzien

In de referentiesituatie (conform het OI) bedragen de nominale kosten voor dijkversterking 9,7 miljard euro. Ongeveer 3,7 miljard euro komt voor rekening van de benodigde dijkversterking langs de Nederrijn-Lek. Wanneer de Nederrijn-Lek wordt ontzien leidt dit tot een kostenbesparing langs deze tak, maar tot hogere kosten langs de Waal (de tak die de extra afvoer te verwerken krijgt). Afhankelijk van de afvoer waarboven de Nederrijn-Lek wordt ontzien kunnen de nominale kosten voor dijkversterking lager of hoger uitvallen (zie Tabel 4.9). Deze kosten zijn exclusief de kosten voor aanpassing van de regelwerken.

Tabel 4.9 Nominale kosten voor dijkversterking langs IJssel, Pannerdensch Kanaal en Waal wanneer de Nederrijn-Lek wordt ontzien en het extra water via de Waal wordt afgevoerd (in M€)

Variant	Riviertak				totaal	Verschil in totale kosten t.o.v. referentie (absoluut en procentueel)	
	IJssel	Pan. Kanaal	Waal	Nederrijn-Lek			
NR8000	1580	313	4941	2046	8879	-836	-9%
NR10000	1580	331	4773	2773	9457	-259	-3%
NR13000	1580	330	4613	3235	9757	42	0%
NR15000	1580	330	4478	3455	9843	127	1%
NR16000	1580	330	4394	3618	9921	206	2%
Referentie (OI)	1580	335	4144	3657	9715	0	0%

De totale kosten voor dijkversterking zijn het laagst wanneer de Nederrijn-Lek al bij zeer lage afvoeren wordt ontzien. Indien de Nederrijn-Lek wordt ontzien bij afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s of hoger te Lobith, dan nemen de totale kosten voor dijkversterking af met 0,8 miljard euro (9%).

Wanneer de Nederrijn-Lek pas bij hogere afvoeren wordt ontzien, dan levert dit hogere totale kosten voor dijkversterking op. De hoogste kosten bedragen ruim 200 M€ meer dan in de referentie (2% van de totale versterkingskosten) en worden gevonden wanneer de Nederrijn-Lek wordt ontzien bij afvoeren van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith of hoger. Dit komt doordat de besparing op de Nederrijn-Lek beperkt is (in de referentie wordt de Nederrijn-Lek bij afvoeren tussen de 16.000 m<sup>3</sup>/s en 18.000 m<sup>3</sup>/s immers ook al ontzien), terwijl de kosten op de Waal doordat de Nederrijn-Lek ook bij afvoeren boven de 18.000 m<sup>3</sup>/s wordt ontzien, aanzienlijk hoger zijn.

Wanneer wordt gekeken naar de contante waarde van de versterkingskosten, dan zijn deze maximaal 0,4 miljard euro (7%) lager. De hoogste contante kosten zien we wanneer de Nederrijn-Lek wordt ontzien bij Bovenrijnafvoeren boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s; deze zijn 113 M€ hoger (2%, zie Tabel 4.10).

Tabel 4.10 Contante waarden kosten voor dijkversterking berekend voor verschillende afvoerverdelingen (in M€)

Variant	Riviertak				totaal	verschil in totale kosten t.o.v. referentie (absoluut en procentueel)	
	IJssel	Pan. Kanaal	Waal	Nederrijn- Lek			
NR8000	843	233	2944	1390	5410	-404	-7%
NR10000	843	249	2813	1874	5778	-36	-1%
NR13000	843	254	2681	2151	5928	114	2%
NR15000	843	254	2585	2226	5909	95	2%
NR16000	843	255	2528	2302	5927	113	2%
Referentie (OI)	843	255	2404	2312	5814	0	0%

#### 4.1.4 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: Waal ontzien

In de referentiesituatie (conform het OI) bedragen de nominale kosten voor dijkversterking 9,7 miljard euro. Ongeveer 4,1 miljard euro komt voor rekening van de benodigde dijkversterking langs de Waal. Onderzocht is of deze kosten significant lager zijn wanneer de Waal wordt ontzien en het extra water wordt verdeeld over de Nederrijn-Lek en de IJssel. Tabel 4.11 toont de berekende nominale kosten voor dijkversterking langs de verschillende Rijntakken, wanneer de Waal vanaf verschillende afvoeren bij Lobith wordt ontzien. Tabel 4.12 toont de contant gemaakte kosten.

Tabel 4.11 Nominale kosten voor dijkversterking langs IJssel, Pannerdensch Kanaal en Waal wanneer de Waal wordt ontzien en het extra water via de Nederrijn-Lek en de IJssel wordt afgevoerd (in M€)

Variant	Riviertak				totaal	Verschil in totale kosten t.o.v. referentie (absoluut en procentueel)	
	IJssel	Pan. Kanaal	Waal	Nederrijn- Lek			
WL8000	2283	372	1704	4724	9082	-633	-7%
WL10000	2209	372	2501	4599	9681	-35	0%
WL13000	2162	372	3284	4473	10291	575	6%
WL15000	1993	366	3656	4121	10137	422	4%
WL16000	1899	362	3802	4006	10070	354	4%
WL17000	1792	354	3953	3916	10015	299	3%
WL18000	1659	349	4143	3826	9977	262	3%
Referentie (OI)	1580	335	4144	3657	9715	0	0%

Tabel 4.12 Contante kosten voor dijkversterking langs IJssel, Pannerdensch Kanaal en Waal wanneer de Waal wordt ontzien en het extra water via de Nederrijn-Lek en de IJssel wordt afgevoerd (in M€)

Variant	Riviertak				totaal	Verschil in totale kosten t.o.v. referentie (absoluut en procentueel)	
	IJssel	Pan. Kanaal	Waal	Nederrijn-Lek			
WL8000	1197	277	1057	3084	5615	-198	-3%
WL10000	1152	276	1475	2956	5859	45	1%
WL13000	1121	274	1910	2840	6144	331	6%
WL15000	1031	270	2130	2585	6016	203	3%
WL16000	981	268	2227	2499	5974	161	3%
WL17000	927	266	2301	2439	5933	119	2%
WL18000	865	262	2403	2384	5915	101	2%
Referentie (OI)	843	255	2404	2312	5814	0	0%

Hoewel het ontzien van de Waal tot aanzienlijke kostenbesparingen kan leiden op de Waal, nemen de totale kosten voor dijkversterking langs de Rijntakken bij de meeste varianten toe. Alleen wanneer de Waal al bij afvoeren vanaf 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith wordt ontzien vallen de kosten lager uit. De besparing op de nominale kosten voor dijkversterking is dan 0,6 miljard euro (-7%). De contant gemaakte kosten vallen bijna 0,2 miljard euro lager uit (-3%).

#### 4.1.5 Conclusie

Uitgaande van de huidige regelwerken en het huidige regelbereik kan geconcludeerd worden dat de kosten voor dijkversterking tot 2125 procentueel gezien slechts in beperkte mate veranderen wanneer gekozen wordt voor een andere (vaste) instelling van de huidige regelwerken. De nominale kosten zijn maximaal 4% hoger of 1% lager. De contant gemaakte kosten zijn maximaal 2% hoger, of maximaal 1% lager.

In absolute zin betekent dit dat de nominale kosten maximaal 350 M€ hoger uitvallen dan in de referentie, of 130 M€ lager. De contant gemaakte kosten zijn maximaal 130 M€ hoger of 55 M€ lager.

De totale kosten voor dijkversterking zijn het laagst wanneer de regelwerken vast worden ingesteld op een Bovenrijnafvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s (nominale kosten 9,6 miljard euro, contante waarde 5,8 miljard euro).

De variant waarbij beide regelwerken helemaal open staan levert de hoogste kosten op (nominale kosten 10,0 miljard euro, contante waarde 5,9 miljard euro).

Wanneer de regelwerken zo worden aangepast dat de IJssel al bij Bovenrijnafvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s kan worden ontzien, dan levert dit een kleine besparing op (nominale kosten 36 M€ lager). Wanneer de IJssel pas bij hogere Bovenrijnafvoeren wordt ontzien levert dit hogere dijkversterkingskosten op (nominale kosten maximaal 140 M€ hoger). Dit komt doordat de dijkversterkingsopgave langs de IJssel wel afneemt, maar dijkversterking niet kan worden voorkomen. Daar staat een toename van de versterkingsopgave langs de gehele Waal tegenover. Wanneer wordt gekeken naar de contante waarde van de versterkingskosten, dan zijn deze bij alle varianten hoger. De hogere contante kosten komen doordat de dijken op de Waal relatief vroeg worden versterkt, terwijl juist hier een toename van de kosten te verwachten is.

Het ontzien van de Nederrijn-Lek leidt tot een grotere kostenbesparing. Indien de Nederrijn-Lek wordt ontzien bij afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s of hoger te Lobith, dan zijn de totale nominale kosten voor dijkversterking 0,8 miljard euro (9%) lager. De contante kosten voor dijkversterking zijn 0,4 miljard euro lager (7%).

Hoewel het ontzien van de Waal tot aanzienlijke kostenbesparingen kan leiden op de Waal, zijn de totale kosten voor dijkversterking langs de Rijntakken bij de meeste varianten hoger. Alleen wanneer de Waal al bij afvoeren vanaf 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith wordt ontzien vallen de kosten lager uit. De besparing op de nominale kosten voor dijkversterking is dan 0,6 miljard euro (-7%). De contant gemaakte vallen bijna 0,2 miljard euro lager uit (-3%).

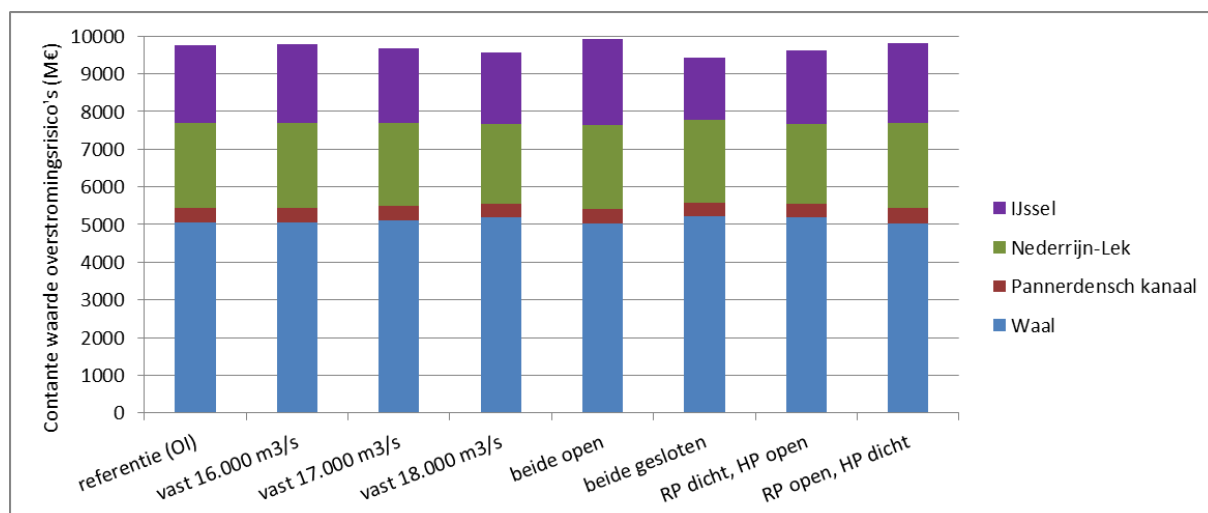
De kosten die voortkomen uit het aanpassen van de regelwerken en/of het splitsingspuntengebied zijn hier nog niet in verwerkt.

## 4.2 Overstromingsrisico's

### 4.2.1 Huidige regelwerken met huidig regelbereik

Voor de verschillende afvoerverdelingsvarianten zijn de overstromingsrisico's berekend. De risico's zijn contant gemaakt naar het jaar 2025. De contante waarde van de risico's is te zien in Figuur 4.5 en Tabel 4.12. Tabel 4.13 toont de verschillen in overstromingsrisico's ten opzichte van de referentie. De procentuele verschillen zijn te zien in Tabel 4.15.

Uitgaande van de afvoerverdeling die wordt aangehouden bij het OI bedraagt de contante waarde van het overstromingsrisico ongeveer 9,75 miljard euro. Het totale overstromingsrisico is het kleinst bij de variant waarbij beide regelwerken dicht staan. Het risico bedraagt dan 9,4 miljard euro. Dat is ruim 300 M€ (3%) lager. Het risico is het grootst bij de variant waarbij beide regelwerken open staan. Het risico bedraagt dan 9,9 miljard euro. Dat is een 170 M€ (2%) hoger risico dan in de referentie.



Figuur 4.5 Contante waarden overstromingsrisico's berekend voor verschillende afvoerverdelingen

Tabel 4.13 Contante waarden overstromingsrisico's berekend voor verschillende afvoerverdelingen (in M€)

	referentie (OI)	vast 16.000 m <sup>3</sup> /s	vast 17.000 m <sup>3</sup> /s	vast 18.000 m <sup>3</sup> /s	beide open	beide gesloten	RP dicht, HP open	RP open, HP dicht
IJssel	2072	2078	1987	1906	2293	1673	1959	2110
Nederrijn-Lek	2230	2261	2200	2112	2210	2185	2107	2263
Pan. Kanaal	392	397	383	367	405	359	368	398
Waal	5058	5048	5116	5187	5015	5221	5186	5041
Totaal	9753	9783	9686	9572	9923	9438	9620	9812

Tabel 4.14 Verschil in contante waarden overstromingsrisico's berekend voor verschillende afvoerverdelingen ten opzichte van de referentie (in M€)

	referentie (OI)	vast 16.000 m <sup>3</sup> /s	vast 17.000 m <sup>3</sup> /s	vast 18.000 m <sup>3</sup> /s	beide open	beide gesloten	RP dicht, HP open	RP open, HP dicht
IJssel	-	6	-85	-166	221	-399	-113	38
Nederrijn-Lek	-	31	-31	-118	-20	-45	-123	33
Pan. Kanaal	-	4	-9	-25	12	-33	-25	6
Waal	-	-10	58	129	-43	163	128	-17
Totaal	-	31	-66	-181	170	-315	-132	59

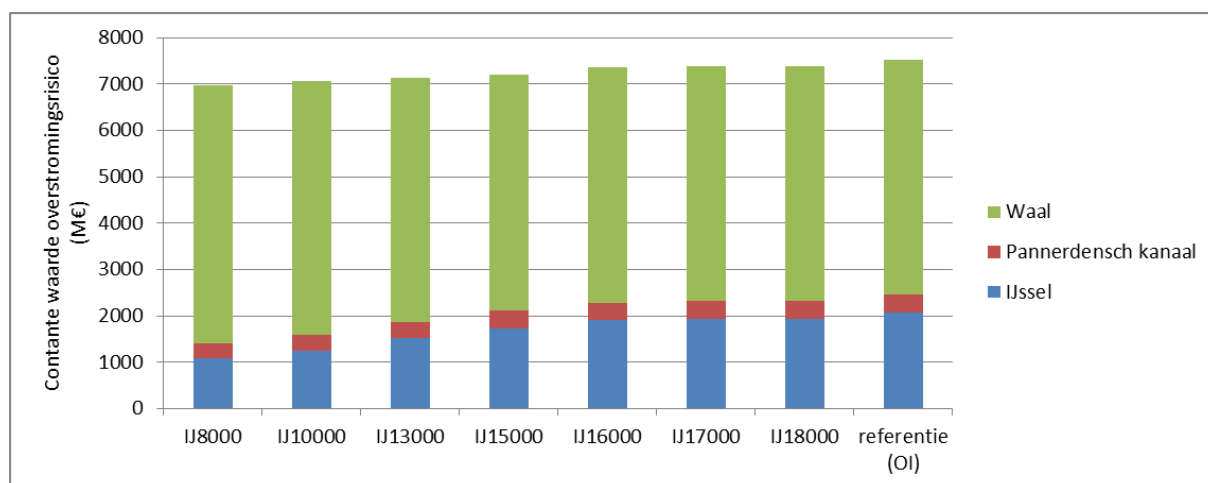
Tabel 4.15 Procentuele verschillen in overstromingsrisico's berekend voor verschillende afvoerverdelingen ten opzichte van de referentie

	referentie (OI)	vast 16.000 m <sup>3</sup> /s	vast 17.000 m <sup>3</sup> /s	vast 18.000 m <sup>3</sup> /s	beide open	beide gesloten	RP dicht, HP open	RP open, HP dicht
IJssel	-	0%	-4%	-8%	11%	-19%	-5%	2%
Nederrijn-Lek	-	1%	-1%	-5%	-1%	-2%	-6%	1%
Pan. Kanaal	-	1%	-2%	-6%	3%	-8%	-6%	2%
Waal	-	0%	1%	3%	-1%	3%	3%	0%
Totaal	-	0%	-1%	-2%	2%	-3%	-1%	1%

De verschillen in overstromingsrisico variëren van -315 M€ tot +170 M€. Relatief gezien zijn deze verschillen echter zeer klein: -2% tot +3%. Wat opvalt, is dat de verschillen in overstromingsrisico's relatief groot zijn langs de IJssel. De variant waarbij beide regelwerken gesloten zijn leidt tot een 400 M€ lager overstromingsrisico langs de IJssel wat overeenkomt met bijna 20%. De reden dat wijziging van de afvoerverdeling relatief gezien het grootste verschil heeft op de IJssel komt doordat de keringen langs de IJssel relatief laat worden versterkt. Immers, wanneer een tak minder water moet afvoeren, dan leidt dat tot lagere waterstanden. Dit leidt weer tot een kleinere kans op een doorbraak en vaak ook tot (iets) geringere gevolgen in geval van doorbraak. Langs de Waal worden de dijken al snel versterkt. Na de dijkversterking voldoen de dijken aan de norm. Daarbij is rekening gehouden met de verandering in de afvoer. Dat betekent dat de risicoreductie als gevolg van een kleinere overstromingskans langs deze tak slechts kort merkbaar is. Na de dijkversterking resteert alleen een kleine baat doordat de gevolgen in geval van doorbraak iets kleiner zijn. Langs de IJssel wordt een groot aantal dijktrajecten pas later versterkt. Een eventuele afname van de overstromingskans door lagere waterstanden blijft dus langer effect houden en levert een relatief grote baat op. Echter, omdat de totale risico's langs de Waal veel groter zijn dan langs de IJssel tikt een relatief kleine baat langs de Waal toch relatief zwaar door op het totaal.

## 4.2.2 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: IJssel ontzien

Figuur 4.6 toont de contante waarden van de overstromingsrisico's langs de Waal, IJssel en het Pannerdensch Kanaal wanneer de IJssel wordt ontzien en het extra water via de Waal wordt afgevoerd. De bedragen zijn ook te zien in Tabel 4.16.



Figuur 4.6 Contante waarden overstromingsrisico's langs IJssel, Pannerdensch Kanaal en Waal wanneer de IJssel wordt ontzien en het extra water via de Waal wordt afgevoerd

Het overstromingsrisico is het kleinst bij de variant wanneer de IJssel al bij afvoeren vanaf 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith wordt ontzien. Dit levert een 550 M€ (7%) kleiner risico op. Dit verschil is zo groot doordat het risico langs de IJssel halveert (baat van 1 miljard euro), terwijl de toename van het risico langs de Waal 'beperkt' blijft tot ongeveer 0,5 miljard euro. Wanneer de IJssel pas bij hogere afvoeren wordt ontzien is de toename van het risico langs de Waal kleiner, maar is de afname van het risico langs de IJssel ook kleiner. Gecombineerd leidt dit tot een minder grote afname van het totale risico langs deze takken.

Tabel 4.16 Contante waarden overstromingsrisico's langs IJssel, Pannerdensch Kanaal en Waal wanneer de IJssel wordt ontzien en het extra water via de Waal wordt afgevoerd (M€)

Variant	Riviertak				totaal	verschil in overstromingsrisico's t.o.v. referentie (absoluut en procentueel)	
	IJssel	Nederrijn-Lek	Pan. Kanaal	Waal			
IJ8000	1085	2230	319	5567	9202	-551	-6%
IJ10000	1252	2230	337	5485	9304	-449	-5%
IJ13000	1513	2230	360	5252	9356	-397	-4%
IJ15000	1731	2230	376	5105	9442	-311	-3%
IJ16000	1901	2230	384	5072	9587	-165	-2%
IJ17000	1930	2230	383	5061	9604	-148	-2%
IJ18000	1944	2230	385	5058	9617	-136	-1%
Referentie (OI)	2072	2230	392	5058	9753	-	-

#### 4.2.3 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: Nederrijn-Lek ontzien

Tabel 4.17 toont de contante waarde voor het overstromingsrisico wanneer de Nederrijn-Lek wordt ontzien. Het overstromingsrisico is het kleinst bij de variant wanneer de Nederrijn-Lek al bij afvoeren vanaf 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith wordt ontzien. Dit levert een 260 M€ (3%) lager risico op. Er zijn ook varianten waarbij het risico groter is. Dit is onder meer het geval wanneer de Nederrijn-Lek wordt ontzien bij afvoeren vanaf 10.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Het contant gemaakte totaalrisico is dan 140 M€ groter.

Tabel 4.17 Contante waarden overstromingsrisico's langs IJssel, Pannerdensch Kanaal, Nederrijn-Lek en Waal wanneer de Nederrijn-Lek wordt ontzien en het extra water via de Waal wordt afgevoerd (M€)

Variant	Riviertak				totaal	verschil in overstromingsrisico's t.o.v. referentie (absoluut en procentueel)	
	IJssel	Nederrijn-Lek	Pan. Kanaal	Waal			
NR8000	2072	1401	303	5713	9490	-263	-3%
NR10000	2072	1943	331	5546	9892	140	1%
NR13000	2072	2077	359	5273	9781	29	0%
NR15000	2072	2166	376	5099	9713	-39	0%
NR16000	2072	2230	385	5059	9746	-6	0%
Referentie (OI)	2072	2230	392	5058	9753	0	0%

#### 4.2.4 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: Waal ontzien

Ook wanneer de Waal wordt ontzien heeft dat invloed op de som van de overstromingsrisico's. De berekende overstromingsrisico's zijn te zien in Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Contante waarden overstromingsrisico's langs IJssel, Pannerdensch Kanaal en Waal wanneer de Waal wordt ontzien en het extra water via de Nederrijn-Lek en de IJssel wordt afgevoerd (M€)

Variant	Riviertak				totaal	verschil in overstromingsrisico's t.o.v. referentie (absoluut en procentueel)	
	IJssel	Nederrijn-Lek	Pan. Kanaal	Waal			
WL8000	3187	2900	584	3049	9721	-32	0%
WL10000	2936	2694	540	3591	9761	9	0%
WL13000	2498	2458	459	4342	9757	5	0%
WL15000	2108	2306	410	4817	9641	-112	-1%
WL16000	1986	2272	399	4990	9647	-106	-1%
WL17000	1952	2261	396	5045	9654	-98	-1%
WL18000	1947	2257	396	5058	9658	-95	-1%
Referentie (OI)	2072	2230	392	5058	9753	0	0%

De verandering in het overstromingsrisico is relatief klein (maximaal 1% van het totale risico). De veranderingen zijn zo klein doordat het risico langs de Waal weliswaar fors af kan nemen (maximale afname 2 miljard euro), maar de risico's langs de andere takken intussen nagenoeg evenveel toenemen. Met name langs de IJssel resulteert de toename van de afvoer in een relatief grote toename van het risico (van 2,1 miljard euro naar 3,2 miljard euro). Dit komt doordat de dijken langs de IJssel pas laat worden versterkt.



De hogere waterstanden resulteren daardoor gedurende een relatief lange periode in grotere overstromingskansen en dus in een groter risico. Het overstromingsrisico is het kleinst bij de variant waarbij de Waal bij afvoeren vanaf 15.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith wordt ontzien. Dit levert een afname op van 112 M€ (-1%).

#### 4.2.5 Conclusie

De contante waarde van het overstromingsrisico bedraagt in de referentiesituatie 9,8 miljard euro. Bij de onderzochte afvoerverdelingsvarianten waarbij is uitgegaan van vaste regelwerken kan dit maximaal 170 M€ (2%) hoger tot ruim 300 M€ (3%) lager uitvallen. De grootste risico's worden gevonden wanneer beide regelwerken open staan. De risico's zijn het kleinst wanneer beide regelwerken gesloten zijn.

Wanneer de regelwerken zo worden aangepast dat de IJssel al bij Bovenrijnafvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s kan worden ontzien, dan levert dit een substantieel kleiner overstromingsrisico op (ruim 500 M€ kleiner). Het verschil ontstaat vooral doordat de lagere waterstanden op de IJssel leiden tot een kleinere overstromingskans. Omdat de dijken hier relatief laat worden versterkt leidt dit tot een grote baat. De dijken langs de Waal worden relatief vroeg versterkt. Daardoor is slechts kort sprake van grotere overstromingskansen langs deze tak. Netto neemt het risico dus af. Wanneer de IJssel pas bij hogere afvoeren wordt ontzien is de afname in het overstromingsrisico kleiner.

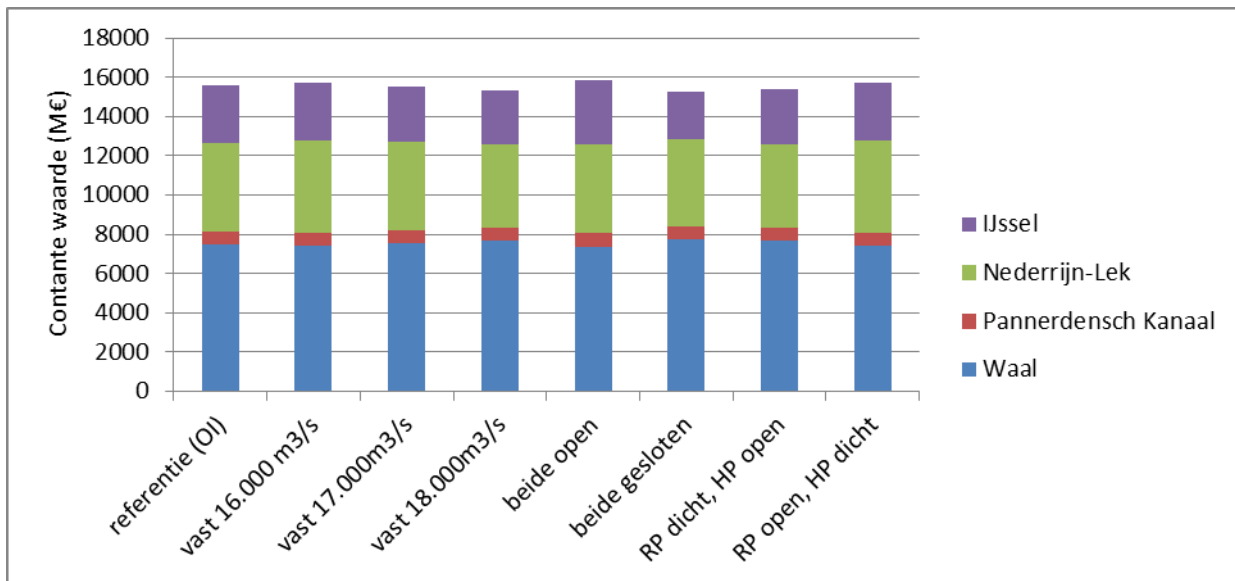
Het ontzien van de Nederrijn-Lek leidt tot verschillen in overstromingsrisico's van maximaal een paar honderd miljoen euro.

De kleinste verandering in overstromingsrisico wordt gevonden wanneer de Waal wordt ontzien en het extra water via de Nederrijn-Lek en IJssel wordt afgevoerd. Het risico is dan maximaal ongeveer 100 M€ kleiner.

### 4.3 Totale kosten

#### 4.3.1 Huidige regelwerken met huidig regelbereik

De totale kosten voor de varianten met een vaste instelling van de huidige regelwerken zijn te zien in Figuur 4.7. De totale kosten variëren van bijna 15,3 miljard euro wanneer beide regelwerken gesloten zijn tot bijna 15,9 miljard euro wanneer beide regelwerken open zijn. Een vaste instelling op een afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith leidt ook tot relatief lage totale kosten (ruim 15,3 miljard euro). In de referentie bedragen de totale kosten 15,6 miljard euro.



Figuur 4.7 Totale kosten berekend voor verschillende afvoerverdelingen (contante waarden)

De bedragen zijn ook te zien in Tabel 4.19. Tabel 4.20 toont de verschillen in totale kosten ten opzichte van de referentie. De kosten zijn maximaal 285 M€ lager dan in de referentie en maximaal 300 M€ hoger. Dit lijken aanzienlijke verschillen, maar procentueel gezien zijn de verschillen klein: plus of min 2% (zie Tabel 4.21), en de kosten voor aanpassing van de splitsingspunten zijn nog niet meegerekend.

Tabel 4.19 Totale kosten berekend voor verschillende afvoerverdelingen (contante waarden) in M€

	referentie (OI)	vast 16.000 m³/s	vast 17.000 m³/s	vast 18.000 m³/s	beide open	beide gesloten	RP dicht, HP open	RP open, HP dicht
Waal	7462	7433	7557	7685	7378	7772	7684	7423
Pan. Kanaal	647	660	640	621	669	613	621	661
Nederrijn-Lek	4542	4697	4515	4297	4540	4486	4283	4703
IJssel	2915	2920	2821	2728	3280	2410	2799	2957
Totaal	15566	15710	15533	15330	15867	15281	15387	15744

Tabel 4.20 Verschil in contante waarden overstroomingsrisico's berekend voor verschillende afvoerverdelingen ten opzichte van de referentie (in M€)

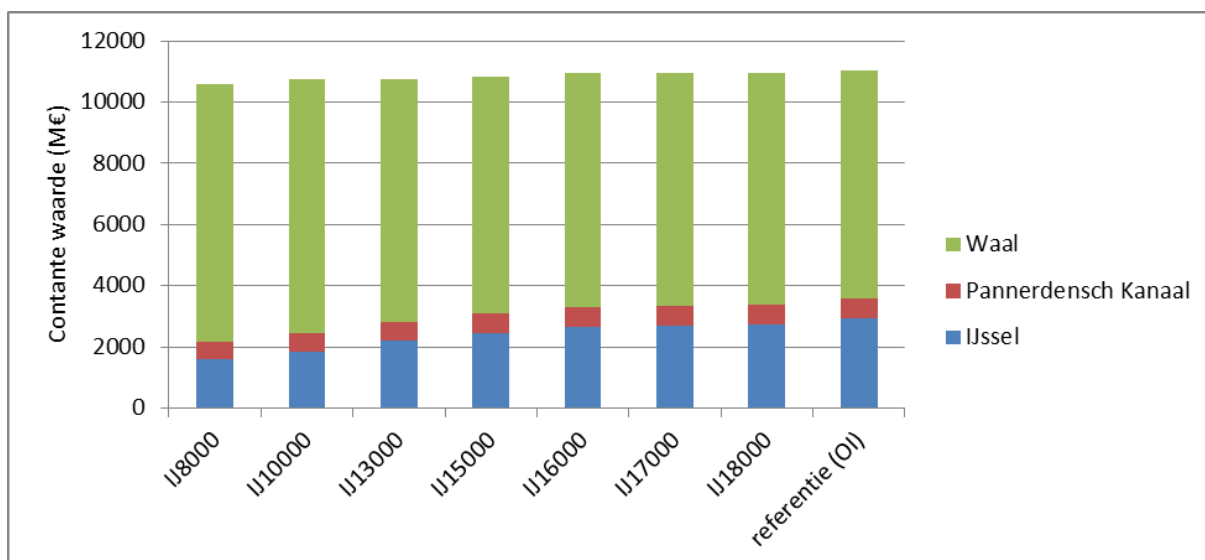
	referentie (OI)	vast 16.000 m³/s	vast 17.000 m³/s	vast 18.000 m³/s	beide open	beide gesloten	RP dicht, HP open	RP open, HP dicht
Waal	-	-28	95	224	-83	311	222	-39
Pan. Kanaal	-	12	-7	-27	22	-35	-26	14
Nederrijn-Lek	-	155	-27	-246	-2	-56	-259	160
IJssel	-	5	-94	-187	365	-505	-116	42
Totaal	-	144	-33	-236	301	-285	-180	177

Tabel 4.21 Procentuele verschillen in overstromingsrisico's berekend voor verschillende afvoerverdelingen ten opzichte van de referentie

	referentie (OI)	vast 16.000 m <sup>3</sup> /s	vast 17.000 m <sup>3</sup> /s	vast 18.000 m <sup>3</sup> /s	beide open	beide gesloten	RP dicht, HP open	RP open, HP dicht
Waal	-	0%	1%	3%	-1%	4%	3%	-1%
Pan. Kanaal	-	2%	-1%	-4%	3%	-5%	-4%	2%
Nederrijn-Lek	-	3%	-1%	-5%	0%	-1%	-6%	4%
IJssel	-	0%	-3%	-6%	13%	-17%	-4%	1%
Totaal	-	1%	0%	-2%	2%	-2%	-1%	1%

#### 4.3.2 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: IJssel ontzien

In de referentiesituatie (conform het OI) bedragen de totale contante kosten voor de IJssel, Pannerdensch Kanaal en Waal 11,0 miljard euro (zie Figuur 4.8). Inclusief de Nederrijn-Lek komen de totale contante kosten neer op 15,6 miljard euro (Tabel 4.22). De totale kosten zijn het laagst wanneer de IJssel al wordt ontzien bij afvoeren te Lobith van 8.000 m<sup>3</sup>/s. In dat geval vallen de kosten 420 M€ (ofwel 3%) lager uit. Deze wijziging van de afvoerverdeling vergt echter wel enorme aanpassingen aan de regelwerken en de inrichting van het splitsingspuntengebied om de Waal voldoende afvoer te laten trekken. Volgens Stratelligence (2013) zou extra water naar de Waal kunnen worden gestuurd door een beweegbare drempel te maken in het Pannerdensch Kanaal. De nominale kosten hiervoor zijn geraamd op 210 miljoen euro. Daar komen nog kosten bij voor beheer en onderhoud (zie Tabel 2.1). Deze drempel zorgt echter voor opstuwing die merkbaar is tot in Duitsland. Dit betekent dat extra dijkversterking nodig is. In Stratelligence (2013) waren de nominale kosten hiervoor geraamd op 915 M€. De totale aanvullende investeringskosten komen dan uit op 1,1 miljard euro. Dit is meer dan de besparing op de totale kosten voor dijkversterking en overstromingsrisico's. Wanneer de IJssel alleen bij afvoeren van 16.000 m<sup>3</sup>/s of hoger wordt ontzien, is de besparing minder groot: enkele tientallen miljoenen euro's (orde 1%).



Figuur 4.8 Totale kosten (contante waarden) wanneer de IJssel wordt ontzien en het extra water via de Waal wordt afgevoerd

Tabel 4.22 Totale kosten (contante waarden) wanneer de IJssel wordt ontzien en het extra water via de Waal wordt afgevoerd (in M€)

Variant	Riviertak				totaal	verschil in totale kosten t.o.v. referentie (absoluut en procentueel)	
	IJssel	Nederrijn-Lek	Pan. Kanaal	Waal			
IJ8000	1588	2472	3206	7879	15145	-422	-3%
IJ10000	1851	2481	3153	7797	15282	-285	-2%
IJ13000	2189	2484	3049	7565	15287	-280	-2%
IJ15000	2461	2484	2995	7417	15357	-209	-1%
IJ16000	2659	2485	2971	7384	15499	-67	0%
IJ17000	2691	2485	2942	7373	15490	-76	0%
IJ18000	2720	2485	2911	7370	15486	-80	-1%
Referentie (OI)	2915	2485	2796	7370	15566	-	-

### 4.3.3 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: Nederrijn-Lek ontzien

De totale contante kosten (dijkversterking en overstromingsrisico's) zijn te zien in Tabel 4.23. De totale kosten zijn het laagst wanneer de Nederrijn-Lek wordt ontzien bij een Bovenrijnafvoer van 8.000 m<sup>3</sup>/s of meer. De besparing bedraagt dan bijna 670 M€. De kosten voor aanpassing van de regelwerken en de inrichting van het splitsingspuntengebied zijn niet in detail geraamd. Stratelligence (2013) suggereert om de Nederrijn-Lek te ontzien door een extra stuw te plaatsen in de Nederrijn bij Arnhem<sup>6</sup>. De nominale investeringskosten hiervoor zijn geraamd op 180 M€. Indien de Nederrijn al bij zeer lage afvoeren wordt ontzien zal dit mogelijk gecombineerd moeten worden met een drempel in het Pannerdensch Kanaal. De kosten hiervoor bedragen 210 M€. Afhankelijk van de opstuwung die dit veroorzaakt bovenstrooms zijn aanvullende kosten nodig voor dijkversterking in Duitsland. Deze kosten kunnen oplopen tot ruim 900 M€. Geconcludeerd wordt dat de besparing op de kosten voor dijkversterking en risico's niet opwegen tegen de kosten voor aanpassingen in het splitsingspuntengebied.

Tabel 4.23 Totale kosten (contante waarden) wanneer de Nederrijn-Lek wordt ontzien en het extra water via de Waal wordt afgevoerd (in M€)

Variant	Riviertak				totaal	verschil in totale kosten t.o.v. referentie (absoluut en procentueel)	
	IJssel	Nederrijn-Lek	Pan. Kanaal	Waal			
NR8000	2915	1634	3247	7103	14900	-667	-4%
NR10000	2915	2192	3143	7420	15670	104	1%
NR13000	2915	2330	3040	7424	15709	143	1%
NR15000	2915	2420	2962	7325	15622	56	0%
NR16000	2915	2485	2913	7361	15673	107	1%
Referentie (OI)	2915	2485	2796	7370	15566	0	0%

<sup>6</sup> Dit leidt echter tot een toename van de waterstand. Alternatief is om te zorgen dat de andere tak meer afvoer gaat trekken door deze te verruimen.

#### 4.3.4 Aangepaste regelwerken met groter regelbereik: Waal ontzien

Tabel 4.24 toont de totale kosten in contante waarden wanneer de Waal wordt ontzien. Alleen de variant waarbij de Waal al bij afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith wordt ontzien leidt tot een besparing. Deze bedraagt 230 M€ (-1%). In alle andere gevallen nemen de totale kosten toe. Stratelligence (2013) heeft geen kosten in beeld gebracht voor maatregelen die er op gericht zijn om de Waal te ontzien. Op basis van kostenramingen voor de maatregelen die nodig zijn om de IJssel of de Nederrijn-Lek te ontzien, wordt aangenomen dat de kosten voor maatregelen om de Waal te ontzien ook al snel honderden miljoenen euro's zullen bedragen. In dat geval is geen van deze varianten kosteneffectief.

Tabel 4.24 Totale kosten (contante waarden) wanneer de Waal wordt ontzien en het extra water via de Nederrijn-Lek en IJssel wordt afgevoerd (in M€)

Variant	Riviertak				totaal	verschil in totale kosten t.o.v. referentie (absoluut en procentueel)	
	IJssel	Nederrijn- Lek	Pan. Kanaal	Waal			
WL8000	4385	3177	1641	6133	15336	-230	-1%
WL10000	4088	2970	2015	6547	15620	54	0%
WL13000	3619	2732	2369	7182	15902	335	2%
WL15000	3139	2576	2540	7402	15657	91	1%
WL16000	2967	2540	2626	7489	15621	55	0%
WL17000	2879	2527	2697	7484	15587	21	0%
WL18000	2813	2519	2799	7442	15573	6	0%
Referentie (OI)	2915	2485	2796	7370	15566	-	-

#### 4.3.5 Conclusie

Bij een vaste instelling van de huidige regelwerken zijn de totale kosten maximaal 285 M€ lager dan in de referentie (wanneer beide regelwerken gesloten zijn) en maximaal 300 M€ hoger (wanneer beide regelwerken open zijn). Omdat de totale kosten in de referentiesituatie 15,6 miljard euro bedragen, zijn de relatieve verschillen klein: plus of min 2%.

Het ontzien van de IJssel levert de laagste totale kosten op wanneer de IJssel al wordt ontzien bij afvoeren te Lobith van 8.000 m<sup>3</sup>/s. In dat geval vallen de totale contante kosten 420 M€ (ofwel 3%) lager uit. Deze wijziging van de afvoerverdeling vergt echter wel enorme aanpassingen aan de regelwerken en de inrichting van het splitsingspuntengebied om de Waal voldoende afvoer te laten trekken. Volgens Stratelligence (2013) zou extra water naar de Waal kunnen worden gestuurd door een beweegbare drempel te maken in het Pannerdensch Kanaal. De nominale kosten hiervoor zijn geraamd op 210 miljoen euro. Deze drempel zorgt echter voor opstuwing die merkbaar is tot in Duitsland. Dit leidt tot extra kosten voor dijkversterking van 915 M€. Dit betekent dat deze variant waarschijnlijk niet kosteneffectief is.

Het ontzien van de Nederrijn-Lek leidt tot 670 M€ (-4%) lagere kosten, wanneer dit gebeurt bij een Bovenrijnafvoer van 8.000 m<sup>3</sup>/s of meer. Ook hiervoor geldt dat deze baat waarschijnlijk niet opweegt tegen de kosten die nodig zijn om de regelwerken en de inrichting van het splitsingspuntengebied aan te passen. Bij alle andere varianten nemen de totale kosten voor dijkversterking en risico's met 50 tot 150 M€ toe in plaats van af. Deze varianten zijn dus sowieso niet kosteneffectief.

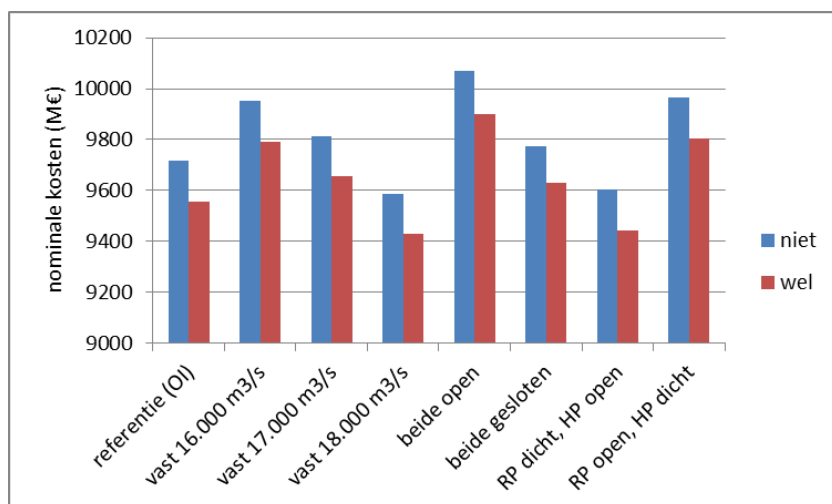
Bij het ontzien van de Waal is alleen de variant waarbij de Waal al bij afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith wordt ontzien goedkoper. De besparing bedraagt dan 230 M€ (-1%). Wanneer de kosten voor aanpassingen in het splitsingspuntengebied worden meegenomen is deze variant niet kosteneffectief.

## 4.4 Gevoeligheidsanalyse

### 4.4.1 Rivierverruiming

Bij het bepalen van de versterkingsopgave maakt het uit of rivierverruimingsmaatregelen worden getroffen. Langs de Rijntakken is de afgelopen jaren gekeken naar de rivierverruimingsmaatregelen bypass Varik-Heesselt en Klimaatpark IJsselpoort. Hoewel de bypass Varik-Heesselt inmiddels is komen vervallen is deze maatregel nog wel mee genomen in deze verkenning. De reden hiervoor is dat het doel van deze gevoeligheidsanalyse is om na te gaan of de resultaten gevoelig zijn voor het realiseren van waterstandsdeling door rivierverruiming in het algemeen. Voor dit doel maakt het niet uit welke rivierverruimende maatregelen worden beschouwd. Bijkomend voordeel was dat voor deze rivierverruimingsmaatregelen al waterstandslijnen beschikbaar waren in OKADER (bij de MKBA die in het kader van LTAR is uitgevoerd werd in de referentie aangenomen dat deze koploperprojecten zouden worden uitgevoerd).

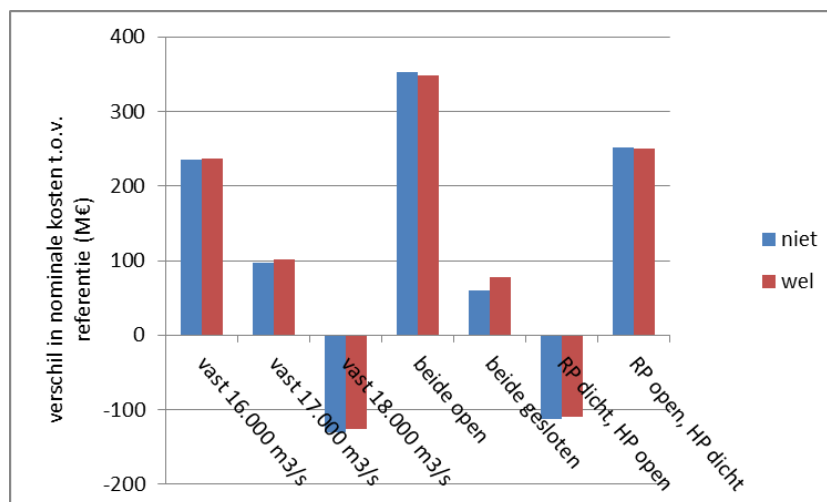
Figuur 4.9 laat de nominale kosten voor dijkversterking zien voor de verschillende afvoerverdelingsvarianten. De blauwe balken geven de kosten voor dijkversterking wanneer de koploperprojecten niet worden uitgevoerd. De rode balken geven de kosten wanneer de koploperprojecten wel worden gerealiseerd. In dat laatste geval worden de waterstanden op de Waal bovenstrooms van Varik, op de bovenloop van de IJssel en op het Pannerdensch Kanaal lager. Dit resulteert in een besparing op de investeringskosten voor dijkversterking van ongeveer 160 M€.



Figuur 4.9 Nominale kosten voor dijkversterking berekend voor verschillende afvoerverdelingsvarianten, met en zonder uitvoering van koploperprojecten

Voor deze studie zijn we echter vooral geïnteresseerd in de verschillen in investeringskosten bij realisatie van de verschillende afvoerverdelingsvarianten. Deze verschillen zijn te zien in Figuur 4.10. Voor de meeste varianten geldt dat de verschillen ten opzichte van de referentie slechts een paar miljoen euro hoger of lager uitvallen.

Alleen voor de variant waarbij beide regelwerken dicht staan is een groter verschil te zien. Wanneer de koploperprojecten niet worden uitgevoerd is de kostenbesparing 60 M€. Wanneer de koploperprojecten wel worden gerealiseerd valt de kostenbesparing bij deze afvoerverdelingsvariant 17 M€ hoger uit.



Figuur 4.10 Verskil in nominale kosten voor dijkversterking berekend voor verschillende afvoerverdelingsvarianten ten opzichte van de referentiesituatie, met en zonder uitvoering van koploperprojecten

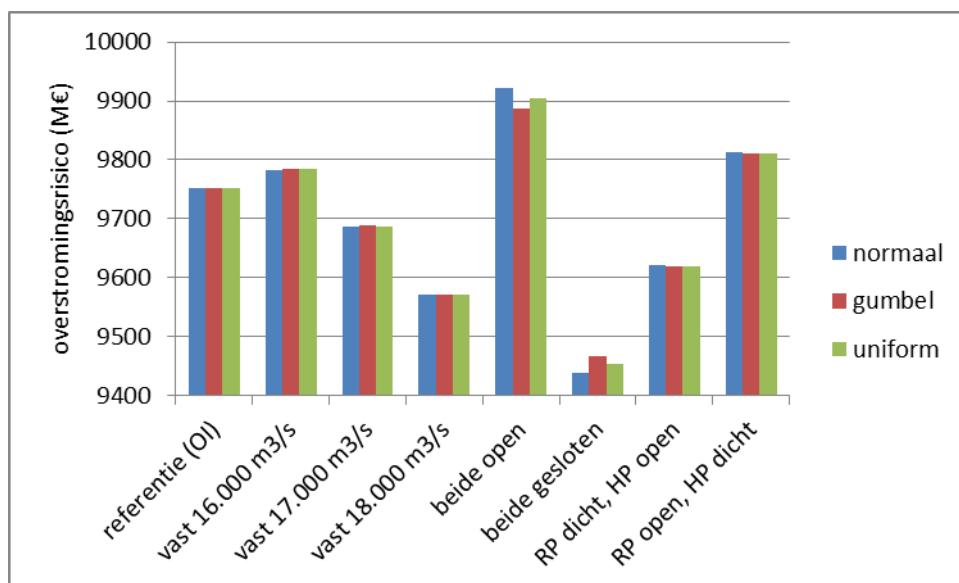
De contante waarden van de investeringskosten zijn hier niet getoond, maar vertonen een vergelijkbaar beeld.

Geconcludeerd kan worden dat het wel of niet uitvoeren van deze rivierverschuivingsmaatregelen geen grote invloed heeft op de in deze studie berekende kosteneffectiviteit van de verschillende afvoerverdelingsvarianten.

#### 4.4.2 Verandering in gevolgen in geval van overstromen

Bij het berekenen van de overstromingsrisico's wordt rekening gehouden met een verandering in de gevolgen als gevolg van een hogere of lagere buitenwaterstand. Hierbij is uitgegaan van een (gewogen) gemiddelde verandering in buitenwaterstand, waarbij de weging is gebaseerd op een normale verdeling. In deze gevoeligheidsanalyse is ook gebruik gemaakt van een Gumbel-verdeling en van een uniforme verdeling.

Figuur 4.11 toont de berekende overstromingsrisico's voor de verschillende afvoerverdelingsvarianten. De blauwe balken tonen de risico's zoals eerder besproken en waarbij is uitgegaan van een normale verdeling, waarbij de verandering in waterstand bij een afvoer van 15.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith het zwaarste meetelt. De rode balken tonen de risico's wanneer gebruik wordt gemaakt van een Gumbel-verdeling, waarbij de zwaarste weging wordt toegekend aan een afvoer van bijna 12.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Bij de groene balken is uitgegaan van een uniforme verdeling: de verandering in waterstand telt bij alle afvoeren even zwaar mee. Over het algemeen leidt variatie in de weging maar tot beperkte verandering in berekende risico's. Alleen bij de varianten waarbij beide regelwerken open of gesloten zijn, zijn de verschillen iets groter.



Figuur 4.11 Overstromingsrisico's berekend voor verschillende afvoerverdelingsvarianten waarbij een verschillende weging is toegekend aan de verandering in buitenwaterstand per afvoerniveau

Geconcludeerd wordt dat de manier waarop de (gewogen) gemiddelde waterstandsdaling berekend wordt, slechts een kleine invloed heeft op de berekende overstromingsrisico's.

#### 4.4.3 Discontovoet

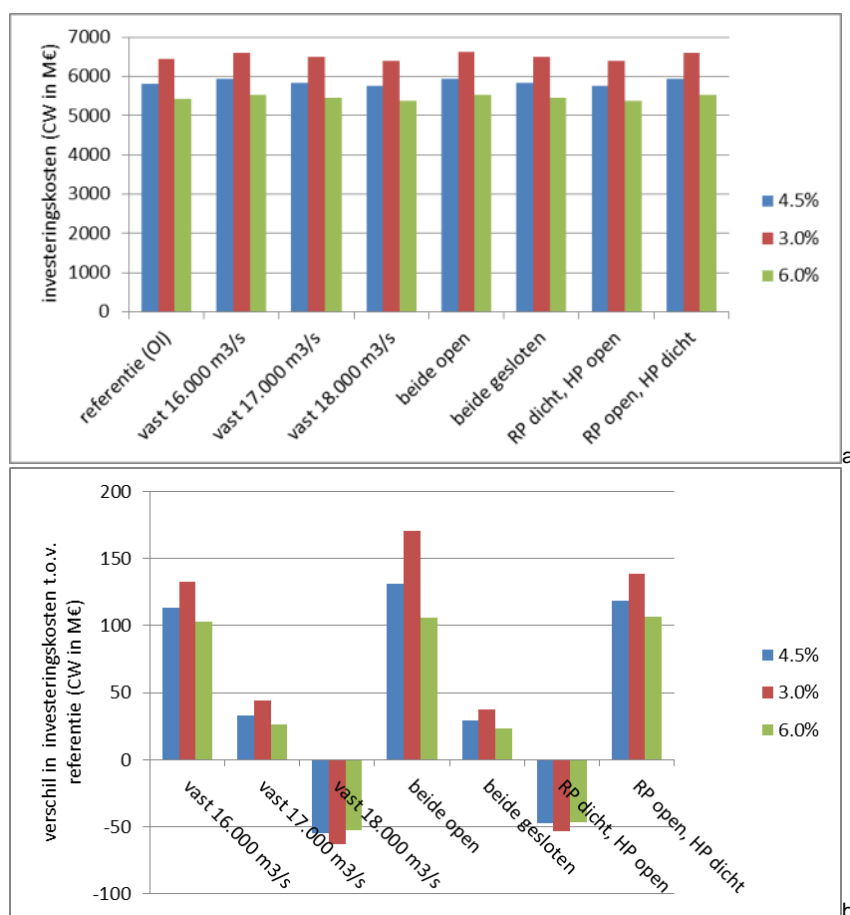
Net als bij de MKBA-LTAR is in deze studie gewerkt met een discontovoet van 4,5%. Om na te gaan of de resultaten gevoelig zijn voor de waarde van de discontovoet zijn analyses uitgevoerd met een discontovoet van 3% en van 6%. De resultaten zijn te zien in Figuur 4.12 t/m Figuur 4.14.

Figuur 4.12.a toont de benodigde investeringskosten voor dijkversterking wanneer de discontovoet varieert van 3% tot 6%. Bij een hogere waarde voor de discontovoet tellen kosten die ver in de toekomst worden gemaakt minder zwaar mee. Dit resulteert in een lagere contante waarde van de kosten. In de referentiesituatie bedragen de contante kosten voor dijkversterking 5,8 miljard euro. Bij een discontovoet van 3% zouden de investeringskosten 6,5 miljard euro bedragen, terwijl de kosten bij een discontovoet van 6% 5,4 miljard euro zouden bedragen.

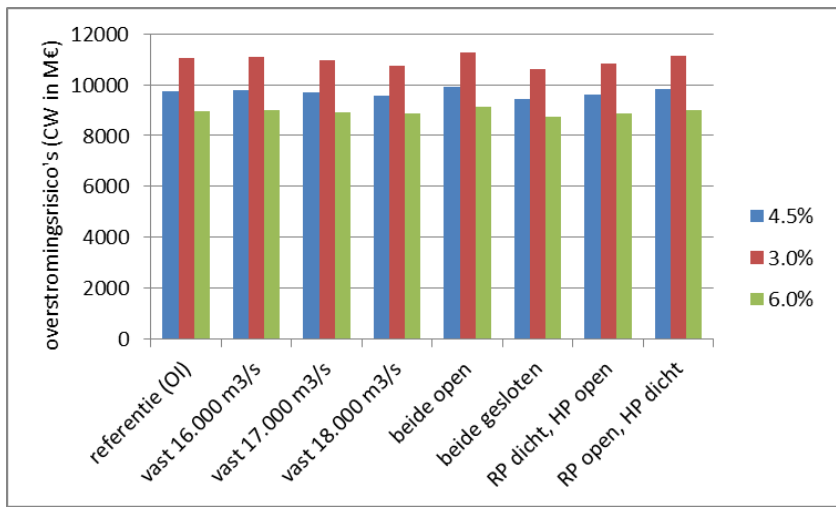
Wanneer gekeken wordt naar de verschillen in benodigde investeringskosten ten opzichte van de referentie (Figuur 4.12.b) dan leidt een hogere discontovoet tot iets kleinere verschillen. Bij varianten waarbij de kosten toenemen is de toename iets kleiner. Bij varianten waarbij de kosten lager zijn, zijn de verschillen ook kleiner. Een lagere discontovoet leidt juist tot iets grotere verschillen.

Bij de berekende overstromingsrisico's en bij de totale kosten zien we een vergelijkbaar patroon (Figuur 4.13 en Figuur 4.14). Een hogere discontovoet leidt tot kleinere risico's en tot iets kleinere verschillen in risico ten opzichte van de referentie. Een lagere discontovoet leidt juist tot grotere risico's en grotere verschillen. Hetzelfde is te zien bij de totale kosten.

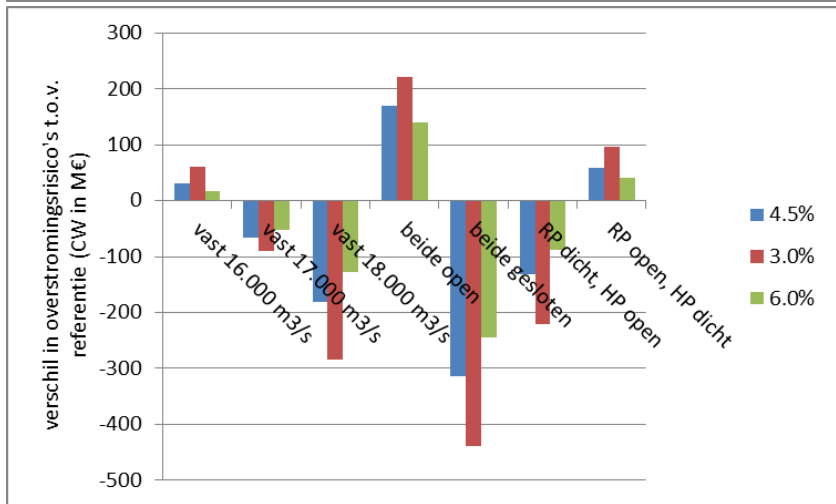




Figuur 4.12 Investeringskosten voor dijkversterking (CW in M€) bij verschillende waarden voor de discountvoet

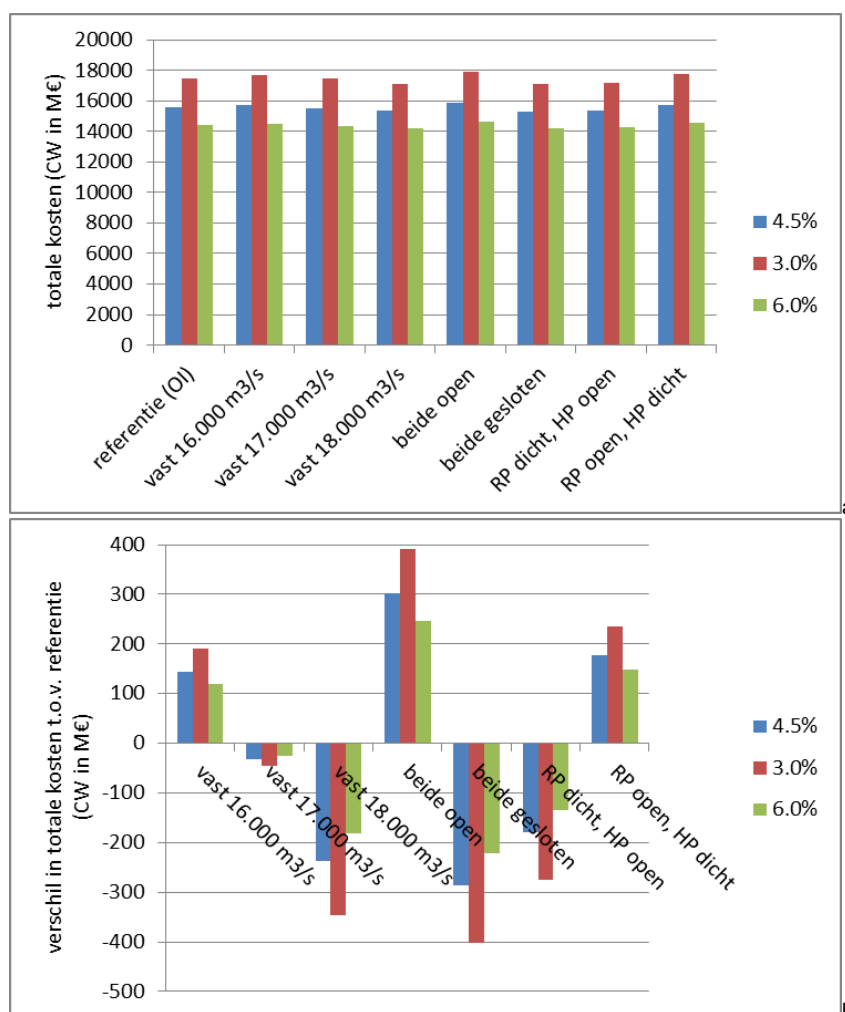


a



b

Figuur 4.13 Overstromingsrisico's (CW in M€) bij verschillende waarden voor de discountvoet



Figuur 4.14 Totale kosten (CW in M€) bij verschillende waarden voor de discontovoet

Uit bovenstaande analyses kan worden geconcludeerd dat een lagere waarde voor discontovoet tot iets grotere verschillen leidt in kosteneffectiviteit van de verschillende afvoerverdelingsvarianten. De goedkoopste variant (beide regelwerken gesloten) leverde een kostenbesparing op van 285 M€. Bij een discontovoet van 3% neemt deze besparing toe tot 400 M€. Bij een discontovoet van 6% neemt de besparing af tot 220 M€. In alle gevallen komt dit overeen met een kostenbesparing van 2%.

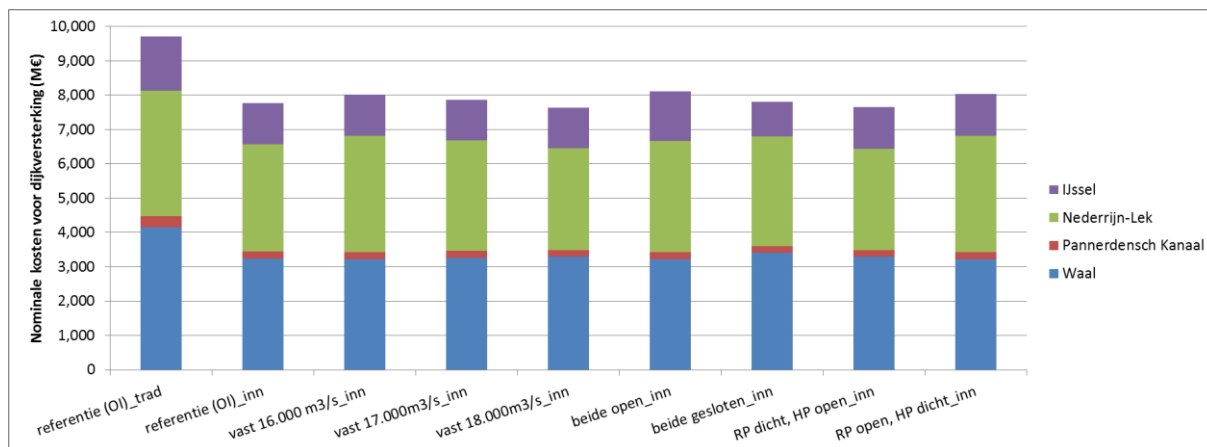
De belangrijkste conclusie van al het bovenstaande is echter dat de volgorde van de varianten, wanneer ze worden gerangschikt naar kosteneffectiviteit, niet verandert. De variant waarbij beide regelwerken gesloten zijn is het meest kosteneffectief. Een vaste instelling op 18.000 m<sup>3</sup>/s of het sluiten van regelwerk Pannerden en het open zetten van de Hondsbroeksche Pleij zijn ook iets kosteneffectiever dan de referentie.

## 4.4.4 Innovatieve maatregelen

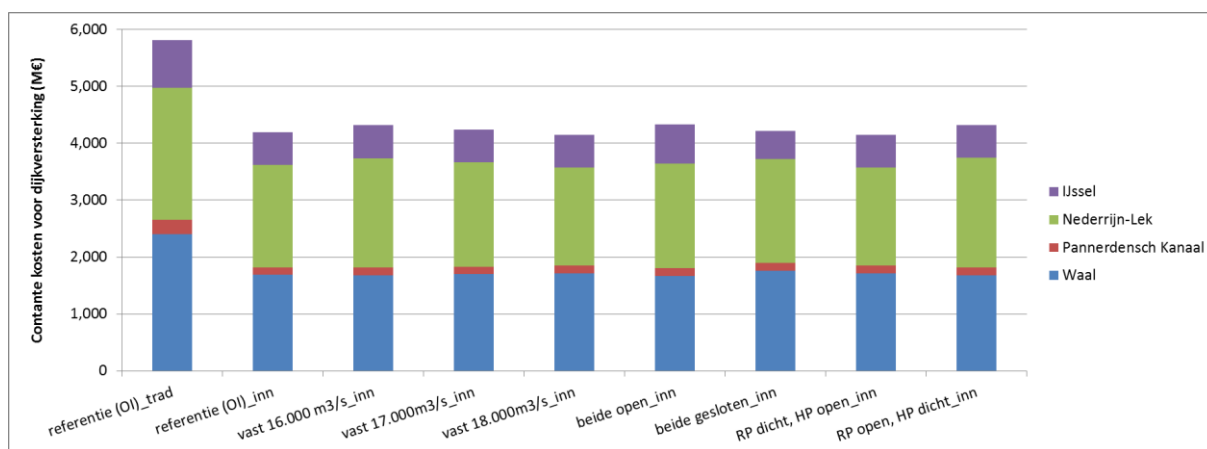
Omdat OKADER in de standaardberekeningen geen rekening houdt met innovatieve maatregelen om de pipingopgave op te lossen, vallen de kosten voor dijkversterking relatief hoog uit. Figuur 4.15 toont de nominale kosten voor dijkversterking voor de basisvarianten wanneer wel gebruik wordt gemaakt van innovatieve maatregelen. De referentievariant zonder innovatieve maatregelen is gegeven om makkelijker te kunnen vergelijken.

Wanneer geen gebruik wordt gemaakt van innovatieve maatregelen bedragen de nominale kosten voor dijkversterking 9,7 miljard euro. Door gebruik te maken van innovatieve oplossingen nemen de kosten af met 2 miljard euro (20%).

Figuur 4.16 toont de contante waarde van de kosten voor dijkversterking wanneer gebruik wordt gemaakt van innovatieve maatregelen. Zonder innovatieve maatregelen bedragen de contante kosten voor dijkversterking in de referentievariant 5,8 miljard euro. Door gebruik te maken van innovatieve maatregelen vallen de kosten 1,6 miljard euro lager uit (-28%).



Figuur 4.15 Nominale kosten voor dijkversterking wanneer gebruik wordt gemaakt van innovatieve pipingmaatregelen (M€).



Figuur 4.16 Contante kosten voor dijkversterking wanneer gebruik wordt gemaakt van innovatieve pipingmaatregelen (M€).

De innovatieve maatregelen leiden tot forse besparingen op de kosten voor dijkversterking, maar ze hebben slechts beperkt invloed op de *verschillen* in dijkversterkingskosten voor de verschillende afvoerverdelingsvarianten. Deze verschillen zijn te zien in Tabel 4.25. De totale kosten voor dijkversterking bedragen in de referentiesituatie 5,8 miljard euro. Met innovatieve maatregelen nemen deze af tot 4,2 miljard euro (laatste regel in de tabel). Echter wanneer gekeken wordt naar de kostenbesparing voor de variant waarbij beide regelwerken worden vastgezet op een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith, dan valt op dat de kosten zonder innovatieve maatregelen 113 M€ hoger uitvallen, terwijl dit met innovatieve maatregelen 121 M€ zou zijn. Wanneer de regelwerken vast worden ingesteld op een afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith, dan bedraagt de afname van de totale contante kosten voor dijkversterking zonder en met innovatieve maatregelen respectievelijk 55 en 53 M€. De verschillen zijn daarmee niet exact gelijk, maar liggen in dezelfde orde van grootte.

Tabel 4.25 Verschillen in berekende contante kosten voor dijkversterking (in M€) voor verschillende afvoerverdelingsvarianten zonder en met innovatieve maatregelen. Absolute kosten zijn gegeven voor de beide referentievarianten. Voor de overige varianten zijn de verschillen vermeld ten opzichte van de bijbehorende referentie.

	kosten		verschillen t.o.v. referentie													
	referentie (OI)		vast 16.000 m <sup>3</sup> /s		vast 17.000 m <sup>3</sup> /s		vast 18.000 m <sup>3</sup> /s		beide open		beide gesloten		RP dicht, HP open		RP open, HP dicht	
	trad	inn	trad	inn	trad	inn	trad	Inn	trad	inn	trad	inn	trad	inn	trad	inn
Waal	2404	1687	-18	-10	36	9	95	32	-40	-19	148	77	94	31	-22	-11
Pann. Kanaal	255	132	8	8	2	3	-1	0	9	9	-1	0	-1	0	8	8
Nederrijn-Lek	2312	1799	124	123	3	31	-128	-73	17	40	-11	23	-136	-78	127	125
IJssel	843	579	-1	0	-9	-4	-21	-11	145	105	-106	-76	-3	0	4	3
Totaal	5814	4197	113	121	33	38	-55	-53	131	135	29	23	-47	-46	118	125

Geconcludeerd wordt dat de kosten voor dijkversterking fors lager zijn wanneer gebruik kan worden gemaakt van innovatieve maatregelen, maar dat de invloed hiervan op de verschillen in kosten tussen de verschillende afvoerverdelingsvarianten klein is.



## 5 Overige beslisinformatie

### 5.1 Inzetsfrequentie bypass Veessen-Wapenveld

In bestaande afspraken is vastgelegd dat de groene rivier bij Veessen-Wapenveld mee gaat stromen wanneer de waterstand bij de inlaat NAP 5,65 m bedraagt. De beoogde inzetfrequentie is ongeveer 1 keer per 100 jaar. Volgens de GRADE-statistiek is de bijbehorende afvoer 12.773 m<sup>3</sup>/s te Lobith. In de referentiesituatie stroomt dan ongeveer 1.920 m<sup>3</sup>/s naar de IJssel. Bij de doorgerkende varianten komt deze afvoer soms vaker, en soms minder vaak voor. Tabel 5.1 toont de verandering in herhalingsstijd van de huidige 1:100 per jaar afvoer op de IJssel voor de varianten.

Bij de varianten die uitgaan van een vaste instelling van de regelwerken, treedt de grootste verandering in inzetfrequentie op wanneer beide regelwerken helemaal open of dicht staan. Indien beide regelwerken helemaal open staan, dan neemt de inzetfrequentie toe met een factor 1,3 (1 keer per 80 jaar in plaats van 1 keer per 100 jaar). Indien beide regelwerken dicht staan, dan neemt de inzetfrequentie af van 1 keer per 100 jaar naar 1 keer per 370 jaar.

Tabel 5.1 Verandering in herhalingsstijd van de huidige T100 afvoer op de IJssel

Variant	Herhalingsstijd (jaar)	Verandering inzet frequentie (factor)
referentie	100	-
vast 16.000 m <sup>3</sup> /s	100	1.0
vast 17.000 m <sup>3</sup> /s	104	1.0
vast 18.000 m <sup>3</sup> /s	305	0.3
RP en HP open	78	1.3
RP en HP dicht	372	0.3
RP dicht, HP open	106	0.9
RP open, HP dicht	99	1.0
IJssel ontzien 8.000 m <sup>3</sup> /s	oneindig (nooit ingezet)	
IJssel ontzien 10.000 m <sup>3</sup> /s	oneindig (nooit ingezet)	
IJssel ontzien 13.000 m <sup>3</sup> /s of hoger	100	1.0
Nederrijn-Lek ontzien	100	1.0
Waal ontzien 8.000 m <sup>3</sup> /s	20	4.9
Waal ontzien 10.000 m <sup>3</sup> /s	50	2.0
Waal ontzien 13.000 m <sup>3</sup> /s of hoger	100	1.0

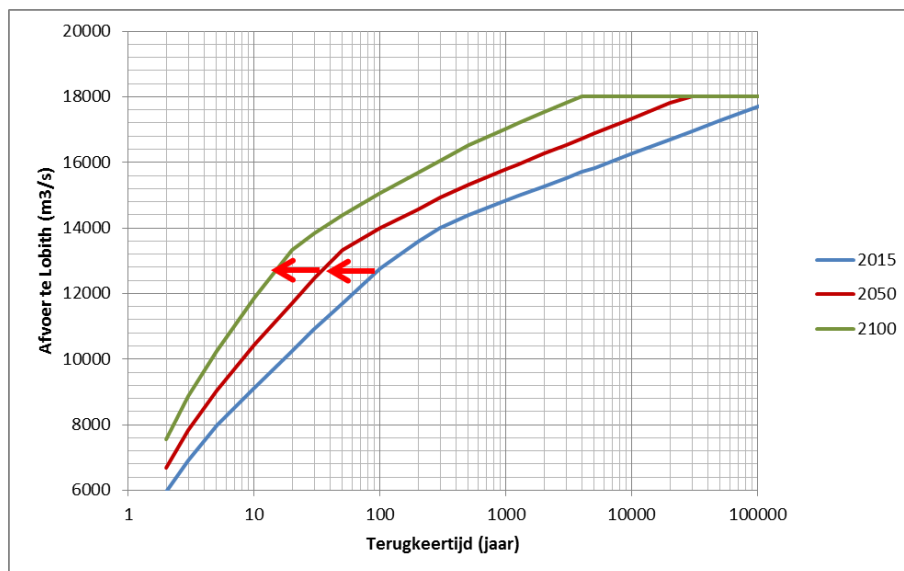
Wanneer de IJssel wordt ontzien vanaf afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s of 10.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith, dan zal Veessen-Wapenveld nooit meer mee stromen. Het ontzien van de IJssel bij hogere afvoeren heeft nauwelijks effect op de inzetfrequentie.

Wanneer de Nederrijn-Lek wordt ontzien en de extra afvoer via de Waal wordt afgevoerd heeft dat ook geen effect op de inzetfrequentie van Veessen-Wapenveld. De extra afvoer gaat immers naar de Waal.

Wanneer de Waal wordt ontzien bij afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s of 10.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith, dan neemt de inzetfrequentie fors toe. In plaats van 1 keer per 100 jaar, zal bypass Veessen-Wapenveld dan gemiddeld eens per 20 of eens per 50 jaar mee stromen.

Het ontzien van de Waal bij afvoeren van 13.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith of meer heeft geen effect op de inzetfrequentie. Wel zal het gebied dan bij extreme afvoeren dieper onder water komen te staan.

Om de verandering in inzetfrequentie als gevolg van een andere invulling van de beleidsmatige afvoerverdeling in perspectief te plaatsen, is ook gekeken naar de verandering in overschrijdingskans van de 1:100 jaar afvoer als gevolg van de verwachte klimaatverandering. Figuur 5.1 toont de werklijnen voor Lobith voor drie zichtjaren, uitgaande van het W+ klimaatscenario (dat is het scenario met de grootste toename van de rivierafvoeren). Deze figuur laat zien dat de huidige 1:100 per jaar afvoer in het jaar 2050 een overschrijdingskans heeft van ongeveer 1:35 per jaar. In het jaar 2100 zal de overschrijdingskans bij dit klimaatscenario zelfs 1:15 per jaar bedragen. Dat betekent dat de inzetfrequentie van Veessen-Wapenveld toeneemt met een factor 3 in het jaar 2050 en bijna met een factor 7 in het jaar 2100<sup>7</sup>. De veranderingen als gevolg van dit scenario voor klimaatverandering zijn dus groter dan de veranderingen als gevolg van de meeste hierboven verkende afvoerverdelingsvarianten.



Figuur 5.1 GRADE werklijnen voor Lobith voor verschillende zichtjaren uitgaande van aftopping op 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith en het W+ klimaatscenario

## 5.2 Overstromingsfrequentie buitengedijkte gebieden Cortenoever en Voorsterklei

Door de dijkverleggingen bij Cortenoever en Voorsterklei zijn gebieden die eerst binnendijs lagen buitendijs komen te liggen. Afsproken is dat de overstromingskans van deze gebieden in het huidig afvoerregime gemiddeld 1:25 per jaar is. In Tabel 5.2 is te zien hoe de overstromingsfrequentie verandert bij de verschillende afvoerverdelingsvarianten.

De grootste toename van de overstromingsfrequentie is te verwachten bij de variant Waal ontzien vanaf 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. De beide gebieden overstroom dan gemiddeld iedere 10 jaar in plaats van iedere 25 jaar. Bij de varianten die zijn gebaseerd op de huidige regelwerken, heeft de variant waarbij beide regelwerken open staan het grootste effect. De buitengedijkte gebieden bij Cortenoever en Voorsterklei overstroom dan gemiddeld een keer per 15 jaar.

<sup>7</sup> Bij het G-klimaatscenario halveren deze factoren. De toename is dan een kleine factor 2 in 2050 en ruim een factor 3 in 2100



De toename van de overstromingsfrequentie wanneer beide regelwerken dicht staan lijkt vreemd. Deze instelling leidt bij afvoeren te Lobith tot een lagere afvoer naar het Pannerdensch Kanaal. Echter, bij middelhoge afvoeren gaat er volgens de modelberekeningen een iets groter deel naar de IJssel. Bij hogere afvoeren te Lobith neemt de afvoer op de IJssel wel af.

Ter vergelijking, door klimaatverandering zal de overstromingsfrequentie van Cortenoever en Voorsterklei sowieso toenemen. De huidige afvoer met een overschrijdingskans van 1:25 per jaar heeft in klimaatscenario W+ in 2050 een overschrijdingskans van ongeveer 1:10 per jaar en in 2100 1:6 per jaar.

Tabel 5.2 Verandering in herhalingsjijd van de huidige T25 afvoer op de IJssel

Variant	Herhalingsjijd (jaar)	Verandering inzet frequentie (factor)
Referentie	25	-
vast 16.000 m <sup>3</sup> /s	25	1.0
vast 17.000 m <sup>3</sup> /s	28	0.9
vast 18.000 m <sup>3</sup> /s	31	0.8
RP en HP open	15	1.7
RP en HP dicht	16	1.6
RP dicht, HP open	27	0.9
RP open, HP dicht	25	1.0
IJssel ontzien 8.000 m <sup>3</sup> /s	oneindig (nooit overstroomd)	
IJssel ontzien 10.000 m <sup>3</sup> /s	oneindig (nooit overstroomd)	
IJssel ontzien 13.000 m <sup>3</sup> /s of hoger	25	1.0
Nederrijn-Lek ontzien	25	1.0
Waal ontzien 8.000 m <sup>3</sup> /s	10	2.5
Waal ontzien 10.000 m <sup>3</sup> /s	19	1.3
Waal ontzien 13.000 m <sup>3</sup> /s of hoger	25	1.0

### 5.3 Effect op de Rijn-Maasmonding

Een verandering van de afvoerverdeling beïnvloedt de combinaties van afvoer en storm in de overgangsgebieden (Merwede, Lek, IJsseldelta). Het effect van de doorgerekende afvoerverdelingsvarianten op de Rijn-Maasmonding is niet apart onderzocht. Er is zo veel mogelijk gebruik gemaakt van de kosteneffectiviteitsanalyse die is uitgevoerd in het kader van het Deltaprogramma (Stratelligence, 2013). Voor deze KEA hebben Deltaprogramma Rivieren en Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden samen naar een aantal afvoerverdelingsvarianten gekeken. Veel van de toen gebruikte uitgangspunten zijn inmiddels niet meer actueel, maar de beelden over hoe de afvoerverdeling van invloed kan zijn op de belastingen in de Rijn-Maasmonding zijn voor zover bekend, nog wel actueel.

Een beknopte samenvatting van de bevindingen van Stratelligence (2013) is te vinden in Bijlage D.

Geconcludeerd wordt (op basis van Stratelligence, 2013) dat het wijzigen van de afvoerverdeling bij hoge afvoeren geen wezenlijk effect heeft op de belastingen in de Rijn-Maasmonding. Wanneer de totale aanvoer van water naar de Rijn-Maasmonding bij middelhoge afvoeren fors afneemt (in de studie van Stratelligence bijna 15%), dan leidt dat tot een afname van de belastingen in de Rijn-Maasmonding. Bij een kleinere afname van de totale aanvoer (hier ongeveer 5%), kan dit op sommige takken leiden tot een toename van de belastingen en op andere takken tot een afname. Waarschijnlijk luistert het dan erg nauw bij welke afvoer welke afname gerealiseerd wordt en hoe de verdeling is over de Lek en de Waal.

Voor deze studie betekent dit dat de varianten waarbij is uitgegaan van de huidige regelwerken slechts beperkt invloed hebben op de belastingen in de Rijn-Maasmonding. De volgende effecten worden verwacht per variant:

- Vast op 16.000 m<sup>3</sup>/s: alleen wijziging in afvoerverdeling bij afvoeren hoger dan 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Effect op Rijn-Maasmonding is zeer klein.
- Vast op 17.000 m<sup>3</sup>/s: bij middelhoge afvoeren neemt de aanvoer van water naar de Rijn-Maasmonding zeer beperkt toe (minder dan 30 m<sup>3</sup>/s). Het effect op de Rijn-Maasmonding als geheel zal daardoor gering zijn. Echter, omdat de verdeling over Lek en Waal wel wat verschuift zou de belasting langs een aantal takken iets toe kunnen nemen, terwijl deze langs andere takken iets afneemt. De veranderingen zijn echter beperkt omdat de veranderingen kleiner zijn dan bij de variant MA2 zoals doorgerekend door Stratelligence (2013).
- Vast op 18.000 m<sup>3</sup>/s: de totale aanvoer naar de Rijn-Maasmonding neemt met enkele tientallen m<sup>3</sup>/s toe, maar de verdeling over de Waal en de Lek verschuift op een vergelijkbare manier als bij variant MA2. Dit betekent dat op een aantal takken in de Rijn-Maasmonding de belasting toe kan nemen terwijl deze op andere takken afneemt.
- Beide regelwerken open: deze variant leidt tot een afname van de aanvoer van water naar de Rijn-Maasmonding bij middelhoge afvoeren (gemiddeld ongeveer 100 m<sup>3</sup>/s minder). De belastingen kunnen in dat gebied dus iets afnemen (waarschijnlijk minder dan bij MA1).
- Beide regelwerken dicht: deze variant heeft weinig effect bij middelhoge afvoeren. Bij afvoeren tussen de 8.000 en 10.000 m<sup>3</sup>/s is sprake van een beperkte afname, terwijl bij iets hogere afvoeren de aanvoer juist iets toeneemt. Het netto totale effect zal daarmee gering zijn, maar kan wel per tak verschillen.
- Regelwerk Pannerden dicht, Hondsbroeksche Pleij open: Bij middelhoge afvoeren neemt de aanvoer van water naar de Rijn-maasmonding zeer beperkt toe. Echter, omdat er verder vooral sprake is van een verschuiving van de afvoer van de Nederrijn-Lek naar de Waal kan langs bepaalde takken sprake zijn van een toename van de belasting, terwijl de belasting langs andere takken juist afneemt.
- Regelwerk Pannerden open, Hondsbroeksche Pleij dicht: de totale aanvoer van water naar de Rijn-Maasmonding blijft gelijk. Bij middelhoge afvoeren blijft de verdeling over Nederrijn-Lek en Waal ook vrijwel gelijk. Het effect op de belastingen in het gebied van de Rijn-Maasmonding zal voor deze variant dus verwaarloosbaar zijn.
- IJssel ontzien: afhankelijk van de afvoer te Lobith waarboven de IJssel wordt ontzien kan dit grote gevolgen hebben voor de Rijn-Maasmonding. Wanneer de IJssel al wordt ontzien bij afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s of 10.000 m<sup>3</sup>/s zal dit een groot effect hebben op de belastingen, met extra dijkversterking tot gevolg. Wanneer de IJssel pas bij 15.000 m<sup>3</sup>/s of meer wordt ontzien, dan zal het effect klein zijn.
- Nederrijn-Lek ontzien: voor alle varianten geldt dat de aanvoer van water naar de Rijn-Maasmonding niet verandert. Echter, omdat de verdeling van het water over de Nederrijn-Lek en de Waal wel wijzigt kan dit wel betekenen dat de belastingen in sommige takken afneemt, terwijl deze langs andere trajecten toeneemt.
- Waal ontzien: voor alle varianten geldt dat er minder water naar de Rijn-Maasmonding stroomt, waardoor de belastingen afnemen. Dit effect is het grootste wanneer de Waal al bij lagere afvoeren wordt ontzien. Het ontzien van de Waal bij afvoeren van 15.000 m<sup>3</sup>/s of meer zal weinig effect hebben.

## 5.4 Effect op het IJsselmeer

Voor het effect op het IJsselmeer is gebruik gemaakt van de berekeningen die in 2017 en 2018 zijn uitgevoerd in het kader van de Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer (ISWP) IJsselmeergebied (De Grave et al, 2017b; Remmelzwaal et al., 2018; Kuijper, 2018). Een beknopt overzicht van de resultaten die gebruikt zijn voor deze studie is te vinden in Bijlage D.

De berekeningen zijn gebruikt om de verschillen in kosten voor dijkversterking en benodigde pompcapaciteit te schatten:

- Vast op 16.000 m<sup>3</sup>/s: alleen bij afvoeren hoger dan 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith krijgt de IJssel tot maximaal 35 m<sup>3</sup>/s extra afvoer. Deze toename is zo gering en heeft bovendien zo'n kleine kans op voorkomen, dat dit nauwelijks effect heeft op de waterstanden op het IJsselmeer. De kosten voor dijkversterking en de benodigde pompcapaciteit blijven vrijwel gelijk.
- Vast op 17.000 m<sup>3</sup>/s: De IJssel krijgt tot 40 m<sup>3</sup>/s minder afvoer. Dit verschil is echter veel kleiner dan bij de sommen voor het ISWP (daar neemt de afvoer met 400 tot 1.600 m<sup>3</sup>/s af). Als we aannemen dat de effecten een factor 10 kleiner zijn, dan komt dit neer op een besparing van de kosten voor dijkversterking in de orde van 50 miljoen euro op een totaal van 2,5 miljard euro (contante waarde) en een afname van de pompcapaciteit met 10 m<sup>3</sup>/s (op een benodigde capaciteit van 1.100 m<sup>3</sup>/s).
- Vast op 18.000 m<sup>3</sup>/s: de aanvoer naar het IJsselmeer neemt bij hoogwater af met maximaal 80 m<sup>3</sup>/s. het effect op het IJsselmeer zal daarom redelijk vergelijkbaar zijn met een vaste instelling op 17.000 m<sup>3</sup>/s.
- Beide regelwerken open: deze variant leidt tot een toename van de aanvoer van water naar IJsselmeer tijdens hoogwater. De toename loopt op van 70 m<sup>3</sup>/s bij middelhoge afvoeren tot 300 m<sup>3</sup>/s bij extreem hoge afvoeren. Dit is ongeveer de helft tot een derde deel van de toename die is meegenomen bij ISWP. Wanneer wordt uitgegaan van de helft van het effect zoals berekend voor ISWP, dan nemen de kosten voor dijkversterking met ongeveer 0,25 miljard toe (op een totaal van 2,5 miljard). De benodigde pompcapaciteit neemt in 2075 met 50 m<sup>3</sup>/s toe (op een benodigde capaciteit van 1.100 m<sup>3</sup>/s).
- Beide regelwerken dicht: deze variant leidt tot een geringe toename (70 m<sup>3</sup>/s) van de IJsselafvoer bij middelhoge afvoeren. Bij nog hogere afvoeren neemt de aanvoer juist af (200 m<sup>3</sup>/s). Het netto totale effect zal daarmee waarschijnlijk gering zijn.
- Regelwerk Pannerden dicht, Hondsbroeksche Pleij open: de IJsselafvoer neemt met enkele tientallen m<sup>3</sup>/s af. Het effect zal vergelijkbaar zijn met een vaste instelling op 17.000 m<sup>3</sup>/s.
- Regelwerk Pannerden open, Hondsbroeksche Pleij dicht: de totale aanvoer van water naar het IJsselmeer blijft gelijk. Er is geen effect te verwachten.
- IJssel ontzien: afhankelijk van de afvoer te Lobith waarboven de IJssel wordt ontzien kan dit grote gevolgen hebben voor de piekwaterstanden op het IJsselmeer. Wanneer de IJssel al wordt ontzien bij afvoeren van 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith leidt dit tot 0,3 m lagere meerpeilen. De kosten voor dijkversterking nemen mogelijk met 0,5 miljard euro af (contante waarde) en de benodigde pompcapaciteit in 2075 neemt met 100 m<sup>3</sup>/s af. Wanneer de IJssel pas bij hogere afvoeren wordt ontzien, dan zal het effect klein zijn.
- Nederrijn-Lek ontzien: geen effect op de afvoer naar het IJsselmeer.
- Waal ontzien: Wanneer de Waal al bij een afvoer van 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith wordt ontzien, dan zullen de kosten voor dijkversterking met 1 miljard euro toenemen. De benodigde pompcapaciteit zal mogelijk met 200 m<sup>3</sup>/s toenemen. Opgemerkt wordt dat deze schattingen een extrapolatie van eerder uitgevoerde berekeningen betreffen.

- Ze zijn daardoor onzeker. Wanneer de Waal pas bij hogere afvoeren wordt ontzien zullen de negatieve effecten kleiner zijn.

## 5.5 Behoud van het regelbereik

Bij behoud van het regelbereik is naar drie aspecten gekeken:

- De wens 'naar 2 kanten' regelbereik te hebben: wanneer de regelwerken dicht staan, kan slechts naar 1 kant worden bijgesteld, namelijk door de regelwerken verder open te zetten. Wanneer een regelwerk open staat, kan alleen bijgestuurd worden door het regelwerk te sluiten. Wanneer beide regelwerken in een middenstand staan, dan is op beide locaties sprake van regelbereik 'naar 2 kanten'.
- Behoud regelbereik ter compensatie van autonome ontwikkeling van de afvoerverdeling als gevolg van bodemerrosie: Kroekenstoel en Van den Berg (2011) geven aan dat bij geopende stuwen sprake is van een groeiende afvoer naar het Pannerdensch Kanaal en een afnemende afvoer naar de Waal. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt doordat de bodem van het Pannerdensch Kanaal sneller daalt dan de bodem van de Boven-Waal. Voor extremere hoogwaters zijn onvoldoende gegevens beschikbaar om lange-termijn trends te kunnen vaststellen. Wanneer deze trend ook bij hogere afvoeren optreedt en zich in de toekomst doorzet, dan kan het wenselijk zijn om de instelling van de regelwerken aan te kunnen passen om dit effect te kunnen compenseren. Dit betekent dat het regelwerk Pannerden nu ver genoeg open moet staan, zodat men hier in de toekomst extra schotten kan plaatsen om meer water naar de Waal te sturen.
- Behoud regelbereik bij realisatie IJsselpoort: realisatie van de rivierverruimingsmaatregel Klimaatpark IJsselpoort leidt tot een verschuiving van de afvoerverdeling naar de IJssel. Wanneer nu wordt gekozen voor een afvoerverdeling waarbij de Hondsbroeksche Pleij nagenoeg dicht staat, dan is het niet mogelijk om in een latere fase extra te compenseren voor Klimaatpark IJsselpoort. Indien men overweegt om deze maatregel uit te voeren, dan zou de Hondsbroeksche Pleij nu zo ver mogelijk open moeten staan (tenzij het effect van Klimaatpark IJsselpoort volledig gecompenseerd wordt met rivierverruiming op de Nederrijn).

De wensen ten aanzien van de instellingen zijn samengevat in onderstaande tabel. Op basis van deze drie criteria gaat de voorkeur uit naar een instelling waarbij de regelwerken half of helemaal open staan.

Tabel 5.3 Gewenste instelling regelwerken op basis van aanvullende beslisriteria

Wens	Instelling regelwerk	
	Pannerden	Hondsbroek
Naar 2 kanten regelbereik	midden	midden
Compensatie autonome ontwikkeling afvoerverdeling	open (of midden)	-
Behoud regelbereik na realisatie klimaatpark IJsselpoort	open (of midden)	open

Voor de varianten met een vaste instelling is aangegeven in welke mate ze passen bij deze gewenste instellingen. De resultaten staan in Tabel 5.4. Afhankelijk van de weging van bovenstaande criteria komt de variant 'vast 17.000 m<sup>3</sup>/s' of 'RP en HP open' als beste uit de bus. De variant waarbij beide regelwerken gesloten zijn komt als minst wenselijk naar voren.

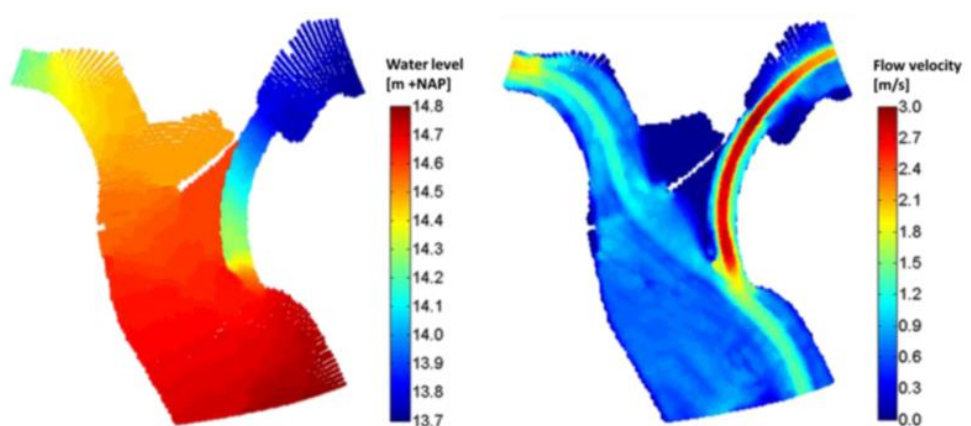
Tabel 5.4 instelling van de regelwerken per afvoerverdelingsvariant

Variant	Instelling regelwerk		oordeel
	Pannerden	Hondsbroeksche Pleij	
Referentie	variabel	variabel	
vast 16.000 m <sup>3</sup> /s	bijna geheel open	bijna geheel gesloten	0
vast 17.000 m <sup>3</sup> /s	midden	midden	+
vast 18.000 m <sup>3</sup> /s	bijna geheel gesloten	bijna geheel open	0
RP en HP open	open	open	+
RP en HP dicht	gesloten	gesloten	-
RP dicht, HP open	gesloten	open	0
RP open, HP dicht	open	gesloten	0

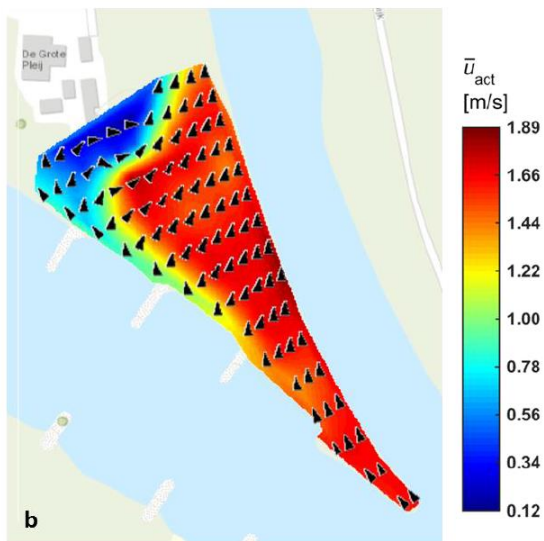
## 5.6 Effect op morfologie

De afgelopen decennia is op de Rijntakken sprake van doorgaande erosie van het zomerbed. Op dit moment is vooral nog sprake van doorgaande erosie op de Waal, Pannerdensch Kanaal en de BovenIJssel. Er worden maatregelen getroffen (suppletie, langsdammen) om verdere daling van het zomerbed tegen te gaan. Indien de afvoerverdeling wordt gewijzigd dan dient het huidige beleid mogelijk wat te worden aangepast, bijvoorbeeld door de suppletievolumes op de verschillende locaties aan te passen. Als de afstromende takken na een riviersplitsing namelijk met verschillende snelheden eroderen, zal de afvoerverdeling kunnen verschuiven. De afvoer zal toenemen in de sterkst eroderende tak, en afnemen in de minst eroderende (of sedimenterende) tak.

De grootste risico's doen zich waarschijnlijk voor bij de IJsselkop, vooral wanneer gekozen wordt voor een variant waarbij de afvoer naar de IJssel toeneemt. Een masterstudent aan de TU Delft (Vereijken, 2016) heeft een aantal jaar geleden gekeken naar de kans dat erosie van de uiterwaard op de punt van de IJsselkop een gevaar kan vormen voor de afvoerverdeling tijdens een extreem hoogwater. Figuur 5.2 laat zien dat het verhang op de bovenloop van de IJssel groter is dan op de bovenloop van de Nederrijn. Dit leidt tot een verhang van west naar oost over de IJsselkop. De stroomsnelheden blijken onder maatgevende omstandigheden dermate groot te zijn (Figuur 5.3) dat een grasmat die in slechte conditie verkeert kan eroderen, waarna ook het onderliggende materiaal weg kan spoelen. Dit zou kunnen zorgen voor een plotselinge toename van de afvoer naar de IJssel.



Figuur 5.2 Waterstanden (links) en stroomsnelheden (rechts) nabij de IJsselkop bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith (figuur is overgenomen uit Vereijken (2016) die zich heeft gebaseerd op data van Suryadi en Mosselman, 2005).



Figuur 5.3 Stroomsnelheden over de IJsselkop (Vereijken, 2016).

De afpleisterlaag op de boven-IJssel vormt ook een potentieel gevaar. Wanneer deze laag opbreekt tijdens (extreme) hoogwatercondities kan versnelde erosie optreden van de bodem, met een toename van de afvoer over de IJssel tot gevolg. Hoe groot de kans hierop is, is niet exact bekend. De kans hierop kan worden verkleind door bodembescherming aan te brengen.

Door de vormgeving van de IJsselkop gaat er op dit moment verhoudingsgewijs iets te veel sediment naar de Nederrijn en te weinig naar de IJssel. Omdat de transportcapaciteit op de Nederrijn beperkt is, leidt dit daar tot sedimentatie. Dit effect kan worden tegengegaan door het splitsingspunt iets te verlengen. Dit is gunstig voor de verdeling van het sediment, maar leidt (door een sterkere stroming naar de IJssel) wel tot een gevaarlijkere situatie voor de scheepvaart. Een alternatieve maatregel is sediment te baggeren op de Nederrijn en dit te storten op de IJssel.

Bij de Waal lijken deze risico's niet of in mindere mate te spelen. Het sediment op de Boven-Rijn is op dit moment erg grof. Daardoor treedt erosie op op de boven-Waal. Indien meer water naar de Waal wordt gestuurd, zou deze erosie enigszins toe kunnen nemen. De verwachting is dat dit mee valt, maar een onderbouwing is op dit moment niet te geven. Met een aantal verkennende sommen (handberekeningen) zou na kunnen worden gegaan of extra afvoer naar de Waal tot extra erosie zou leiden.

Opgemerkt wordt dat de genoemde gevaren nu ook al spelen. Ook bij de huidige afvoerverdeling kan bij een extreem hoogwater sprake zijn van erosie op de IJsselkop of de boven-IJssel.

Met betrekking tot de snelheid waarmee deze veranderingen optreden wordt opgemerkt dat er bij splitsingen geen aanleiding is om te vrezen voor een onverwacht kantelpunt, waarbij zich in korte tijd een hele riviertak zou kunnen afsluiten. Voor dergelijke grootschalige veranderingen is beduidend meer tijd nodig dan een hoogwater. Dat betekent dat morfologische veranderingen tijdens een hoogwater kunnen leiden tot een verschuiving van de afvoerverdeling, maar dat dit naar verwachting na afloop kan worden hersteld om een doorgaande trend te voorkomen.

## 6 Conclusies

Bij de afspraken over de beleidsmatig gewenste afvoerverdeling die in 2006 zijn vastgelegd, ging men uit van één maatgevende afvoer. Alleen bij die maatgevende omstandigheden zou de afvoer conform afspraken verdeeld moeten worden. De nieuwe beschermingsnormen die sinds 1 januari 2017 van kracht zijn, zijn echter niet langer gericht op het veilig keren van één maatgevende waterstand, maar op het voldoen aan een maximaal toelaatbare overstromingskans. Dat betekent dat de hele range aan afvoeren en bijbehorende waterstanden van belang is en dat dus ook voor de hele range aan afvoeren bij Lobith van belang is hoe deze over de verschillende Rijntakken verdeeld wordt.

De vraag die nu voorligt luidt: Hoe kunnen we de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling interpreteren in het licht van de nieuwe risicobenadering, waarin we niet langer uitgaan van een enkelvoudige maatgevende afvoer?

Om op deze vraag een antwoord te kunnen geven, moeten de volgende deelvragen worden beantwoord.

### **Hoe wordt de beleidsmatig vastgesteld afvoerverdeling op dit moment in modellen meegenomen?**

In de meeste modelstudies wordt uitgegaan van stuurbare regelwerken. Sturing van het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij gebeurt in alle modellen dynamisch. Dit betekent dat de instelling tijdens het passeren van een afvoergolf kan worden gewijzigd, om zo goed mogelijk aan de gewenste verdeling te voldoen. Het regelwerk Pannerden wordt in de modellen meestal vastgezet. Echter, afhankelijk van de door te rekenen afvoeren kunnen verschillende instellingen worden gebruikt. Bij een berekening met een maximale afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s wordt een andere instelling gebruikt dan bij een berekening met een maximale afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s. Met 'vast' wordt hier dus bedoeld dat de instelling van het regelwerk Pannerden tijdens een berekening niet verandert. Tussen verschillende berekeningen (voor verschillende rivierafvoeren) bestaan echter wel verschillen in instelling. Omdat in werkelijkheid niet voorafgaand aan een hoogwater te voorspellen is hoe groot de afvoer precies zal worden, geldt dus eigenlijk dat ook voor het regelwerk Pannerden wordt aangenomen dat de instelling tijdens hoogwater te wijzigen is.

### **Is het mogelijk om de instelling van de regelwerken bij de Pannerdensche Kop en de IJsselkop tijdens hoogwater te wijzigen?**

Het plaatsen van schotten lijkt niet mogelijk: als gevolg van de vervalbelasting op de schotten is de wrijvingskracht op de schotten in de sponningen groter dan het eigen gewicht, waardoor de schotten niet zullen zakken. Dit geldt voor beide locaties. Bovendien geldt bij Pannerden dat bij extreme afvoeren de waterstand hoger zou kunnen worden dan de bovenkant van de sponning, waardoor, bij het plaatsen van een schot, de onderrand van het schot het water zou raken voordat het schot door de sponning op zijn plaats gehouden wordt.

Het trekken van schotten lijkt bij de Hondsbroeksche Pleij, wat betreft de verticale krachten, mogelijk. Een werkwijze hiervoor is voorgesteld door de aannemer (zie Biggelaar & Royal Haskoning, 2008). Of dit ook nader is uitgewerkt, getoetst en getest is, is niet bekend. Bij eerste beschouwing, lijkt het dat er kanttekeningen te plaatsen zijn over betrouwbaarheid en veiligheid.

Voor het wegnemen van schotten bij regelwerk Pannerden zouden de verticale krachten nader moeten worden bepaald: het is onbekend of de hijspunten aan de schotten sterk genoeg zijn.

**Als dit niet mogelijk is, zijn er dan redenen om de regelwerken zo aan te willen passen dat dynamische sturing wel mogelijk is?**

Aanpassing van de regelwerken zodat deze dynamisch stuurbaar zijn heeft geen invloed op het regelbereik. Dit blijft even groot. Indien men het regelbereik wil vergroten zijn andere (grotere) regelwerken nodig. Het enige voordeel van aanpassing van de huidige regelwerken is dat men tijdens een hoogwater, wanneer zich ergens een calamiteit voordoet, kan besluiten om de afvoerverdeling enigszins te beïnvloeden.

**Welke afvoerverdelingsvarianten zijn mogelijk wanneer de regelwerken statisch worden ingezet?**

Wanneer wordt uitgegaan van een vaste instelling van de regelwerken is een aantal afvoerverdelingen mogelijk. Zo kan worden uitgegaan van de huidige instelling, die gebaseerd is op de gewenste verdeling van de oude maatgevende afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Er kan ook worden gekozen voor een vaste instelling behorend bij een grotere afvoer van 17.000 m<sup>3</sup>/s of 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. De uitersten van het regelbereik worden verkregen Wanneer de regelwerken bij de Pannerdensche kop en de IJsselkop beide volledig open of beide volledig dicht staan.

**Hoe kosteneffectief zijn deze varianten?**

De onderlinge verschillen in kosteneffectiviteit tussen de onderzochte varianten zijn beperkt. De contante waarden van de kosten voor dijkversterking zijn maximaal 130 M€ (2%) hoger (wanneer beide regelwerken open staan) en maximaal 55 M€ (1%) lager wanneer wordt gekozen voor een vaste instelling gebaseerd op een afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith.

De contante waarde van het overstromingsrisico bedraagt in de referentiesituatie 9,8 miljard euro. Bij de onderzochte afvoerverdelingsvarianten kan dit maximaal 170 M€ (2%) hoger uitvallen of ruim 300 M€ (3%) lager.

Door de investeringskosten en de overstromingsrisico's te combineren worden de totale kosten in beeld gebracht. De totale kosten zijn maximaal 285 M€ lager dan in de referentie (wanneer beide regelwerken gesloten zijn) en maximaal 300 M€ hoger (wanneer beide regelwerken open zijn). Omdat de totale kosten in de referentiesituatie 15,6 miljard euro bedragen, zijn de relatieve verschillen klein: plus of min 2%.

**Indien de regelwerken worden aangepast, welke varianten zijn dan mogelijk, en zijn deze varianten kosteneffectief?**

Wanneer de inrichting van het splitsingspuntengebied, inclusief de regelwerken, wordt aangepast, dan kan een tak worden ontzien. Uit de uitgevoerde analyses blijkt echter dat deze varianten naar verwachting niet kosteneffectief zijn. Een aantal varianten waarbij een tak al bij lage afvoeren wordt ontzien (orde 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith) leveren weliswaar een besparing op de totale kosten voor dijkversterking en overstromingsrisico's, maar deze besparing wordt waarschijnlijk volledig teniet gedaan door de investeringen die nodig zijn in het splitsingspuntengebied om de afvoerverdeling te kunnen wijzigen.



**Welke aanvullende criteria zijn naast kosteneffectiviteit in ieder geval ook van belang bij de keuze voor een specifieke afvoerdeling en hoe scoren de onderzochte varianten op deze criteria?**

In het kader van overige beslisinformatie is gekeken naar:

- Inzefrequentie van bypass Veessen-Wapenveld;
- Overstromingsfrequentie van de buitengedijkte gedeelten van Cortenoever en Voorsterklei;
- Effect op de hydraulische belasting in de Rijn-Maasmonding;
- Effect op de hydraulische belasting op het IJsselmeer en benodigde pompcapaciteit op de afsluitdijk;
- Behoud van voldoende regelbereik in twee richtingen.
- Effect op morfologie van het rivierbed

De beoordeling op deze criteria is samen met de indicatie van de kosteneffectiviteit in Figuur 6.1 te zien.

Variant	kosten dijkversterking (contante waarde, M€)	overstromingsrisico's (contante waarde, M€)	totale kosten (contante waarde, M€)	kosteneffectiviteit	inzefrequentie Veessen-Wapenveld (1/jaar)	overstromingskans Cortenoever- Voorsterklei (1/jaar)	Effect op Rijn- Maasmonding	Effect op IJsselmeer	Behoud regelbereik	Effect op morfologie
referentie OI	5814	9753	15566	-	1:100	1:25	0	0	+	0
vast 16.000 m3/s	5927	9783	15710	-	1:100	1:25	0	0	0	0
vast 17.000 m3/s	5847	9686	15533	0	1:104	1:28	-/0	0/+	+	0/+
vast 18.000 m3/s	5759	9572	15330	+	1:300	1:31	-/0	0/+	0	0/+
beide open	5945	9923	15867	-	1:78	1:15	+	--	+	--
beide gesloten	5843	9438	15281	+	1:370	1:16	0	-	--	-
RP dicht, HP open	5766	9620	15387	+	1:106	1:27	-/0	0/+	0	0/+
RP open, HP dicht	5932	9812	15744	-	1:99	1:25	0	0	0	0
IJ8000	5943	9202	15145	--	nooit	nooit	--	++	++	+
IJ10000	5978	9304	15282	--	nooit	nooit	--	++	++	+
IJ13000	5931	9356	15287	--	1:100	1:25	-	+	++	+
IJ15000	5915	9442	15357	--	1:100	1:25	-	+	++	+
IJ16000	5912	9587	15499	-	1:100	1:25	0	0	++	+
IJ17000	5886	9604	15490	-	1:100	1:25	0	0	++	+
IJ18000	5869	9617	15486	-	1:100	1:25	0	0	++	+
NR8000	5410	9490	14900	-	1:100	1:25	0	0	++	0
NR10000	5778	9892	15670	--	1:100	1:25	0	0	++	0
NR13000	5928	9781	15709	--	1:100	1:25	0	0	++	0
NR15000	5909	9713	15622	--	1:100	1:25	0	0	++	0
NR16000	5927	9746	15673	-	1:100	1:25	0	0	++	0
WL8000	5615	9721	15336	--	1:20	1:10	++	--	++	--
WL10000	5859	9761	15620	--	1:50	1:19	++	--	++	--
WL13000	6144	9757	15902	--	1:100	1:25	+	-	++	--
WL15000	6016	9641	15657	--	1:100	1:25	+	-	++	--
WL16000	5974	9647	15621	-	1:100	1:25	0	0	++	--
WL17000	5933	9654	15587	-	1:100	1:25	0	0	++	--
WL18000	5915	9658	15573	-	1:100	1:25	0	0	++	--

Figuur 6.1 Overzicht beoordeling afvoerdiversificatievarianten op kosteneffectiviteit en een aantal aanvullende criteria (Een donkeroranje kleur duidt op een slechte score op dit criterium. Omgekeerd duidt een donkergroene kleur juist op een zeer positieve score).

Het oordeel kosteneffectiviteit is gebaseerd op de totale kosten voor dijkversterking en overstromingsrisico's plus een zeer grove schatting van de kosten die gepaard gaan met aanpassing van de regelwerken en eventueel het splitsingspunt. Hierbij is uitgegaan van 0,2 miljard euro indien alleen de regelwerken moeten worden aangepast om deze stuurbaar te maken, 0,5 miljard euro indien een beperkte extra aanpassing nodig is bij het splitsingspunt en 1,0 miljard euro wanneer grote aanpassingen nodig zijn. Varianten waarbij 1 tak al bij lage afvoeren wordt ontzien, lijken het minst kosteneffectief. Dit komt vooral door de grote ingrepen die nodig zijn in het splitsingspuntengebied.

De scores op de overstromingsfrequenties van Veessen-Wapenveld en Cortenoever en Voorsterklei variëren. Ontzien van de IJssel bij middelhoge afvoeren heeft het grootste effect.

Zoals te verwachten zijn de effecten op de Rijn-Maasmonding en de IJsseldelta tegengesteld. Immers, wanneer er bij middelhoge afvoeren minder water naar de Rijn-Maasmonding stroomt, dan betekent dit dat er meer water naar de IJsseldelta gaat.

Met betrekking tot het regelbereik scoren de varianten waarbij de regelwerken en het splitsingspunt wordt aangepast het beste. Door de omvangrijke aanpassingen is het immers niet alleen mogelijk om tijdens een hoogwater bij te sturen, maar is ook het regelbereik fors toegenomen.

## **Eindconclusie**

Geconcludeerd kan worden dat bovenstaande beoordeling geen eenduidig beeld oplevert en er geen duidelijke voorkeursvariant uit komt rollen. De kostenbesparingen zijn relatief beperkt: veelal een paar honderd miljoen euro, maar dat is slechts 2% van het totaal. Een + als beoordeling bij kosteneffectiviteit betekent dus maar een kostensparing van een paar procent. Kosteneffectiviteit is daarmee geen doorslaggevend criterium. Omdat de scores op de andere criteria sterk wisselen, zal het eindoordeel erg afhankelijk zijn van hoe deze criteria gewogen worden.

Indien wordt gekozen voor een vaste instelling van de regelwerken, en men waarde hecht aan behoud van het regelbereik, dan lijkt een vaste instelling op 17.000 m<sup>3</sup>/s een goede keuze. De kosteneffectiviteit is neutraal, en de score op de inzetfrequentie van Veessen-Wapenveld is positief voor de landbouw (maar negatief voor de natuur) en compenseert mogelijk het effect van de klimaatverandering. Dit geldt ook voor de overstromingsfrequentie van de buitengedijkte gebieden bij Cortenoever en Voorsterklei.

Een vaste instelling op 18.000 m<sup>3</sup>/s scoort beter op kosteneffectiviteit, maar heeft als nadeel dat 1 regelwerk ver dicht staat. Daardoor is het regelbereik eenzijdig.

## 7 Referenties

- Asselman, N. en D. Wagenaar (2016) Afvoerverdeling Rijntakken bij hoogwater: Moet de optie om de afvoerverdeling na 2050 te wijzigen openblijven? Deltares, rapport 1230044-000-ZWS-0037.
- Asselman, N., P. de Grave en D. Wagenaar (2018) Afvoerverdeling Rijntakken na 2050: Lijkt een wijziging kosteneffectief of niet? Deltares, rapport 11202191-000-ZWS-0009.
- Asselman, N., S. van Vuren, J. Pol, O. Levelt, D. Wagenaar, R. Wortelboer, J. Vieira da Silva, C. Wegman (2017) Waterveiligheidskosten & baten en baten voor natuur van maatregelpakketten Rijn – achtergrondrapportage MKBA. Deltares, HKV lijn in water en Rijkswaterstaat WVL.
- De Grave, P. (2017) Kosten innovatieve pipingmaatregelen voor MKBA-analyse rivieren. Deltares memo 11200539-000-ZWS-0017.
- De Grave, P., O. Levelt, J. Pol, G. Pleijter (2017a) Gebruikershandleiding Rivierentool Kostenreductie Dijkversterking door Rivierverruiming (OKADER). Deltares rapport 11200539-000-ZWS-0001.
- De Grave, P., G. Pleijter, B. Kuijper, N. Kramer en R. van der Meij (2017b) Dijkkosten ISWP IJsselmeergebied: Methodiek en resultaten. Deltares rapport 11200593-000-ZWS-0005.
- Kuijper, B. (2018) Overzicht resultaten DEZY-berekeningen. HKV memo PR3294.70.
- Levelt, O., S. van Vuren, J. Pol en P. de Grave (2017) Resultaten analyse verkleinen pipingopgave en –kosten. Deltares memo 11200539-002-ZWS-0014.
- Levelt, O., P. de Grave, J. Pol en D. Nugroho (2018) Testberekeningenrapportage nieuwe versie OKADER - Versie 2018-08-13. Deltares rapport 11202191-000-ZWS-0023.
- Nortier, I.W. en P. de Koning (1996) Toegepast Vloeistofmechanica, hydraulica voor waterbouwkundigen.
- Remmelzwaal, A., A. Kors, I. Tanczos, J. Helmer en H. Berger (2018) Technische en economische analyse van langetermijnstrategieën voor peilbeheer in het IJsselmeergebied. Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied fase 3. Rapport RWS-WVL, april 2018.
- Spruyt, A. (2018) Inschatting stroomsnelheden en verval regelwerken. Deltares memo 11202191-002-ZWS-0003.
- Spruyt, A. en N. Asselman (2017) Afvoerverdeling Rijntakken: Eenvoudig regelbaar of niet? Deltares rapport 11200539-000-ZWS-0007.
- Spruyt, A. en N. Asselman (2018) Invloed open en dichte regelwerken op afvoerverdeling Rijntakken. Deltares memo 11202191-002-ZWS-0001.
- Stratelligence (2013) Kosteneffectiviteitsanalyse afvoerverdeling Rijn – Quickscan. Dit rapport is ook uitgebracht als gezamenlijk rapport van de Deltaprogramma's Zoetwater, Rijnmond-Drechtsteden, Zuidwestelijke Delta, IJsselmeergebied en Rivieren.
- Van den Biggelaar en Royal Haskoning (2008) Draaiboek en onderhoudsplan Regelwerk Hondsbroeksche Pleijj", ON-2148.
- Van der Meij, R., W. ter Horst, S. van Vuren, J. Pol, R. Koopmans, P. van der Scheer, O. Levelt, N. Asselman, P. de Grave & A. de Kruif (2016). Uitwerking methode voor bepaling kostenreductie rivierverruiming, kostenreductie dijkverbeteringen door uitvoering rivierverruiming. Deltares, HKV lijn in water en Rijkswaterstaat WVL.
- Van Staverden, J.H. (1983) Wrijving en Wrijvingscoëfficiënten. ONW-R-83068, RWS - Deltadienst, April 1983.
- Weiler, O.M (2018) Regelbare regelwerken: mogelijkheden om de afvoerverdeling te kunnen gaan sturen. Deltares memo 11202191-002-ZWS-0007.



## A Uitgangspunten kostenramingen OKADER

De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd bij de kostenramingen voor dijkversterking:

- De waterstanden in de referentiesituatie zijn berekend met het Deltamodel S10 (zichtjaren 2015, 2050W+ en 2100W+). Zo is de relatie tussen lokale waterstanden en Boven-Rijnafvoeren bij Lobith voor verschillende zichtjaren (2015, 2050 en 2100) afgeleid.
- De GRADE afvoerstatistiek is gebruikt (versie zomer 2015 voor OI2014-vs3).
- Voor het vaststellen van de toekomstige hydraulische belasting is het klimaatscenario W+ gebruikt, waarbij bij afvoeren boven de 18.000 m<sup>3</sup>/s wordt afgetopt.
- Er wordt rekening gehouden met een vaste onzekerheidstoeslag, welke gebaseerd is op de uit geïntegreerde onzekerheden van WBI2017. WBI2017 heeft de onzekerheidstoelagen uit geïntegreerd. Dat is gedaan per locatie en per afvoerniveau. In OKADER is er voor gekozen de onzekerheidstoelagen niet per locatie te laten verschillen maar hiervan per riviertak en per norm een gemiddelde waarde af te leiden. Voor vrijwel alle Rijntakken en alle normen komt dit neer op een toeslag van 20 cm. Alleen langs de IJssel hebben normtrajecten met een afkeurgrens van 1:1000 en 1:3000 een iets grotere onzekerheidstoeslag van 30 cm (zie Levelt et al., 2018).
- De sterkte van de dijk is bepaald op basis van gegevens uit VNK2 aangevuld met gedetailleerdere of recentere data beschikbaar bij de waterschappen. De faalkans wordt berekend voor de drie meest belangrijke faalmechanismen: overloop/overslag, piping en macrostabiliteit. Hierbij is zo goed mogelijk aangesloten op de nieuwste inzichten en rekenregels uit WBI2017. Deze rekenregels zijn ook gebruikt om de benodigde kruinverhoging te bepalen alsmede de benodigde versterking voor piping en macrostabiliteit.
- Voor het moment van versterking tot 2050 is aangesloten op de planning van de waterschappen.
- De geometrie van de dijk die ook in de eerdere Rijn-studies gebruikt is, wordt ook hier gebruikt als basis voor de dijkdimensies. Veelal zijn dit de dijkprofielen uit VNK2. Daarnaast is specifieke informatie verkregen van de waterschappen
- De bepaling van de faalkanseisen voor de doorsnedes/profielen gebeurt conform OI2014 (zoals begin 2016 beschikbaar). Voor het lengte-effect voor het faalmechanisme Overloop/Overslag wordt uitgegaan van N=1 (gelijk aan Bovenrivieren). Het aantal uitvoerpunten wordt niet verdicht, maar middels een interpolatieprocedure die in uitbreiding op OI2014\_vs3 ter toelichting aan WPM of andere gebruikers wordt beschreven, is uitvoer voor het HBN op elke locatie mogelijk (A. Smale, Deltares, december 2015). We maken gebruik van de vakindeling uit VNK2.
- Er wordt geen rekening gehouden met bewezen sterkte

Voor het faalmechanisme Overloop/Overslag zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Bij het berekenen van de totale dijkversterkingsopgave is uitgegaan van de standaard faalkansboekhouding. Dat betekent dat rekening is gehouden met 24% faalkansruimte voor het faalmechanisme Overloop/Overslag
- Fragility curves zijn afgeleid met Hydra-Zoet (semi-probabilistisch) versienummer OI2014\_vs3 en de Hydra-database van het Deltamodel (S10) (zichtjaar 2015).
- Er is een kritiek overslagdebiet van 5 l/m/s gehanteerd.

Voor het faalmechanisme Piping zijn in de eerste ronde MKBA de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Conform WTI/OI is de herziene regel van Sellmeijer gebruikt voor het berekenen van de opgave voor het faalmechanisme Piping. Toepassing van deze regel resulteert in omvangrijke pipingbermen. De pipingberm die volgt uit de toepassing van de herziene regel van Sellmeijer is per dijkvak afgekapt op basis van een maximale creepfactor. De creepfactor is de verhouding tussen de maximaal benodigde kwelweglengte (L) en het verval over de waterkering (verschil tussen binnen- en buitenwaterstand) ( $\Delta H$ ). De methode om de afkapwaarden te bepalen is uitgebreider beschreven in Van der Meij et al. (2016). Als maximale creepfactoren zijn de volgende waarden aangehouden:
  - Bovenrijn: 50  $\Delta H$ ;
  - Pannerdensch Kanaal: 40  $\Delta H$ ;
  - IJssel: 40  $\Delta H$ ;
  - Waal: 50  $\Delta H$ .
- Bij de uitwerking is uitgegaan dat het slootpeil gelijk is aan het maaiveld.
- De benodigde gegevens voor het faalmechanisme Piping komen uit VNK2 aangevuld met informatie vanuit de regio. Bij VNK2 gegevens is bij de constructie van de fragility-curves rekening gehouden met spreiding voor de D70 en KD-waarde conform WTI SOS.
- Bij het bepalen van de fragility curves voor piping is rekening gehouden met de aanwezige voorlanden. Zie ook Levelt et al. (2017).

Voor het faalmechanisme Macrostabieleit zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- De methodes Spencer en Lift-Van (ongedraineerd) zijn gebruikt om de opgave voor het faalmechanisme Macrostabieleit te bepalen. Er is daarbij gebruik gemaakt van dwarsdoorsnedes die op basis van de aanwezige ondergrond representatief zijn voor een grotere strekking langs de rivier. De selectie van de dwarsdoorsnedes en de inschatting van de bijbehorende ongedraineerde parameters is gedaan op basis van expert-judgement. Daarbij zijn deze zo gekozen dat deze in de huidige situatie semi-probabilistisch tot een reële opgave leiden.

De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd om de omvang van de dijkverbetering (versterking en verhoging) te bepalen:

- Uitgangspunt is dat de dijken voor een periode van 50 jaar worden verbeterd
- Dijken worden niet verbeterd voor het jaar 2025
- Dijken worden tot 2050 verbeterd conform de planning van de HWBP programmering en de waterschappen. Uit de methodiek kan blijken dat een dijkverbetering eerder of later nodig is dan het versterkingsjaar dat door de waterschappen is aangegeven. We houden desondanks vast aan de toegeleverde fasering. Mocht aangegeven worden dat een dijktraject tot 2050 niet verbeterd wordt, en dit wordt wel met de methodiek berekend, dan gaan we uit van geen verbetering tot 2050 (dit is bijvoorbeeld het geval voor dijktraject 49-1).
- De planning van de dijkverbeteringen van het HWBP en de waterschappen loopt tot 2050. Na 2050 gaan we uit van de dijkverbeteringsmomenten die uit de methodiek volgen.
- Alle dijken moeten in 2050 aan de norm voldoen
- We rekenen tot 2125. Dit betekent dat er gekeken wordt naar twee i.p.v. één versterkingsronde. Dit brengt een aantal 'problemen' met zich mee:
  - De kosten voor de tweede versterkingsronde zijn onzekerder.

- Voor die tweede versterking wordt dezelfde kostendatabase gebruikt als bij de eerste, terwijl de uitgangssituatie anders is (dijken zijn hoger en breder). Dit geeft waarschijnlijk een onderschatting van de kosten, omdat je bij de tweede versterking minder ruimte hebt.
- Daarnaast zal de levensduur van constructieve oplossingen in de praktijk langer zijn. In de tool wordt een constructieve maatregel voor piping na de ontwerp levensduur weer afgekeurd op piping, en is een nieuwe piping-maatregel nodig. Dit geeft waarschijnlijk een overschatting van de kosten.

Voor de kostenramingen zijn de volgende uitgangspunten relevant:

- Voor het berekenen van de dijkverbeteringskosten maakt de methodiek gebruik van het KOSWAT instrumentarium versie 2.3 (KOSTen voor versterken WATerkeringen) (Deltares, 2014).
- KOSWAT maakt gebruik van de Standaardsystematiek voor kostenramingen in de GWW (SSK-2010):
  - raming van **Benoemde Directe Bouwkosten** en **Benoemde Directe Vastgoedkosten** op basis van hoeveelheden in de berekende versterkingsmaatregelen en lengtes van de dijksectie waarop deze van toepassing zijn (bottom-up!)
  - eenheidsprijzenbestand ontwikkeld en onderhouden door RWS GPO
  - opslagfactoren voor berekening totale investeringskosten
- Uitgangspunten kostenbepaling dijkverbeteringen
  - aanpassing van bestaande keringen ('business as usual'): dijkverleggingen en andere (innovatieve) maatregeltypen zijn niet beschouwd
  - toepassing van grondmaatregelen op plaatsen waar voldoende ruimte beschikbaar is.
  - gebruik van constructieve maatregelen op plaatsen waar bebouwing, spoorwegen en grote waterlichamen in de weg liggen. Dit betekent dat bebouwing, spoorwegen e.d. NIET wordt gesloopt
  - wanneer de ruimte tussen twee constructieve delen minder dan 50 meter bedraagt wordt ook het tussenliggende deel constructief uitgevoerd
  - bestaande weginfrastructuur in invloedzone maatregel wordt vervangen. Wanneer een weg op de kruin aanwezig is, en de dijk hoeft niet verhoogd te worden, zal dit deel van de infrastructuur worden hersteld in plaats van vervangen.
  - versterking vindt plaats aan binnendijkse zijde.
  - meekoppelkansen zijn niet beschouwd
- Bij een berekende berm van 100 m of meer wordt in de berekeningen een constructieve oplossing gebruikt (zie opmerking Faalmechanisme Piping).
- Kostenramingen muren, damwanden en demontabele keringen
  - op basis van kostenkental
  - kostenkental verbeteringen 10 M€/km (bij verhoging van meer dan 25 cm)
  - bij beperkte verhoging (tot 25 cm) is niet hele bedrag in rekening gebracht, aangezien dan met beperkte aanpassingen kan worden volstaan
  - Uitgangspunt: verbeteringskosten lopen lineair op van 0 M€/km tot 10 M€/km bij verhoging van 0 tot 25 cm
- Geen kostenramingen aanpassingen van kunstwerken (sluizen, duikers, etc.), want
  - waterstands daling rivierverruiming zorgt hooguit voor verlengen levensduur: uitstel aanpassing
  - kosten aanpassing ongevoelig voor minder waterstandsstijging
- Bij de kostenramingen van de dijkverbeteringen is gewerkt met prijspeil 2013.





## B Uitgangspunten overstromingsrisicoberekeningen

Het overstromingsrisico wordt berekend als het product van de kans op een overstroming en de gevolgen in geval van overstromen. Het risico wordt uitgedrukt in miljoen euro per jaar.

### Overstromingskans

Het verloop van de overstromingskans in de tijd wordt berekend per normtraject. Dit gebeurt als volgt:

- De overstromingskans wordt berekend met het tool dat ook gebruikt is om de kosten voor dijkversterking te ramen (OKADER).
- Wanneer de initiële (huidige) overstromingskans groter is de kans berekend in VNK2, is uitgegaan van de VNK2-kans.
- De overstromingskans neemt toe in de tijd door klimaatverandering en kan afnemen door dijkverbetering. Dijkverbetering zorgt er voor dat de overstromingskans (fors) afneemt. De klimaatverandering zorgt voor een geleidelijke toename van de overstromingskans. Informatie over de ontwikkeling van de overstromingskans in de tijd door dijkverbeteringen en klimaatverandering is overgenomen uit het instrument dat gebruikt is voor het berekenen van de dijkverbeteringsopgave en de bijbehorende kosten (OKADER, zie vorige hoofdstuk).
- Voor normtrajecten waarbij de huidige (initiële) overstromingskans gelijk is gesteld aan de kans uit VNK2 is aangenomen dat de overstromingskans op dezelfde wijze verandert als door OKADER is berekend. Ofwel, wanneer de huidige kans berekend met OKADER gelijk is aan 1:50 per jaar en deze neemt door klimaatverandering toe tot 1:40 per jaar (toename van 20%) dan is aangenomen dat de huidige overstromingskans gelijk is aan die berekend bij VNK2 (stel 1:100 per jaar), en dat deze toeneemt tot 1:80 per jaar.
- Zodra de overstromingskans kleiner is dan de kans berekend door VNK2 wordt uitgegaan van de absolute overstromingskans zoals berekend door de kostenreductietool OKADER. Meestal is dit vanaf het moment dat de dijken in het normtraject versterkt zijn.
- Vlak na versterking zijn de overstromingskansen veel kleiner dan volgens de norm noodzakelijk is. Pas 50 jaar na versterken is de overstromingskans weer gelijk aan de maximaal toelaatbare overstromingskans zoals vastgelegd in de norm.

### Gevolgebepaling

De gevolgen zijn berekend conform de methode uit WV21. Deze set aan gevolgen vormden ook de basis voor de nieuwe beschermingsnormen die bepaald zijn door het Deltaprogramma Veiligheid (DPV). De volgende uitgangspunten zijn relevant:

- Voor de gevolgen van overstroming wordt gebruik gemaakt van de database die is opgesteld voor WV21 en DPV. Gebaseerd op de VNK2 overstromingssimulaties.
- Economische schade, aantallen slachtoffers en getroffen en zijn per potentiële breslocatie berekend (op basis van HIS-SSM, basisjaar 2000, bedragen excl. BTW).

- De schadebedragen gegenereerd door HIS-SSM zijn geïndexeerd om de inflatie en de toename van de reële schade tussen 2000 en 2011 in rekening te brengen. Deze indexering wordt uitgevoerd door de schadebedragen van HIS-SSM te vermenigvuldigen met factor 1,4 (zie Gauderis en Kind, 2011);
- Het bedrag van de schade wordt vermenigvuldigd met factor 1,5 om rekening te houden met schadeposten die niet of onvolledig in het schadebedrag van HIS-SSM begrepen zijn. De onderbouwing van de hoogte van de opslag is te vinden in Gauderis en Kind (2011);
- Bij deze opslagfactor wordt een risicopremie van 10% bijgeteld (d.w.z. de factor wordt verhoogd van 1,5 tot 1,6) om risicoaversie in rekening te brengen (zie Gauderis en Kind, 2011).
- Aantallen slachtoffers en getroffen zijn geïndexeerd met een factor 1,05 (gelijk aan de bevolkingstoename in die periode)
- Bij het berekenen van de slachtoffers is uitgegaan van 75% evacuatie. Alleen in dijkringen 10, 11, 15 en 16 is een lagere evacuatiefractie gehanteerd van 15%. Dit is conform de fracties zoals gehanteerd bij DPV.
- In de economische schade is ook rekening gehouden met slachtoffers en getroffen. Voor ieder slachtoffer is een bedrag van 6,7 miljoen euro in rekening gebracht. Per getroffen is 12.500 euro schade berekend.
- Per normtraject zijn overstromingssimulaties gebruikt voor 1 of meerdere potentiële doorbraaklocaties.
- Per potentiële doorbraaklocatie zijn de gevolgen van overstroming berekend in termen van economisch schade, slachtoffers en getroffen. De gevolgen zijn berekend bij toetspeil (de oude maatgevende afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s op de Rijntakken en 3.800 m<sup>3</sup>/s op de Maas) en bij afvoeren met een 10x groter en 10x kleinere kans van voorkomen. Tussen deze afvoeren in worden gevolgen bepaald door lineaire interpolatie.
- De schade neemt toe als gevolg van economische groei (1,5% per jaar).

Het verloop van het overstromingsrisico in de tijd is berekend door de kans en de gevolgen per jaar te combineren.

## C Aanpasbaarheid regelwerken tijdens hoogwater

### C.1 Inleiding

Zoals beschreven in hoofdstuk 2.1 worden de regelwerken ieder jaar, voor de start van het hoogwaterseizoen, ingesteld om de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling bij 16.000 m<sup>3</sup>/s te realiseren. De te gebruiken instelling wordt berekend met het meest actuele hydraulische model dat in de zomer voorafgaand aan het hoogwaterseizoen beschikbaar komt. Voor het hoogwaterseizoen van 2018/2019 is dit het waqua-rijn-j18\_5-v1 model.

Bij de Hondsbroeksche Pleij zijn meerpalen geplaatst zodat hier tijdens hoogwater een ponton aan kan meren om extra schotten te plaatsen of weg te nemen. Bij regelwerk Pannerden zijn geen voorzieningen om tijdens hoogwater schotten te plaatsen of te trekken. Omdat er nog geen ervaring is opgedaan met het plaatsen of trekken van schotten, is niet zeker of de instelling van de regelwerken aan te passen is tijdens hoogwater. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op deze vraag. Ook wordt beschreven hoe de sturing van de regelwerken in de modellen plaatsvindt en of dit aansluit bij de huidige praktijk en de huidige mogelijkheden. De bevindingen in dit hoofdstuk zijn ook vastgelegd in een apart memo (Weiler, 2018).

### C.2 Sturing regelwerken in de modellen

Spruyt en Asselman (2017) hebben een overzicht gegeven van de sturingsregels die in verschillende hydraulische modellen worden gebruikt. Het blijkt dat de sturing in verschillende modellen op verschillende wijze gebeurt. Een samenvattend overzicht van de sturing staat in Tabel C.1.

Sturing van het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij gebeurt in alle modellen dynamisch. Dit betekent dat de instelling tijdens het passeren van een afvoergolf kan worden gewijzigd, om zo goed mogelijk aan de gewenste verdeling te voldoen. Afhankelijk van de afvoer wordt het regelwerk in het model verder open of dicht gezet. Bij alle sturingsregels staat bij afvoeren lager dan 9.980 m<sup>3</sup>/s bij Lobith één schuif open (breedte van 5 m). Bij een verdere toename van de afvoer gaat ook deze schuif dicht. Bij afvoeren tussen de 9.990 m<sup>3</sup>/s en 16.015 m<sup>3</sup>/s bij Lobith is het regelwerk geheel gesloten om zoveel mogelijk water naar de Nederrijn te sturen. Maar bij nog hogere afvoeren gaat het regelwerk steeds verder open, om te voorkomen dat de afvoer op de Nederrijn boven maximaal 3.380 m<sup>3</sup>/s uitkomt.

De oude sturingsregels wijken enigszins af van deze nieuwe sturingsregels, omdat nog geen marge van 15 m<sup>3</sup>/s (vanwege schommelingen in de afvoer op de Boven-Rijn) werd toegepast. Hierdoor ging het regelwerk al bij afvoeren van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith open in plaats van bij 16.015 m<sup>3</sup>/s.

Het regelwerk Pannerden wordt in de modellen meestal vastgezet. Echter, afhankelijk van de door te rekenen afvoeren kunnen verschillende instellingen worden gebruikt. Bij een simulatie met een maximale afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s wordt een andere instelling gebruikt dan bij een berekening voor een maximale afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s.

Met 'vast' wordt hier dus bedoeld dat de instelling van het regelwerk tijdens een berekening niet verandert. Tussen verschillende berekeningen (voor verschillende rivierafvoeren) bestaan echter wel verschillen in instelling.

Tabel C.1 Samenvatting gebruikte instellingen in de modellen/projecten (bron: Spruyt en Asselman, 2017)

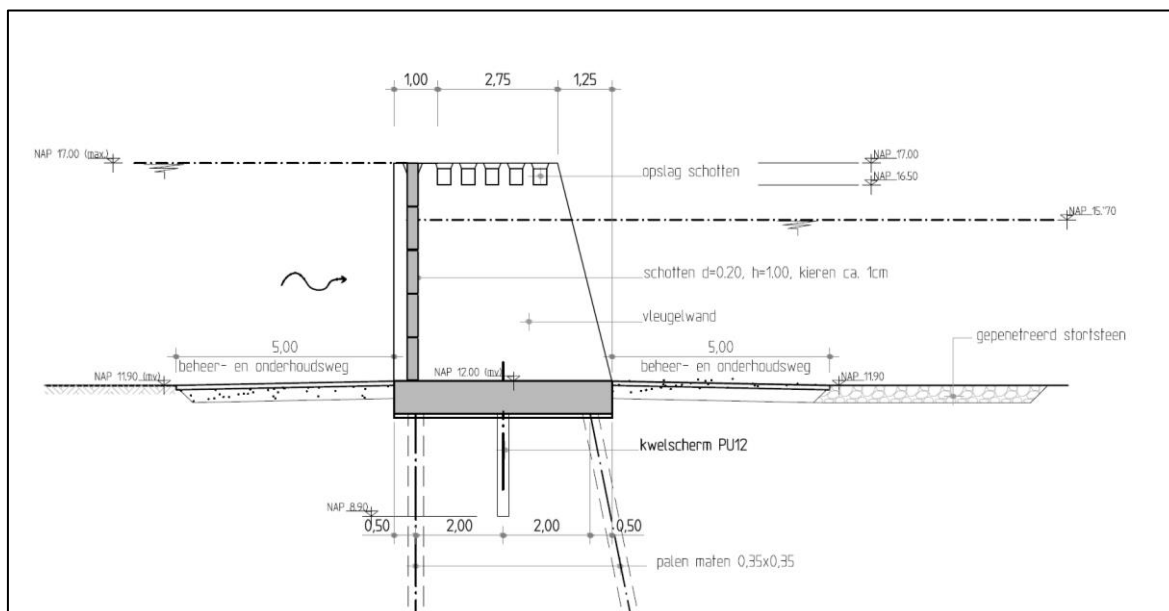
Model	Regelwerk Pannerden	Regelwerk Hondsbroeksche Pleij
Actueel (j16)	vast (BAV 16.000)	dynamisch (nieuw)
Vergunningen (beno15)	Q≤16.000: vast (BAV 16.000) Q=18.000: vast (GA 18.000)	dynamisch (nieuw)
Deltamodel (ref)	vast (BAV 16.000)	dynamisch (oud)
- VKS 2050	vast (GA 17.000)	dynamisch (oud)
- VKS 2100	vast (GA 18.000)	dynamisch (oud)
NWM	vast (BAV 16.000)	dynamisch (oud)
WBI2017	dynamisch (BAV 16.000)	dynamisch (nieuw)
OI	vast (BAV 16.000)	dynamisch (oud)
Pakkettoets 2016	vast (BAV 16.000)	dynamisch (PKB)

## C.3 Aanpasbaarheid van de huidige regelwerken

### C.3.1 Constructie van de huidige regelwerken

#### Regelwerk Pannerden

Figuur C.1 toont een doorsnede over de constructie Pannerden in geheel gesloten toestand.



Figuur C.1 Doorsnede regelwerk Pannerden (Bron: As-Built- tekening Royal Haskoning, bestand 9W7512A0-6804Doorsneden.pdf)

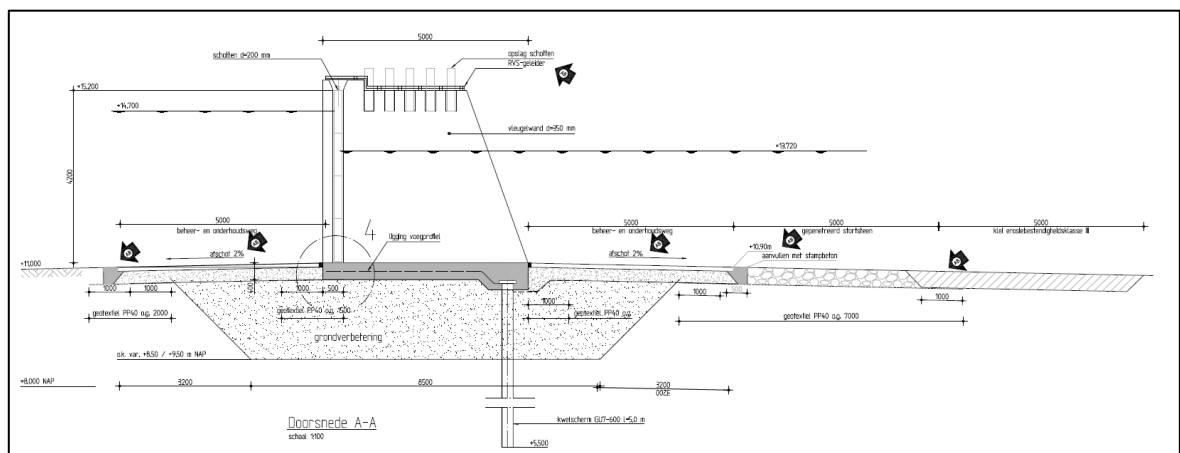
Uit deze en andere beschikbare tekeningen zijn de volgende essentiële kenmerken af te leiden:

- verticale positie van de kruin (gesloten): NAP +17.0 m,
- verticale positie van de drempel (open): NAP + 12,0 m
- pijlers ('vleugelwanden'): 0,5 m dik (breedte aangestroomd profiel), opening 5,0 m tussen de pijlers
- totale breedte ('overspanning'): 176.5 m (incl. wanden aan weerseinden), 32 schotten;
- schotten: 5 x 1.0 m hoog, 5,16 m breed (incl. breedte in de sponningen), 0,2 m dik
  - (volume is 1,0 m<sup>3</sup> per schot; gewicht ca. 2,4 ton)
- verticale positie schot in 'opslag': tussen NAP + 16,5 en +17,5 m

De schotten zijn op de einden voorzien van Hakorit-strips; dit beschermt het beton van zowel de schotten als van de pijlers en maakt het makkelijker (gladder) om de schotten tussen de pijlers te bewegen bij plaatsen of wegnemen.

### Regelwerk Hondsbroeksche Pleij

Het regelwerk Hondsbroeksche Pleij is zeer vergelijkbaar in aard van de constructie, maar wijkt af in een aantal afmetingen. Ook is er op de bovenrand van de vleugelwanden een geleideconstructie aangebracht waarmee een schot makkelijker kan worden verplaatst.



Figuur C.2 Doorsnede regelwerk Hondsbroeksche Pleij (Bron: As-Built- tekening Royal Haskoning, bestand 2321-100 AS BUILT.pdf)

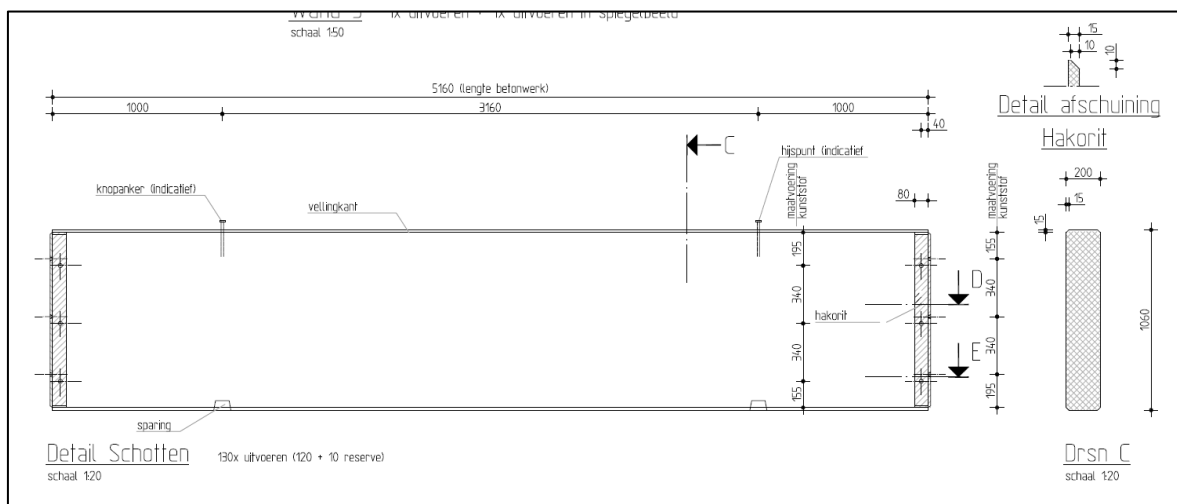
Voor Hondsbroeksche Pleij zijn de volgende essentiële kenmerken af te leiden:

- verticale positie van de kruin (gesloten): NAP +15.2 m,
- verticale positie van de drempel (open): NAP + 11,0 m
- pijlers ('vleugelwanden'): 0,35 m dik (breedte aangestroomd profiel), opening 5,0 m tussen de pijlers
- totale breedte ('overspanning'): 160.15 m (excl. wanden aan weerseinden), 30 schotten;
- schotten: 4 x 1.05 m hoog, 5,16 m breed (incl. breedte in de sponningen), 0,2 m dik
  - (volume is ca. 1,1 m<sup>3</sup> per schot; gewicht ca. 2,5 ton)
- verticale positie schot in 'opslag': tussen NAP + 15,7 en +14,7 m

Ook hier zijn de schotten op de einden voorzien van Hakorit-strips; dit beschermt het beton van zowel de schotten als van de pijlers en maakt het makkelijker (gladder) om de schotten tussen de pijlers te bewegen bij plaatsen of wegnemen.

### De schotten met hijspunten

De schotten zijn aan de bovenkant voorzien van zogenaamde knopankers die dienen als hijspunt; zie Figuur C.3 hieronder. Aan de onderkant van de balken zijn uitsparingen aangebracht voor als de schotten gestapeld zijn tussen de pijlers.



Figuur C.3 Afmetingen van de schotten Hondsbroeksche Pleij (Bron: As-Built- tekening Royal Haskoning, bestand 2321-101 as built.PDF)

### C.3.2 Hydraulische condities

De berekeningen met het WAQUA-model van de Rijntakken geven een indruk van de waterstanden boven- en benedenstrooms van het regelwerk, bij verschillende afvoeren bij Lobith. Resultaten van die berekeningen zijn in detail gerapporteerd door Spruyt (2018).

#### Pannerden

De condities rondom regelwerk Pannerden zijn weergegeven in onderstaande tabellen, overgenomen uit Spruyt (2018). In deze tabellen is H1 de waterstand bovenstrooms en H2 de waterstand benedenstrooms van het regelwerk. De resultaten beschrijven de uitkomsten van een aantal berekeningen, uitgevoerd met verschillende WAQUA-modellen:

- 1 Waqua-rijn-j16 5-v1 (j16): model dat zo goed mogelijk de situatie van het hoogwaterseizoen 2016/2017 representeert.
- 2 Waqua-rijn-j17 5-v1 (j17): model dat zo goed mogelijk de situatie van het hoogwaterseizoen 2017/2018 representeert.
- 3 Waqua-beno15 5-v2 met beleidsmatige sturing (beno15): beleidsmodel dat de situatie van 2015/2016 zo goed mogelijk representeert, maar waar ook alle goedgekeurde vergunnings- en planmaatregelen zijn opgenomen (inclusief vegetatielegger en stroomlijn).
- 4 Waqua-beno15 5-v2 met beide regelwerken dicht (beno15\_dicht): gelijk aan 3, maar waar allebei de regelwerken volledig dicht staan.
- 5 Waqua-beno15 5-v2 met beide regelwerken open (beno15\_open): gelijk aan 3, maar waar allebei de regelwerken volledig open staan.

De berekende waterstanden, stroomsnelheden en debieten voor regelwerk Pannerden zijn te zien in Tabel C.2.

Tabel C.2 *Debiet door en verval over regelwerk Pannerden voor verschillende afvoeren en modellen. Tussen haakjes staat de gebruikte drempelhoogte van het regelwerk (Bron: Spruyt, 2018).*

	J16 (12,45 m+NAP)					J17 (13,50 m+NAP)				
Lobith (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H1 (m+NAP)	H2 (m+NAP)	dH (m)	v (m/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H1 (m+NAP)	H2 (m+NAP)	dH (m)	v (m/s)
8000	14	13.29	13.29	0.00	0.1	13	13.98	13.63	0.35	-1.9
10000	518	14.56	14.40	0.16	1.6	490	15.51	14.94	0.57	2.7
12000	910	15.35	15.09	0.27	2.1	744	16.03	15.47	0.56	2.8
16000	1427	16.39	16.06	0.33	2.4	1230	16.96	16.44	0.52	2.6

	Beno15 (12,55 m+NAP)					Beno15_dicht (17m +NAP)				
Lobith (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H1 (m+NAP)	H2 (m+NAP)	dH (m)	v (m/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H1 (m+NAP)	H2 (m+NAP)	dH (m)	v (m/s)
8000	25	13.31	13.31	0.00	0.2					
10000	545	14.65	14.44	0.21	1.7	0	15.34	13.79	1.55	0.0
16000	1450	16.46	16.06	0.40	2.4	3	16.91	15.13	1.78	0.0
18000	83	17.32	15.68	1.64	0.1	87	17.33	15.84	1.49	0.1

	Beno15_open (12 m+NAP)				
Lobith (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H1 (m+NAP)	H2 (m+NAP)	dH (m)	v (m/s)
10000	535	14.55	14.41	0.14	1.3
16000	1527	16.40	16.04	0.36	2.3
18000	1777	16.86	16.48	0.38	2.4

De tabellen vermelden een aantal 'bijzondere' waterstanden, en daaruit volgen een paar aandachtspunten:

- Waterstanden boven de NAP + 16.5 m: dan is de waterstand (bovenstrooms) hoger dan de onderrand van de schotten 'in opslag'; dat zou tot problemen kunnen leiden door krachten op een schot in opslag of bij het oppakken van een schot; mogelijk moet de locatie van de opslag daarop worden aangepast.
- Waterstanden tot boven de kruin op NAP +17.0 m: dat impliceert dat het plaatsen van de schotten bemoeilijkt zal worden omdat de onderrand van het schot dan in het water zal hangen en in die positie de 'invoer' in de sleuven in de pijlers zal moeten vinden. Dit zal lastig werken; de geleiding zouden verhoogd kunnen worden tot boven de maximale waterstand.

In **Error! Reference source not found.** Tabel C.2 staan ook de getallen voor de te verwachten v ervallen (dH). Dit zijn waarden die oplopen tot van 1,5 tot 1,8 m als het regelwerk (bijna) helemaal dicht staat. Deze zijn bepalend voor de belasting op de platen.

### Hondsbroeksche Pleij

Op een vergelijkbare manier zijn de condities rondom regelwerk Hondsbroeksche Pleij weergegeven in onderstaande tabellen.

Tabel C.3 Debiet door en verval over regelwerk Hondsbroeksche Pleij voor verschillende afvoeren en modellen.

Tussen haakjes staat de gebruikte drempelhoogte van het regelwerk (Bron: Spruyt, 2018).

	J16					J17				
Lobith (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H1 (m+NAP)	H2 (m+NAP)	dH (m)	v (m/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H1 (m+NAP)	H2 (m+NAP)	dH (m)	v (m/s)
8000*	20.7	12.89	12.46	0.44	2.5	21.0	12.89	12.46	0.43	2.5
10000	0.0	13.55	13.01	0.54	0.0	0.0	13.53	13.00	0.53	0.0
12000	0.0	14.00	13.32	0.68	0.0	0.0	13.95	13.29	0.66	0.0
16000	0.0	14.82	13.84	0.98	0.0	0.0	14.80	13.83	0.97	0.0

	Beno15					Beno15 dicht (15,2 m +NAP)				
Lobith (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H1 (m+NAP)	H2 (m+NAP)	dH (m)	v (m/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H1 (m+NAP)	H2 (m+NAP)	dH (m)	v (m/s)
8000*	21.0	12.91	12.47	0.44	2.5					
10000	0.0	13.56	13.00	0.56	0.0	0.0	13.45	12.92	0.53	0.0
16000	0.0	14.87	13.86	1.01	0.0	0.0	14.60	13.68	0.92	0.0
18000	799**	14.71	14.46	0.26	2.5	0.0	15.07	14.00	1.07	0.0

Beno15 open (11 m+NAP)					
Lobith (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H1 (m+NAP)	H2 (m+NAP)	dH (m)	v (m/s)
10000	388	13.35	13.31	0.05	1.1
16000	855	14.45	14.39	0.06	1.7
18000	1033	14.81	14.75	0.07	1.8

\* 1 schot open (5 m breed), drempelhoogte = 11.0 m+NAP

\*\* alles open (150 m breed), drempelhoogte = 12.42 m+NAP

De vervallen zijn hier duidelijk kleiner dan bij Pannerden: max. ca. 1.1 m.

### C.3.3 De krachten op de schotten in stromend water

#### Horizontale belastingen door verval

Voor de gevonden vervallen kan de horizontale belasting worden geschat. Voor Pannerden:

$$F_{hor} = \rho \cdot g \cdot \Delta h \cdot H \cdot B \quad (A.1)$$

$$F_{hor} \approx 1000 \cdot 10 \cdot 1,8 \cdot 1,5 = \sim 90.000 \text{ N} = 90 \text{ kN}$$

Omdat hierbij het maximale verval wordt gehanteerd is dit een bovengrens voor de horizontale belasting. Bij het maximale verval voor Hondsbroeksche Pleij van 1,1 m en rekening houdend met een iets hoger schot wordt een belasting berekend van ca. 58 kN.

#### Verticale krachten

De verticale krachten zijn o.a. van belang om na te gaan of het schot op het eigen gewicht zal willen zakken tussen de pijlers. De situatie bij Pannerden is hiervoor maatgevend: door het grotere verval en omdat hier bij een toenemende afvoer schotten bijgeplaatst zouden moeten worden.



**Gewicht en onderstroming**

Eerder is al vastgesteld dat het volume van een schot (Pannerden) ca. 1 m<sup>3</sup> bedraagt. Voor gewapend beton is hiervoor het volgende gewicht te berekenen:

- gewicht in lucht: 2,4 ton => 23 kN
- gewicht in water: 1,4 ton => 13 kN

In het geval van een schot dat deels in het water hangt zal er ook een verticale kracht werken door de (hoge) stroomsnelheid langs de onderrand van het schot. Deze zal dan helpen bij het laten zakken van het schot tussen de pijlers. Bij overstort ontstaat aan de bovenzijde een gelijksoortige naar boven gerichte kracht. Deze krachten moeten t.z.t. nader worden afgeleid om tot een goede voorspelling te komen van de te verwachten krachten in verschillende situaties.

**Wrijving tussen schotten en pijlers**

Om de schotten op eigen gewicht te kunnen laten zakken, moet het eigen gewicht (in combinatie met de hydrodynamische krachten door onderstroming of overstort) groter zijn dan de wrijvingskracht tussen de schotten en de pijlers. Die wrijving wordt bepaald door de materialen die op elkaar gedrukt worden. Op dit moment wordt het Hakorit op de schotten tegen het beton van de pijlers gedrukt. Hiervan wordt een grote wrijving verwacht, hoewel lager dan de wrijving tussen beton en beton.

De wrijvingskracht laat zich eenvoudig inschatten op basis van een wrijvingscoëfficiënt: een getal dat de verhouding geeft tussen de normaalkracht (de kracht waarmee materialen worden samengedrukt) en de kracht die nodig is om de twee materialen langs elkaar te laten schuiven. Voor de wrijving tussen Hakorit en een aantal materialen zijn waarden van de wrijvingscoëfficiënt gevonden (Van Staverden, 1983):

- Hakorit op Hakorit: ca. 0,5
- Hakorit op staal: 0,25
- Hakorit op roestvaststaal 0,17

Voor Hakorit op beton is geen waarde gevonden: die zal ook afhangen van de afwerking van het beton (glad of ruw).

**C.3.4 Verdere informatie over de werkwijze bij de Hondsbroeksche Pleij**

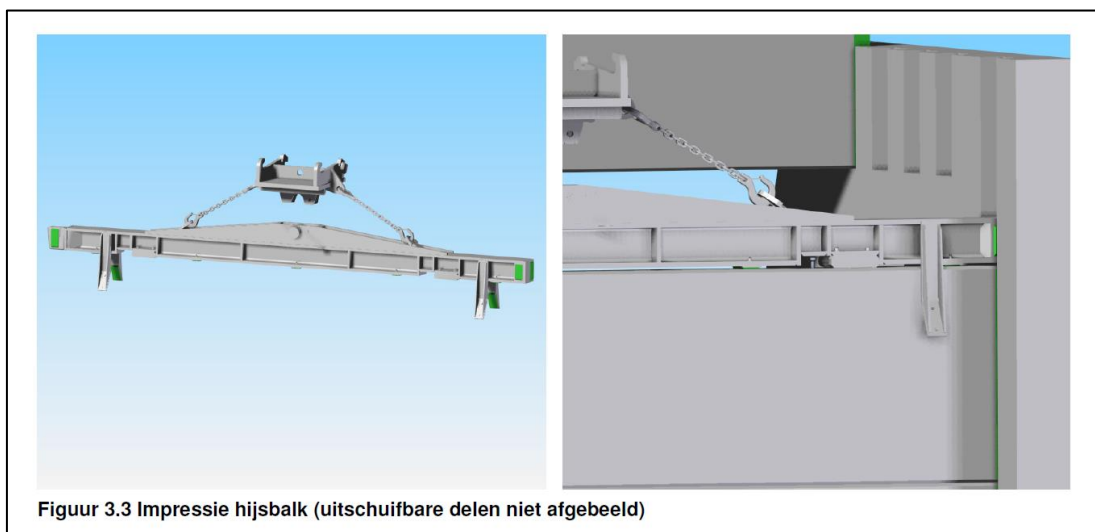
In Biggelaar & Royal Haskoning (2008) is een beschrijving opgenomen van de voorgenomen werkwijze voor het instellen van regelwerk Hondsbroeksche Pleij (in voorbereiding op het seizoen waarin hoge afvoeren te verwachten zijn). Beschreven wordt de werkwijze met een mobiele kraan en de inzet van een speciale hijsbalk.

De hijspunten op de schotten (knopankers) worden in Biggelaar & Royal Haskoning (2008) aangeduid als '7-tons'. Als dit betekent (te verifiëren) dat deze veilig kunnen worden belast tot 7 ton (ca. 70 kN) dan zullen deze waarschijnlijk sterk genoeg zijn om naast het gewicht van het schot ook de belasting door wrijving te kunnen opnemen (de som van eigen gewicht, hydrodynamische krachten en wrijvingskrachten, ofwel 24 kN + 58 kN + de hydrodynamische krachten, moet dan kleiner blijven dan 2 x ca. 70 kN = 140 kN)<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Bij het wegnemen van een schot bij regelwerk Pannerden zal de verticale kracht groter worden: de som van eigen gewicht, hydrodynamische krachten en wrijvingskrachten, ofwel 23 kN + 90 kN + de hydrodynamische krachten,

Voor de Hondsbroeksche Pleij is een hijswerktuig ontwikkeld waarmee de schotten, ook onder water, kunnen worden opgepakt: zie Biggelaar & Royal Haskoning (2008) en Figuur C.4. Het is niet bekend welke ervaring er is opgedaan met dit werktuig.

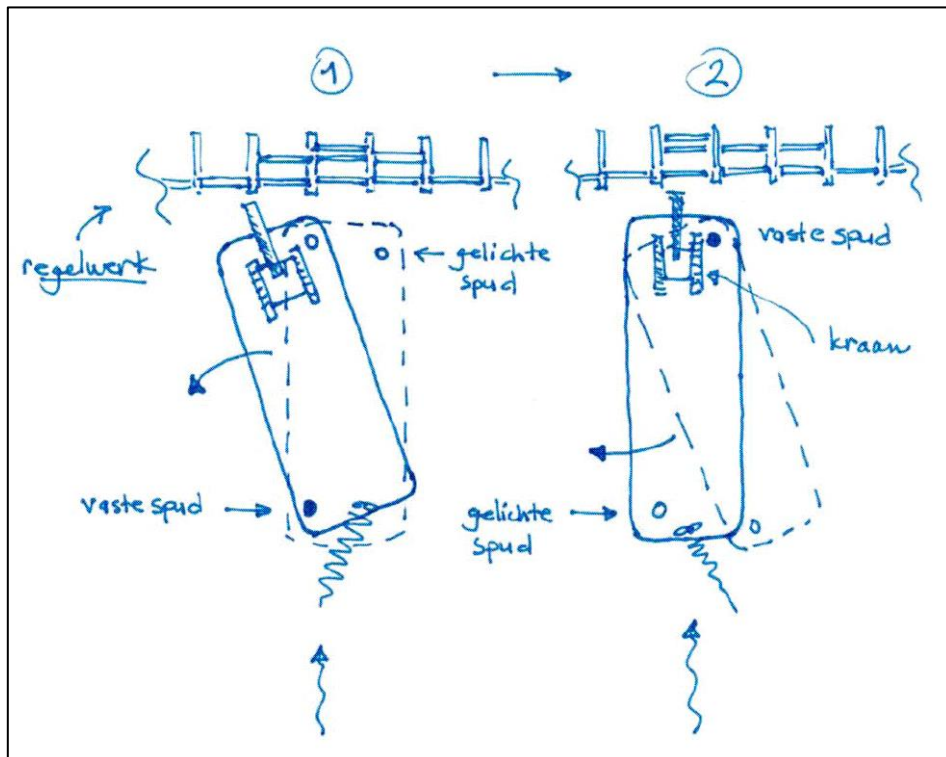
Ook wordt door Biggelaar & Royal Haskoning (2008) beschreven hoe de instelling van het regelwerk zou kunnen worden aangepast tijdens een hoogwater. Voorgesteld wordt om dit te doen met een ponton voorzien van spudpalen met daarop een mobiele kraan, uitgerust met deze hijsbalk. De werkwijze is afgebeeld in Figuur C.5.



Figuur C.4 Hijsbalk voor schotten, overgenomen uit Biggelaar en Royal Haskoning (2008)

---

moet dan kleiner blijven dan ca. 140 kN. Hier is de marge klein, en zullen alle getallen beter onderbouwd moeten worden om er zeker van te zijn dat het schot te trekken is.



Figuur C.5 Schets van werkwijze aanpassen instelling tijdens afvoergolf; overgenomen uit Biggelaar en Royal Haskoning (2008)

Het is niet bekend of dit voorstel ooit verder is ontwikkeld, getoetst en getest. Een relevante vraag is wat er zou kunnen gebeuren als er iets misgaat, en in hoeverre dit risico's met zich mee zou brengen voor de mensen die de werkzaamheden aan het uitvoeren zijn, voor de constructie, en wat de implicaties hiervan zouden kunnen zijn voor de hoogwaterveiligheid.

### C.3.5 Conclusie voor de huidige situatie

Als we voor de wrijvingscoëfficiënt een waarde 1 aanhouden als eerste ruwe schatting, volgt dat de wrijvingskracht gelijk wordt aan de horizontale belasting, en die is bij Pannerden met 90 kN aanzienlijk groter dan het eigen gewicht van 23 kN: het schot zal dus niet op het eigen gewicht in de sponningen willen zakken .

Bij Hondsbroeksche Pleij, bij het uitnemen van een schot, zal de kraan de som van eigen gewicht, hydrodynamische krachten en wrijvingskrachten moeten kunnen leveren. Dit komt dan op 23 kN + 58 kN + de hydrodynamische krachten. Dit is mogelijk als zowel de kraan (met het andere materieel) als de hijspunten op de betonnen platen sterk genoeg zijn. Dit lijkt in principe mogelijk, maar vraagt om een nadere uitwerking t.a.v. de hydrodynamische krachten, de sterkte van de hijspunten en de wrijving tussen Hakorit en het beton van de pijlers.

## C.4 Mogelijke aanpassingen aan de regelwerken

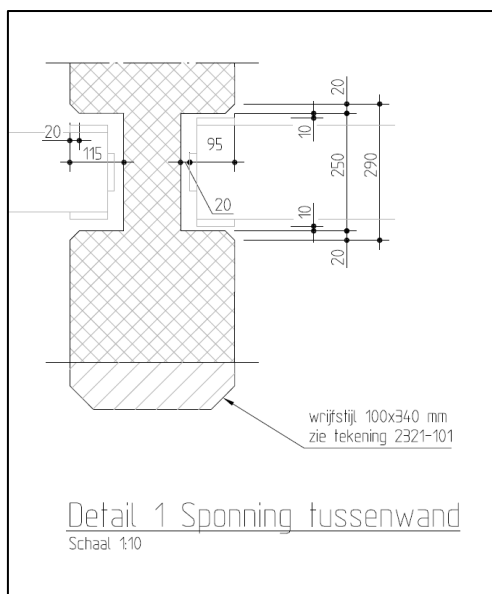
### C.4.1 Eenvoudige aanpassing aan regelwerk Pannerden

Indien de sponning in de pijlers zou worden bekleed met een ander materiaal, kan de wrijving kleiner worden gemaakt. (Voor de hiervoor benodigde ruimte: zie verderop.)

In Van Staverden (1983) worden een aantal wrijvingscoëfficiënten gegeven, o.a. voor het materiaal Hakorit in combinatie met andere materialen:

- Hakorit op Hakorit: ca. 0,5
- Hakorit op staal: 0,25
- Hakorit op roestvaststaal 0,17

Hieruit blijkt dat als de sponningen bekleed zouden worden met roestvrijstaal, met een wrijvingscoëfficiënt van ca. 0,17, de wrijvingskracht bij regelwerk Pannerden gelijk zou zijn aan  $0,17 \times 90 \text{ kN} = \text{ca. } 15 \text{ kN}$ . Dit is kleiner dan het gewicht van de betonnen plaat in lucht, maar mogelijk nog net te groot voor het gewicht in water. Afhankelijk van uitwerkingen in meer detail zou de situatie kunnen ontstaan dat de schotten toch niet op eigen gewicht willen zakken, maar naar beneden geduwd zouden moeten worden. De hiervoor te leveren kracht lijkt niet heel groot: duidelijk kleiner dan het gewicht van een plaat in lucht.



Het bekleden van de sponningen met roestvrijstaal (RVS) zou een belangrijke stap kunnen zijn in het regelbaar maken van de regelwerken. Echter, de huidige sponningen bieden hiervoor onvoldoende ruimte.

De figuur hiernaast (detail van tekening 2321-100 van Hondsbroeksche Pleij) geeft aan dat de speling tussen de Hakorit strips en het beton van de sponning slechts 2x10mm bedraagt in stroomrichting (zowel bovenstrooms als benedenstrooms) en 20 mm in dwarsrichting (in principe ook aan beide einden van een plaat).

Een mogelijke aanpassing zou zijn om de sponning te bekleden met een RVS U-profiel (buitenmaten 250 x 100 mm, plaatdikte ca. 5 mm), en de einden van de betonnen schotten daarop aan te passen, zodat die schotten (incl. de Hakorit strips) met voldoende speling in dat profiel zouden passen. Alternatief kan overwogen worden de sponning te verbreden, waarna er een ruimer RVS-profiel ingezet zou kunnen worden.

### C.4.2 Voorstel voor een verbeterde installatie

In het bovenstaande is vastgesteld dat de wrijvingskracht op de schotten in de sponningen, in ieder geval bij regelwerk Pannerden, te groot is om, tijdens een afvoergolf, de schotten op eigen gewicht te kunnen laten zakken. Het aanpassen van de instelling van regelwerk Pannerden tijdens hoogwater is op dit moment dus niet mogelijk.

Het verhogen van de geleidingen bij Pannerden (om een schot te kunnen plaatsen bij een zeer hoge waterstand) en het aanbrengen van RVS-profielen om de wrijvingsweerstand te verminderen vergroot de kans op het kunnen trekken en plaatsen van schotten tijdens hoogwater.

Een essentieel element in de betrouwbaarheid van het bij kunnen sturen van het regelwerk is het zekerstellen dat de schotten zuiver verticaal zullen bewegen, zodat ze niet klem komen te zitten in de sponningen. In de nu voorgestelde werkwijze betekent dit dat het ponton geen slagzij mag maken; iets wat onder de condities met (snel) stromend water gemakkelijk zou kunnen optreden.

Vanuit het oogpunt van betrouwbaarheid (faalkansen) en veiligheid (arbo) wordt hieronder een ander type installatie voorgesteld.

Gedacht wordt aan een configuratie die gaat lijken op een Poirée-stuw in de Maas: de onderstaande link verwijst naar een video-opname van het strijken van de stuw bij Linne tijdens de hoge afvoer januari 2018.

<https://youtu.be/QNAjT3bb0co>



Om deze configuratie te bereiken moet er een kraanbaan worden aangelegd over alle pijlers heen, met een rail aan de bovenstroomse kant van de sponning en de andere rail aan de benedenstroomse kant van de opslagruimte. De kraanbaan moet hoger liggen dan de maximaal te verwachten waterstand, dus hoger dan de pijlers. De overspanning tussen de pijlers is met 5 m zeer beperkt. Over de kraanbaan rijdt een (bemande) kraan die de schotten in de sponning kan plaatsen en kan wegnemen. De kraan kan zodanig worden ingericht dat de verticale beweging in beide ophangpunten steeds exact gelijk is, waardoor klemlopen van een schot tussen de sponningen wordt voorkomen. De kraan moet ook de verplaatsing regelen van de schotten van en naar de opslag-positie. De hijsbalk zoals beschreven in Biggelaar & Royal Haskoning (2008) zou onderdeel kunnen uitmaken van de installatie.

De afdracht van de verticale krachten (gewicht van de schotten + de wrijving bij het optillen van een schot + hydrodynamische krachten) zal verlopen via de wielen van de kraan naar de rails, en als de wielen daarbij boven de pijlers staan is er geen zware ondersteuning nodig van de kraanbaan: tussen de pijlers hoeft de kraanbaan alleen het gewicht van de kraan zelf te dragen. Uiteraard moeten de pijlers en de fundering wel het gewicht van de kraanbaan en de kraan kunnen dragen.

Als de kraan niet in gebruik is kan deze worden gestald in een afgeschermd ruimte aan een van beide oevers: de kraan is dan uit het zicht en het gebouw kan worden ingepast in het landschap. De kraan staat dan beschermt tegen het weer, en in dat gebouw zou ook onderhoud gepleegd kunnen worden.

De te leveren verticale krachten volgen uit de beschouwingen hierboven. Voor het laten zakken van een schot kan gekozen worden voor een verzwaarde uitvoering van de hijsbalk, zodat het gewicht daarvan meehelpt het schot te laten zakken.

## C.5 Nabeschouwing en conclusies

Allereerst is nagegaan hoe de aansturing van de regelwerken is meegenomen in de verschillende WAQUA-modellen. Het blijkt dat bij het regelwerk bij de Hondbroeksche Pleij doorgaans wordt aangenomen dat dit regelwerk dynamisch regelbaar is tijdens een hoogwater. Voor regelwerk Pannerden wordt tijdens een het doorrekenen van een hoogwater uitgegaan van een vaste instelling. Deze instelling is echter wel afhankelijk van de hoogte van de door te rekenen afvoerpiek. Dit vergt ook een beperkte mate van bijsturing tijdens hoogwater (de regelwerken staan nu immers ingesteld op een afvoerpiek van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith).

Vervolgens zijn twee vragen behandeld over de regelbaarheid van de regelwerken:

- 1 Is het in de huidige situatie mogelijk om tijdens een hoogwater de instelling van de regelwerken te veranderen?
- 2 Zo nee, wat voor soort aanpassingen zijn dan nodig en denkbaar om dit wel te kunnen doen?

### Huidige situatie

In het antwoord op de eerste vraag wordt onderscheid gemaakt tussen de twee locaties, te weten Hondbroeksche Pleij en Pannerden, en tussen het plaatsen en wegnemen van schotten.

Het plaatsen van schotten lijkt niet mogelijk: als gevolg van de vervalbelasting op de schotten is de wrijvingskracht op de schotten in de sponningen groter dan het eigen gewicht, waardoor de schotten niet zullen zakken. Dit geldt voor beide locaties. Bovendien geldt bij Pannerden dat de waterstand hoger zou kunnen worden dan de bovenkant van de sponning, waardoor, bij het plaatsen van een schot, de onderrand van het schot het water zou raken voordat het schot door de sponning op zijn plaats gehouden wordt.

Bij een toenemende afvoer (van 16.000 m<sup>3</sup>/s naar 18.000 m<sup>3</sup>/s) zouden er bij Hondbroeksche Pleij schotten moeten worden weggenomen. Wat betreft de verticale krachten lijkt dit mogelijk. Een werkwijze hiervoor is voorgesteld door de aannemer (zie Biggelaar & Royal Haskoning, 2008). Of dit ook nader is uitgewerkt, getoetst en getest is niet bekend. Bij eerste beschouwing lijkt het dat er kanttekeningen te plaatsen zijn over betrouwbaarheid (kan een schot scheef komen te hangen doordat het ponton niet horizontaal blijft liggen, etc.) en veiligheid.

Voor het wegnemen van schotten bij Pannerden zouden de verticale krachten nader moeten worden bepaald: het is nu ongewis of de hijspunten aan de schotten sterk genoeg zijn.

### **Mogelijke aanpassingen**

Om zowel het plaatsen als het wegnemen van schotten mogelijk te maken op de beide locaties zijn een aantal mogelijke aanpassingen geïdentificeerd. Deze aanpassingen zijn relatief beperkt van aard en omvang: de vaste delen (pijlers etc.) van de constructie kunnen blijven staan, en blijven hun functie behouden. Daarmee blijft de waarde van reeds gedane investering behouden.

De in dit hoofdstuk gesuggereerde aanpassingen zijn de volgende:

- Om een schot te kunnen plaatsen bij een extreem hoge waterstand zou de geleiding (invoer naar de sponning) voldoende ver boven de maximale waterstand moeten reiken, en dat betekent dat deze moet worden verlengd.
- Eventueel moet de opslag-positie van de schotten worden aangepast om deze op voldoende hoogte te brengen; dit vraagt nadere beschouwing van de hydraulische condities.
- Om een schot op het eigen gewicht te kunnen laten zakken moet de wrijving tussen het schot en de sponning worden beperkt. Een mogelijkheid hiertoe is het bekleden van de sponning met een roestvrijstalen U-profiel. Om voldoende speling te houden tussen het schot en de sponning zouden de einden van de schotten (en/of de Hakorit-strips) dunner moeten worden gemaakt, of de sponning moet worden verbreed.
- Over de pijlers heen zou een kraanbaan aangebracht kunnen worden die de schotten op een veilige en betrouwbare manier zou kunnen uitnemen uit de sponning en plaatsen in de opslag, of zou kunnen oppakken uit de opslag, en plaatsen in de sponningen. De constructie en de werkwijze lijkt op de bediening van een Poirée-stuw zoals aanwezig in de Maas.

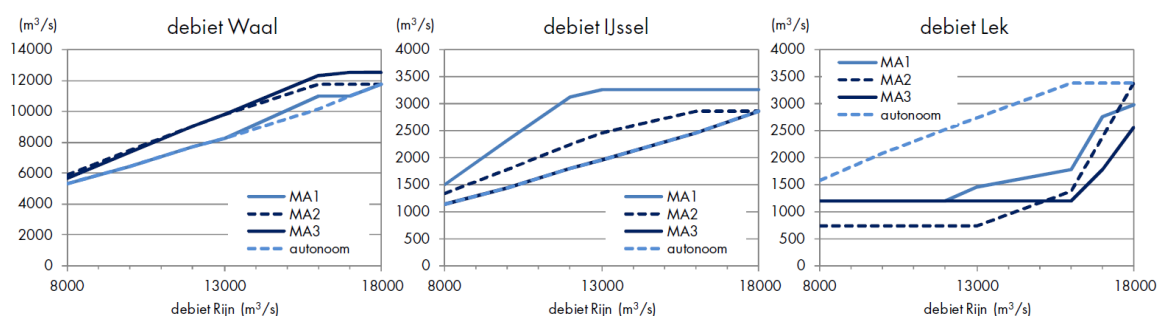




## D Gebruikte informatie voor effectbepaling Rijn-Maasmonding en IJsselmeer

### D.1 Rijn-Maasmonding

Stratelligence (2013) heeft gekeken naar veranderingen in de afvoerverdeling bij zeer hoge afvoeren en bij middelhoge afvoeren te Lobith. Bij zeer hoge afvoeren is een variant onderzocht waarbij alle extra afvoer boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith via de Waal zou worden afgevoerd (HW Waal). Bij de overige onderzochte varianten is de Nederrijn-Lek bij middelhoge afvoeren te Lobith ontzien (MA1 t/m MA3). Het effect hiervan op de debieten door de verschillende Rijntakken is te zien in Figuur D.1. In alle varianten gaat er veel minder afvoer door de Nederrijn-Lek. Bij de variant MA3 blijft de afvoer op de IJssel gelijk, bij de andere varianten neemt de afvoer op de IJssel toe. Op de Waal neemt de afvoer bij alle varianten toe. Bij MA1 speelt de toename pas bij 13.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith, terwijl dit bij MA2 en MA3 al bij veel lagere afvoeren het geval is (circa 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith).



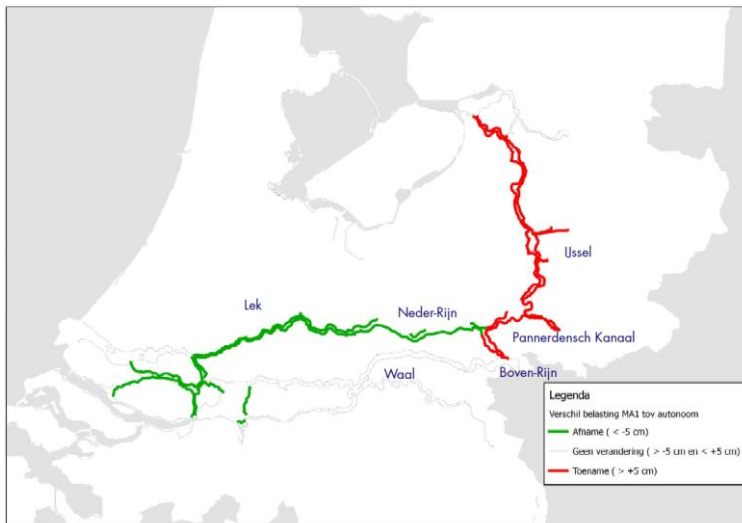
Figuur D.1 Afvoerverdeling middenrange zoals verkend in de KEA Afvoerverdeling Rijntakken (Stratelligence, 2013)

Samengevat komt het er op neer dat de onderzochte varianten de volgende effecten hebben op de hoeveelheid water die wordt afgevoerd naar de Rijn-Maasmonding en de IJsseldelta (zie Tabel D.1).

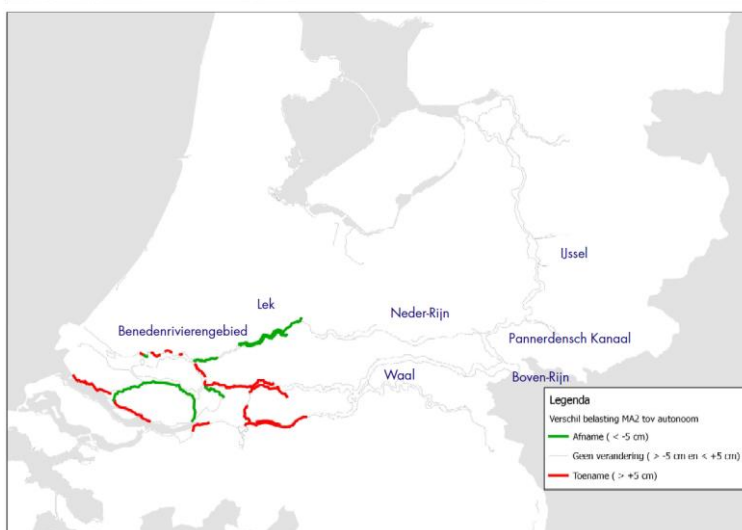
Tabel D.1 Effect afvoerverdelingsvarianten zoals onderzocht in het kader van de KEA Afvoerverdeling Rijntakken (Stratelligence, 2013) op de afvoer naar de Rijn-Maasmonding

Afvoer te Lobith (m <sup>3</sup> /s)	Toename afvoer (m <sup>3</sup> /s) per variant			
	WH Waal	MA1	MA2	MA3
8.000	0	-372	-205	0
10.000	0	-877	-332	0
12.000	0	-1324	-444	0
13.000	0	-1291	-499	0
16.000	0	-800	-407	0
17.000	195	-605	-212	0
18.000	407	-393	0	0

Bij HW Waal komt bij zeer hoge afvoeren te Lobith meer water in de Rijn-Maasmonding terecht, maar dit leidt daar niet tot hogere hydraulische belastingen en ook niet tot hogere kosten voor dijkversterking<sup>9</sup>. De reden daarvoor is dat de invloed van storm op zee en het sluitingsregime van de stormvloedkeringen hier doorslaggevend zijn voor de dijkversterkingsopgave. Daaruit kan geconcludeerd worden dat een wijziging in de afvoerverdeling bij zeer hoge afvoeren geen groot effect heeft op de hydraulische belastingen in de Rijn-Maasmonding.

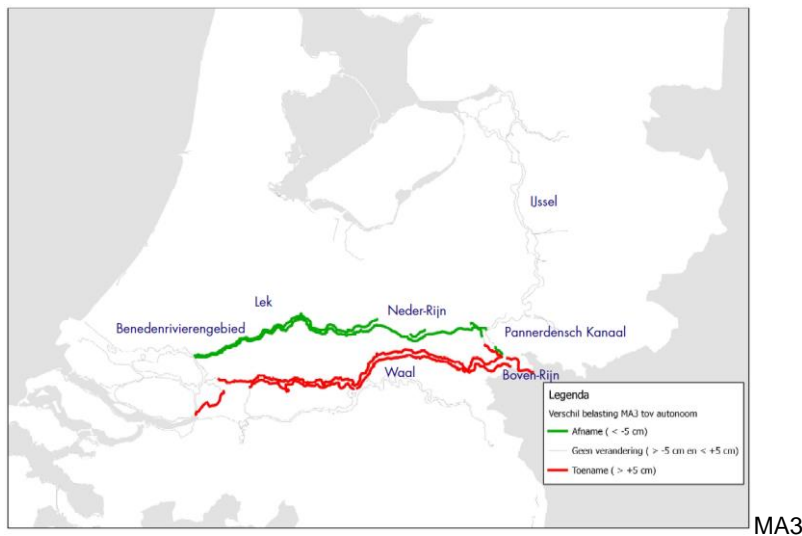


MA1



MA2

<sup>9</sup> De kosten voor dijkversterking zijn een minder goede indicatie omdat de KEA vooral uitging van een hoogteopgave. Sterkteproblemen (piping en macrostabiliteit) waren minder goed in beeld. Veranderingen in kosten voor dijkversterking zoals bepaald tijdens de KEA zijn nu niet meer bruikbaar.



*Figuur D.2 Effect van de afvoerdeling middenrange zoals verkend in de KEA Afvoerdeling Rijntakken (Stratelligence, 2013) op de belastingen langs de Rijntakken en in het gebied van de Rijn-Maasmondig. Rode lijnen duiden op een verhoging met meer dan 5 cm. Groene lijnen duiden op een verlaging van meer dan 5 cm. Dijktrajecten zonder kleurtje ondervinden een verandering in belastingen van minder dan 5 cm.*

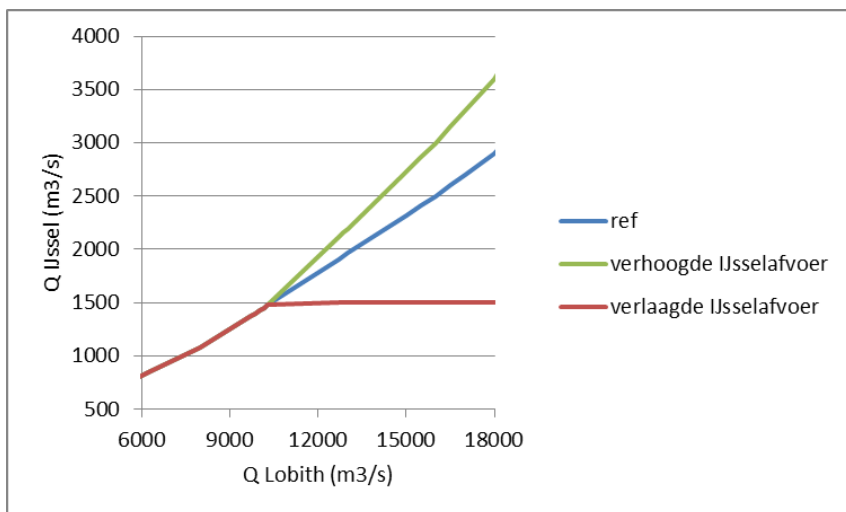
Figuur D.2 toont de veranderingen in belastingen zoals deze bepaald zijn voor de KEA afvoerdelingen. MA1 leidt tot een forse afname van de afvoer naar de Rijn-Maasmondig, vooral bij middelhoge afvoeren. Dit heeft een gunstig effect op de belastingen in de Rijn-Maasmondig. Bij MA2 neemt de totale aanvoer iets af, maar doordat sprake is van een afname op de Lek en een toename op de Waal wisselen de effecten in de Rijnmaasmondig per tak. Er zijn takken waar sprake is van een verlaging van de waterstanden, maar er zijn ook takken waar sprake is van zwaardere belasting. Bij MA3 blijft de totale aanvoer naar de Rijn-Maasmondig gelijk. Wel is sprake van een andere verdeling over Lek en Waal. De belastingen in het benedenrivierengebied blijven redelijk gelijk.

## D.2 IJsselmeer

Voor het effect op het IJsselmeer is gebruik gemaakt van de berekeningen die in 2017 en 2018 zijn uitgevoerd in het kader van de Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer (ISWP) IJsselmeergebied (De Grave et al, 2017b; Rimmelzwaal et al., 2018; Kuijper, 2018). Onderstaande tekst geeft een korte samenvatting van de in deze studie gebruikte resultaten.

In 2017 zijn kosten voor dijkversterking geraamd bij verschillende meerpijlstrategieën. De volgende strategie is hier als referentie gebruikt: het huidige winterpeil wordt gehandhaafd, de spuicapaciteit bedraagt 100% en er wordt zoveel gepompt dat de 1:10 piekwaterstanden gelijk blijven. In de genoemde rapporten is dit strategie 1c met 100% spuicapaciteit.

In 2018 zijn de berekeningen herhaald, maar dan onder meer met een hogere en een lagere IJsselaafvoer. De veranderingen in de IJsselaafvoer zijn te zien in Figuur 7.1. Hierbij wordt opgemerkt dat de veranderingen zijn aangegeven ten opzichte van de referentie zoals die in deze studie is gebruikt. Door deze aanvullende berekeningen te vergelijken met de berekeningen uit 2017 is een beeld verkregen van het effect op de waterstanden op het IJsselmeer. Dit is samengevat in Tabel D.2.



Figuur 7.1 Indicatie van de verandering in IJsselafvoer zoals toegepast in de berekeningen van Kuijper (2018)

Tabel D.2 Waterstanden op het IJsselmeer (in m+NAP) bij verschillende overschrijdingskansen bij verschillende IJsselafvoeren.

Strategie	Overschrijdingskans		
	1:10	1:1.000	1:100.000
referentie (1C, 100% spui ,huidige IJsselafvoer)	0,45	1,1	1,5
hogere IJsselafvoer	0,45	1,25	1,7
lagere IJsselafvoer	0,45	0,85	1,2

Tabel D.2 laat zien dat de 1:1.000 waterstand met ongeveer 0,15 m toeneemt wanneer de IJsselafvoer aanzienlijk hoger wordt (zie Figuur 7.1). De 1:100.000 waterstand neemt met ongeveer 0,2 m toe. Omgekeerd leidt een lagere IJsselafvoer tot lagere piekwaterstanden op het IJsselmeer. De 1:1.000 waterstand wordt 0,25 m lager en de 1:100.000 waterstand wordt 0,3 m lager.

Voor de referentieberekening (1C, 100% spui, huidige IJsselafvoer) zijn kosten voor dijkversterking bepaald (Tabel D.3). De nominale kosten tot 2175 zijn geraamd op 4,5 miljard euro. De contant gemaakte kosten bedragen 2,5 miljard euro. Voor de varianten met een hogere of een lagere IJsselafvoer zijn geen dijkversterkingskosten geraamd. Er is echter wel een variant berekend die qua verandering in meerpeilstatistiek (waterstanden met overschrijdingskans van 1:10 of kleiner) lijkt op de variant met hogere IJsselafvoer (variant 1b met 100% spui en huidige IJsselafvoer). De nominale kosten voor dijkversterking voor deze variant bedragen 6,3 miljard euro (toename 1,8 miljard euro). De contant gemaakte kosten bedragen bijna 3 miljard euro (toename van 0,5 miljard euro). Er is geen variant doorgerekend waarvan de meerpeilstatistiek lijkt op de variant met de lagere IJsselafvoer. Als we aannemen dat een 0,2 m lagere piekwaterstand evenveel verschil maakt in dijkversterkingskosten als een 0,2 m hogere waterstand, dan leidt de variant met een lagere IJsselafvoer tot een nominale kostenbesparing van ongeveer 2 miljard euro (contante waarde meer dan 0,5 miljard).

Tabel D.3 Geschatte investeringskosten voor dijkversterking tot 2175 (miljard euro)

	Referentie (1C, 100% )spui	hogere IJsselafvoer*	lagere IJsselafvoer**
nominaal	4.5	6.3	
CW	2.5	3	2?

\* gebaseerd op variant 1b met 100% spui (deze variant levert vergelijkbare waterstandstatistieken op)

\*\* er is geen variant uit 2017 die dezelfde waterstandstatistieken oplevert. Dit betreft een zeer grove schatting

Bij de berekeningen voor het ISWP is ook gekeken naar de benodigde pompcapaciteit om de 1:10 waterstand te handhaven. Bij de referentieberekening neemt de benodigde capaciteit toe van 1.100 m<sup>3</sup>/s in 2075 tot 2100 m<sup>3</sup>/s in 2175 (zie Tabel D.4). Bij de variant met een hogere IJsselafvoer bedraagt de benodigde capaciteit respectievelijk 1.200 en 2.300 m<sup>3</sup>/s. Omgekeerd neemt de benodigde pompcapaciteit bij een lagere IJsselafvoer af tot 1.000 m<sup>3</sup>/s in 2075 en 1.900 m<sup>3</sup>/s in 2175.

Tabel D.4 Benodigde pompcapaciteit (m<sup>3</sup>/s) per variant

	<b>Referentie (1C, 100% spui)</b>	<b>hogere IJsselafvoer</b>	<b>lagere IJsselafvoer</b>
2075	1100	1200	1000
2175	2100	2300	1900