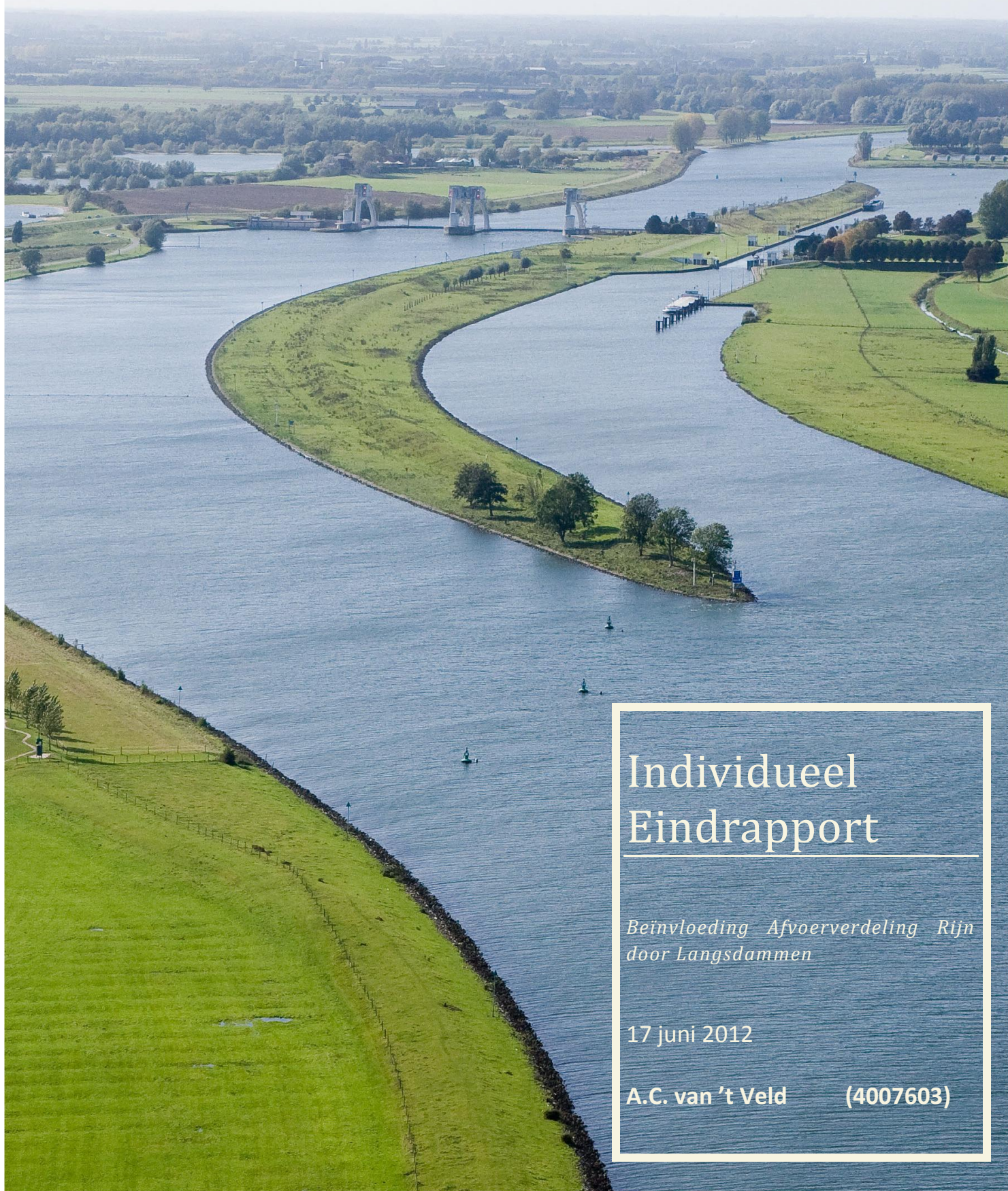


Beïnvloeding Afvoerverdeling Rijn



Individueel Eindrapport

*Beïnvloeding Afvoerverdeling Rijn
door Langsdammen*

17 juni 2012

A.C. van 't Veld (4007603)

Individueel Eindrapport

Beïnvloeding Afvoerverdeling Rijn door Langsdammen

CT3000-09 Bachelor Eindwerk

17 juni 2012

Technische Universiteit Delft

Begeleiders

Ir. T. Rijcken

Ir. T. de Haan

Student

A.C. van 't Veld

(4007603)

Voorwoord

In september 2009 ben ik gestart met de opleiding Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Deze keuze was toen gebaseerd op het onderdeel ontwerpen dat mij aansprak, terwijl er niet teveel creativiteit werd gevraagd, zoals bij bouwkunde en omdat grotere projecten, zoals de Kustverdediging van Katwijk en de Zandmotor (profielwerkstuk VWO), mij erg boeiden. Nu, ruim 2,5 jaar later, heb ik absoluut geen spijt van de keuze die ik toen gemaakt heb en mag ik mijn Bachelor, net als het VWO met het profielwerkstuk, naar tevredenheid afronden met dit eindwerk.

In de laatste jaren heb ik veel geleerd op allerlei vlakken van de Civiele Techniek, maar bovenal merk ik dat je steeds systematischer leert denken. Het oplossingsvermogen wordt groter, waardoor het begrijpen van groter problemen steeds makkelijker wordt. Het thema van dit bachelor eindwerk, zoals is beschreven in de Voorstudie, is een dergelijk probleem van grote orde.

Zonder hulp van anderen was dit bachelor eindwerk niet tot stand gekomen, bij dezen bedank ik hen hier dan ook voor. Speciale dank ben ik verschuldigd aan mijn twee begeleiders, Ties Rijcken en Tjalle de Haan. Ties Rijcken wil ik speciaal bedanken voor zijn enthousiasme, creativiteit en gemoedelijke rol als begeleider. Tjalle de Haan wil ik speciaal bedanken voor zijn grote kennis over Nederland, nauwkeurige reviews en eveneens zijn gemoedelijke rol als begeleider. Daarnaast wil ik Peter Jules van Overloop bedanken voor zijn hulp bij het model SOBEK. Verder wil ik Pepijn van Denderen, Sharon van Geffen en Pim van Steijn bedanken voor de samenwerking tijdens de voorstudie, maar ook in het traject van ons individuele rapport. Ook wil ik mijn vader bedanken voor het meedenken en de nauwkeurige reviews. Ten slotte wil ik alle andere familie en vrienden uit Rijnsburg bedanken voor hun onvoorwaardelijke steun en geduld tijdens dit eindwerk, aangezien mijn tijd voor hen erg beperkt is geweest.

Arnold van 't Veld

Rijnsburg, juni 2012

Samenvatting

Het doel van dit rapport is als volgt:

“Het realiseerbare regelbereik van langsdammen in de Waal bepalen, waarbij een zo groot mogelijke bijdrage aan de gewenste verandering in de afvoerdeling bij de Pannerdensche Kop in de scenario's Piekafvoer en Hoge afvoer & storm wordt behaald, zonder dat dit resulteert in negatieve gevolgen bij de laagwaterscenario's.”

Een langsdam is een in de stroomrichting van de rivier geplaatste dam die de hoofdvaargeul scheidt van een oevergeul. Deze langsdammen worden, net als bij kribben, geplaatst om de vaarweg op zijn plaats te houden en om de vaarweg te versmallen bij laagwater, zodat de beperkingen op de maximale vaardiepte worden beperkt. Verder heeft een langsdam, in tegenstelling tot kribben, als gevolg dat de weerstand wordt verlaagd en het stroomvoerend oppervlak (het gedeelte van de rivier dat water afvoert) wordt vergroot en daardoor wordt de waterstand verlaagd.

Aan de hand van het model SOBEK is bepaald wat het maximale regelbereik van deze langsdammen is bij een toepassingslengte van 0 tot 45 km. Dit is weergegeven in tabel 1.1. In het scenario Hoge afvoer & storm wordt het gewenste regelbereik van 1.128 m³/s niet gehaald, terwijl in het scenario Piekafvoer wel wordt voldaan aan het gewenste regelbereik van 282 m³/s. Dit gaat gepaard met een waterstandsval bij de Pannerdensche Kop van 19 cm in het scenario Hoge afvoer & storm en van 24 cm in het scenario Piekafvoer. Gevolg van deze maatregel is wel dat een waterstandsverhoging na 45 km bij Tiel optreedt van 14 cm respectievelijk 16 cm optreedt in het scenario Hoge afvoer & storm respectievelijk Piekafvoer. Verder is er geconstateerd dat de maatregel Langsdammen geen negatieve gevolgen heeft voor de laagwaterscenario's.

Tabel 1.1 – Maximaal regelbereik per maatregel met een toepassingslengte van 0 tot 45 km

Scenario	Hoge afvoer & storm			Piekafvoer		
Verdieping oevergeul [m]	0	1	2	0	1	2
Maximaal regelbereik [m ³ /s]	100	166	233	144	236	328

Inhoudsopgave

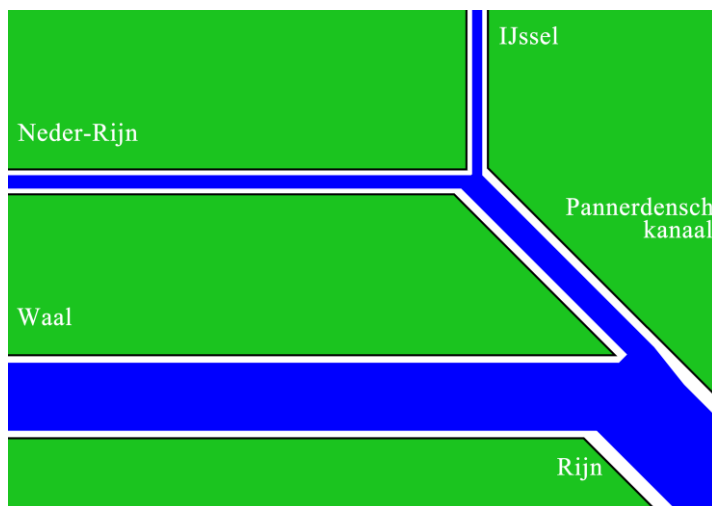
1	Inleiding.....	1
1.1	Doelstelling.....	2
1.2	Opbouw rapport.....	2
2	Langsdam	3
2.1	Definitie	3
2.2	Referentieproject 'Waal tussen Wamel en Ophemert'	4
3	Afvoerscenario's.....	5
3.1	Piekafvoer.....	5
3.2	Hoge afvoer & storm.....	5
3.3	Lage afvoer met opzet IJsselmeer	5
3.4	Lage afvoer zonder opzet IJsselmeer	5
4	Toepassing.....	6
4.1	Afmetingen.....	6
4.2	Locatie	7
5	Hypothese	8
5.1	Hypothese	8
5.2	Invloed.....	8
5.3	Verwachting effect	9
6	Model	10
6.1	SOBEK	10
6.2	Plan van Aanpak	12
7	Resultaten	13
7.1	Regelbereik.....	13
7.2	Waterstand.....	16
7.3	Selectieve toepassing	16
7.4	Lage afvoer	17
8	Conclusie	18
9	Discussie.....	19
10	Aanbeveling.....	20
	Nawoord	21
	Literatuurlijst	22
	Bijlagen	23
	Bijlage A: Beschrijving 'Langsdammen in de Waal'	24
	Bijlage B: Berekening bij de Hypothese	26
	Bijlage C: Invoer langsdam binnenbocht.....	33
	Bijlage D: Invoer en Resultaten SOBEK	35
	Bijlage E: Voorstudie	68

1 Inleiding

“Nederland leeft met water” de publiekscampagne die al jaren door het land gaat. Deze campagne is hoofdzakelijk gericht op drie punten: veiligheid, drinkwater en natuur. (1) Bij hoogwater zal er vooral gelet moeten worden op de veiligheid. Er stroomt namelijk steeds meer water de Nederlandse grenzen binnen vanuit Duitsland en België. Dit houdt in dat de rivieren meer water moeten kunnen afvoeren zonder dat de dijken overstromen. Maar dit niet alleen, de zeespiegel zal de komende jaren ook gaan stijgen wat zeker in de monding van de Nederlandse rivieren tot een hogere waterstand zal leiden.

Naast de piekafvoeren die steeds groter worden, worden de laagwaterafvoeren steeds lager. De zomers worden steeds droger, terwijl er meer behoefte is aan zoet water c.q. drinkwater. Dit betekent dat er zuinig om moet worden gegaan met het water dat Nederland binnen krijgt.

In dit onderzoek staat de afvoer van de Rijn centraal. Deze rivier geeft bij Lobith de grootste afvoer en is de grootste rivier van Nederland. Bijna direct na de grens splitst de Rijn zich in de Waal en het Pannerdensch Kanaal, zie figuur 1.1, en vervolgens het Pannerdensch Kanaal weer in de Neder-Rijn en de IJssel.



Figuur 1.1 – Schematisatie Nederlandse rivieren rond de splitsingspunten

In extreme situaties moet er goed gekeken worden hoe er met dit water wordt omgaan. Op de juiste momenten moet het water de goede kant op worden gestuurd, zodat alle rivieren en meren optimaal worden benut bij hoogwater en het water tevens op de juiste plek komt bij laagwater. Er ontstaat verschil tussen de beleidsmatige afvoerverdeling en de gewenste in te stellen afvoerverdeling. Hierin is de beleidsmatige afvoerverdeling de vastgestelde verwachte afvoerverdeling (2) en de gewenste in te stellen afvoerverdeling geeft de optimale situatie aan waarbij er voldaan wordt aan zoveel mogelijk eisen met betrekking tot de veiligheid, zoetwatervoorziening en scheepvaart.

In dit rapport zal worden ingegaan op het beïnvloeden van deze afvoerverdeling door middel van langsdammen. Deze langsdammen worden toegepast in de Waal en hebben vooral een functie om meer water de Waal op te trekken in de twee hoogwaterscenario's. Bij laagwater hebben langsdammen de functie om de rivier beter bevaarbaar te houden evenals kribben.

1.1 Doelstelling

Met betrekking tot het onderzoek naar de beïnvloeding van de afvoerverdeling van de Rijn is de volgende doelstelling opgesteld:

“Het realiseerbare regelbereik van langsdammen in de Waal bepalen, waarbij een zo groot mogelijke bijdrage aan de gewenste verandering in de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop in de scenario’s Piekafvoer en Hoge afvoer & storm wordt behaald, zonder dat dit resulteert in negatieve gevolgen bij de laagwatersscenario’s.”

1.2 Opbouw rapport

Dit verslag beschrijft de resultaten van het onderzoek “Het bepalen van het realiseerbare regelbereik van langsdammen in de Waal” en is als volgt opgebouwd.

Hoofdstuk 1 vormt de inleiding van het onderzoek met daarin ook de doelstelling van dit onderzoek. Hoofdstuk 2 geeft uitleg over de functie en afmetingen van langsdammen, hierbij zal gebruik worden gemaakt van een referentieproject. Hoofdstuk 3 geeft een verklaring van de scenario’s waarmee de maatregel “Langsdammen” wordt onderzocht en gecontroleerd. In Hoofdstuk 4 wordt gekeken hoe de maatregel toegepast kan worden in het huidige onderzoeksgebied. Vervolgens zal in Hoofdstuk 5 een hypothese worden opgesteld en onderbouwd met redeneringen en berekeningen. Aan de hand van deze hypothese zal in Hoofdstuk 6 worden gekeken hoe deze langsdammen in het model SOBEK verwerkt kunnen worden. In dit hoofdstuk is ook een plan van aanpak te vinden in welke volgorde er onderzocht gaat worden. In Hoofdstuk 7 worden de resultaten van dit onderzoek gepresenteerd. Uiteindelijk zal in Hoofdstuk 8 de conclusie van dit onderzoek te vinden zijn. Ten slotte zal in Hoofdstuk 9 nog een discussie plaatsvinden over het onderzoek.

Dit rapport volgt op een gezamenlijk Voorstudie, genaamd “Beïnvloeding Afvoerverdeling Rijn”, dat de basis vormt van dit verslag. Dit rapport streeft erna zelfstandig leesbaar te zijn, zonder dat u de Voorstudie heeft gelezen. Voor extra verdieping kunt u eventueel de Voorstudie raadplegen in Bijlage E.

2 Langsdam

In dit onderzoek zal het effect van de maatregel ‘Langsdammen’ worden bekeken. In dit hoofdstuk zal eerst worden uitgelegd wat een langsdam is en waar die al eerder is toegepast.

2.1 Definitie

Een langsdam is een in de stroomrichting van de rivier geplaatste dam die de hoofdvaargeul scheidt van een oevergeul, zie figuur 2.1. Deze langsdammen worden, net als bij kribben, geplaatst om de vaarweg op zijn plaats te houden en om de vaarweg te versmallen bij laagwater, zodat de restricties op de maximale vaardiepte worden beperkt. De verwachting en voorwaarde hierbij is dat het water in de hoofdgeul minimaal net zo makkelijk zijn weg kan vinden als bij kribben. (3) (4)



Figuur 2.1 – Artistieke impressie Langsdam (5)

Langsdammen worden gebouwd op de rechte stukken en in de binnenbochten van rivieren in plaats van de huidige kribben, zie figuur 2.2. De eerste bestaande krib blijft echter behouden en zal als drempel fungeren. Met de hoogte en breedte van deze vaste drempel kan vervolgens de grootte van de opening worden gestuurd. De eerste krib na de langsdam kan worden verlaagd om de doorstroming te verbeteren. In de buitenbocht zullen de bestaande kribben behouden blijven om uitschuring van de rivier tegen te gaan. (1) (2)



Figuur 2.2 – Schetsmatige uitvoering van een langsdam in de Waal (6)

Een langsdam heeft als gevolg dat, in tegenstelling tot kribben, de weerstand wordt verlaagd en het stroomvoerend oppervlak (het gedeelte van de rivier dat water afvoert) wordt vergroot en daardoor de waterstand wordt verlaagd. Bij laagwater zorgt de drempel aan het begin van de langsdam ervoor dat de oevergeul achter de dam niet mee stroomt. (7)

2.2 Referentieproject 'Waal tussen Wamel en Ophemert'

Op dit moment worden er voorbereidingen getroffen om een pilotproject op te zetten in de Waal tussen Wamel en Ophemert. Dit is ongeveer tussen 45 en 55 km vanaf het splitsingspunt van het Pannerdensch Kanaal en de Waal. (8) Op deze locatie worden over ongeveer 10 km langsdammen toegepast, 7 km op de linkeroever en 3 km op de rechteroever. Dit is weergegeven in figuur 2.3. De langsdammen die toegepast zullen worden vervangen het oorspronkelijke project dat de kribben zou verlagen. In de buitenbocht blijven de huidige kribben liggen. De verwachting is dat het project in 2015 wordt opgeleverd. (4)



Figuur 2.3 – Langsdammen in de Waal tussen Wamel en Ophemert (3)

Het doel van deze langsdammen is om bij hoogwater een waterstanddaling te bereiken tussen de 6 en 12 cm, een vaargeul te creëren die voldoet aan de eisen, ook in de toekomst, en om meer ruimte te bieden voor ecologie en natuurontwikkeling. Daarnaast zal er ook getest gaan worden of de langsdammen dezelfde resultaten, zoals een waterstanddaling tussen de 6 en 12 cm, kunnen geven zoals wetenschappelijk is bepaald. (2)

Door de langsdammen ontstaat een hoofdgeul met een breedte van gemiddeld 230 meter en een oevergeul van gemiddeld 90 m. In de oevergeul worden de kribben volledig verwijderd en de langsdam wordt ongeveer 30 m de rivier in verplaatst ten opzichten van de huidige kribkoppen. Door het versmallen van het profiel met 30 m zal er met laagwater een hogere waterstand worden bereikt. (2) (9)

Voor gedetailleerde gegevens over dit referentieproject wordt verwezen naar Bijlage A.

3 Afvoerscenario's

In de Voorstudie, zie Bijlage E, worden in totaal 4 scenario's beschreven. In deze scenario's is bepaald wat het verschil is tussen de beleidsmatige afvoerverdeling en de gewenste in te stellen afvoerverdeling. Dit verschil is de gewenste verandering die door de maatregelen moet worden verholpen. In dit hoofdstuk wordt besproken wat de gewenste verandering en afvoerverdeling is op de Waal, aangezien de langsdammen in deze rivier worden toegepast. Voor gedetailleerde gegevens en gegevens over andere rivieren wordt verwezen naar de Voorstudie, zie Bijlage E Hoofdstuk 6 en 7.

3.1 Piekafvoer

In het scenario Piekafvoer is de beleidsmatige afvoerverdeling $12.218 \text{ m}^3/\text{s}$ op de Waal. De gewenste in te stellen afvoerverdeling is $12.500 \text{ m}^3/\text{s}$ wat resulteert in een gewenste debietsverandering van $282 \text{ m}^3/\text{s}$ dat meer over de Waal moet stromen.

3.2 Hoge afvoer & storm

In het scenario Hoge afvoer & storm (afgekort tot Storm) is de beleidsmatige afvoerverdeling $9.372 \text{ m}^3/\text{s}$ op de Waal. De gewenste in te stellen afvoerverdeling is $10.500 \text{ m}^3/\text{s}$ wat resulteert in een gewenste debietsverandering van $1.128 \text{ m}^3/\text{s}$ dat meer over de Waal moet stromen.

3.3 Lage afvoer met opzet IJsselmeer

Het scenario Lage afvoer met opzet IJsselmeer wordt bekeken over een langere tijd, namelijk van 1 april tot 1 oktober. Het IJsselmeer wordt in dit scenario 1,5 m opgezet in het voorjaar. In deze periode zal er, volgens de Voorstudie, geen extra debiet nodig zijn van het Pannerdensch Kanaal naar de Waal of andersom. In deze periode kan gecontroleerd worden of de langsdammen een effect hebben op de huidige afvoer van $2.308 \text{ m}^3/\text{s}$ op 1 april en $1.482 \text{ m}^3/\text{s}$ op 20 juni en of deze maatregel ervoor zorgt dat er niet meer voldaan wordt aan de eisen. Ook in het najaar zal er in dit scenario geen extra debiet nodig zijn van het Pannerdensch Kanaal naar de Waal of andersom. Op 1 oktober kan worden gecontroleerd of er een effect is op de beleidsmatige afvoerverdeling van $473 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.4 Lage afvoer zonder opzet IJsselmeer

Het scenario Lage afvoer zonder opzet IJsselmeer wordt bekeken op 1 oktober. De beleidsmatige afvoerverdeling op de Waal is dan $473 \text{ m}^3/\text{s}$. De gewenste in te stellen afvoerverdeling is $210 \text{ m}^3/\text{s}$ wat resulteert in een gewenste verandering van debiet van $263 \text{ m}^3/\text{s}$ dat minder over de Waal moet stromen.

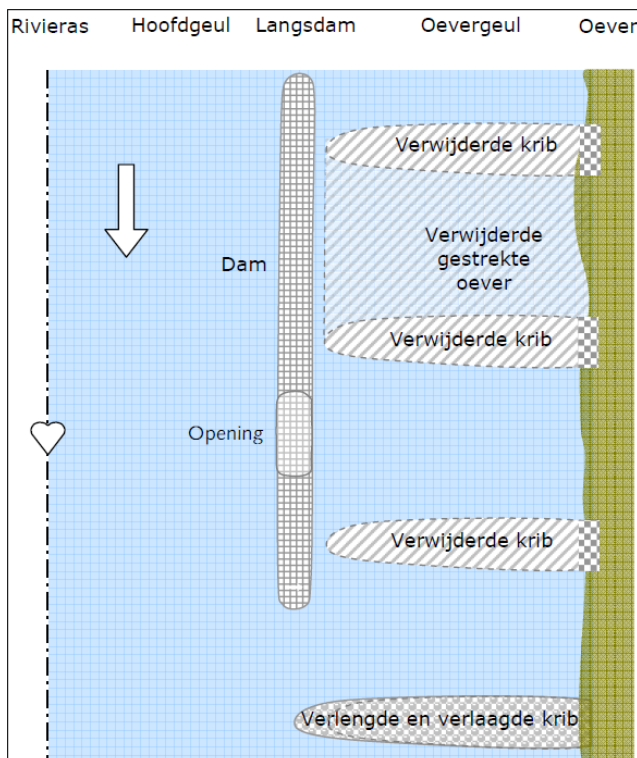
4 Toepassing

Dit hoofdstuk geeft uitleg over hoe de langsdammen in de Waal worden toegepast.

4.1 Afmetingen

Voor de afmetingen zal vooral gekeken worden naar het referentieproject van de Waal, zie paragraaf 2.2 en Bijlage A.

In figuur 4.1 wordt een bovenaanzicht gegeven van de aanleg van langsdammen, waarbij de stroomrichting van boven naar beneden is. Allereerst wordt aangenomen dat de langsdam op dezelfde locatie komt als de kop van de huidige kribben. De verwachting hierbij is dat de verandering van waterhoogte en afvoerverdeling wordt geminimaliseerd bij laagwater. In een later stadium van het onderzoek kan worden gekozen om de langsdammen te verplaatsen in de richting van de hoofdgeul, zodat bij laagwater er meer vaardiepte ontstaat voor de schepen. De eerste krib zal in eerste instantie behouden blijven, maar kan indien nodig in lengte en hoogte worden gewijzigd.



Figuur 4.1 – Schematisatie van de plaatsing van een langsdam (10)

Verder zal eerst het effect worden onderzocht van een oevergeul met een diepte gelijk aan de hoogte van de huidige kribben. Later kan er gekozen worden om de oevergeul te verdiepen om meer water te trekken met een maximum van 2 m verdieping aan de kant van de langsdam en de helling van 1:7, zoals aangehouden wordt in het referentieproject.

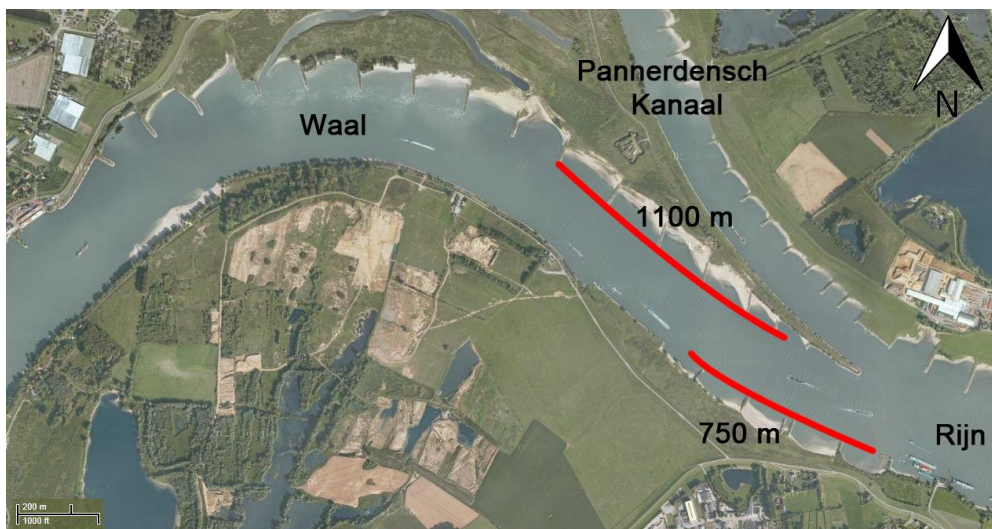
Voor de afmetingen van de langsdammen zal, net als in het referentieproject, een kruinbreedte van 2 meter worden aangehouden en een talud van 1:2,5. Op deze keuze wordt in dit rapport niet verder ingegaan. Op de locatie van openingen in de langsdammen, welke als functie hebben de uitwisseling van onder andere sediment en water, wordt in dit rapport ook niet verder ingegaan.

4.2 Locatie

Het doel van de langsdammen in dit onderzoek is het beïnvloeden van de afvoerverdeling door hun zuigende werking. Hierin geldt dat hoe dicht bij het splitsingspunt hoe meer effect de langsdammen op de afvoerverdeling zullen hebben. Vandaar dat de locaties van de langsdammen bepaald zullen worden vanaf het splitsingspunt.

Aangezien nog niet bekend is tot op welke afstand de langsdammen effect hebben op de afvoerverdeling, zal nu als voorbeeld de locatie van de langsdammen over de eerste 4 km worden bepaald, zie figuur 4.2. Bij het splitsingspunt liggen aan de linkerkant van de rivier (gezien vanaf de Rijn in de richting van de Waal) kribben. Deze kribben liggen in de buitenbocht, echter is de boogstraal erg groot en wordt er voor gekozen om hier langsdammen toe te passen. Indien blijkt dat er toch teveel erosie optreedt door de verwijdering van de kribben, kan er oeverbescherming worden toegepast. De eerste krib blijft behouden als drempel en de langsdam zal doorgetrokken worden over een lengte van ongeveer 750 m waar de kribben weer ophouden.

Direct na het splitsingspunt zijn er ook aan de rechterkant van de Waal kribben. Ook deze kribben worden vervangen door een langsdam, waarbij de eerste krib als drempel blijft liggen. Aangezien de kribben in de buitenbocht behouden dienen te blijven in verband met uitschuring zal de langsdam een lengte krijgen van ongeveer 1100 m. Er wordt ook rekening gehouden met het hoogwatergeultje dat direct na de langsdammen begint. Verder moet er in dit geval worden gekeken of de erosie rond de Pannerdensche Kop niet te groot wordt. Als dit wel het geval is moet er oeverbescherming worden toegepast of de plaatsing van langsdammen moet achterwege gelaten worden. Kribben in de binnenbocht en het laatste rechte stuk zijn niet aanwezig, waardoor daar geen langsdammen worden gepositioneerd.



Figuur 4.2 – Langsdammen in de eerste 8 km (8)

De totale lengte waarover de langsdammen zullen worden toegepast is dan ongeveer 1500 m. De locatie van de overige kribben zal op dezelfde manier worden bepaald, waarbij dus rekening zal worden gehouden met de aanwezigheid van kribben, monding van havens, geultjes en rivieren en de grootte van de boogstralen van de buitenbochten.

5 Hypothese

In dit hoofdstuk zal gekeken worden naar de verwachting van de effecten van de maatregelen. Allereerst zal er een hypothese worden geformuleerd. Daarna zal er gekeken worden naar de invloed van de maatregel met betrekking tot de afstand tot het splitsingspunt. Vervolgens wordt er een beredenering gemaakt over de te verwachten effecten van de langsdammen.

5.1 Hypothese

Met betrekking tot het onderzoek naar de beïnvloeding van de afvoerverdeling van de Rijn is de volgende hypothese opgesteld:

“Door langsdammen in de Waal te plaatsen zal het gedeelte van de rivier dat water afvoert vergroot worden. Door deze wijziging zal er meer water naar de Waal worden getrokken bij de hoogwaterscenario's. Bij laagwaterscenario's zal er naar verwachting weinig effect zijn als de langsdammen op dezelfde locatie worden geplaatst als de kribkopen. Verder wordt aangenomen dat het effect op de afvoerverdeling afneemt naarmate de maatregel verder vanaf het splitsingspunt wordt toegepast.”

5.2 Invloed

Allereerst zal er gekeken worden naar de verwachting van de invloed van maatregelen in de scenario's Piekafoer en Hoge afvoer & storm. Dit wordt gedaan aan de hand van een berekening die te vinden is in Bijlage B. In deze berekening wordt een ordegruotte schatting gemaakt van onder andere de aanpassingslengte. Om deze te kunnen bepalen zijn de volgende aannames gemaakt: gemiddelde bodemverhang $i_b \approx 1 \cdot 10^{-4}$, weerstandscoefficiënt $c_{f_{gem}} \approx 0,0044$, stroomvoerende breedte $B_s \approx 1050 \text{ m}$. Waar deze aannames op gebaseerd zijn, is te lezen in Bijlage B.

Aan de hand van deze waarden kan de evenwichtsdiepte, de diepte waarop een stationaire situatie ontstaat, worden bepaald per afvoer:

$$d_{e,Hoge \text{ afvoer \& storm}} \approx 9,3 \text{ m en } d_{e,Piekafoer} \approx 11,0 \text{ m} \quad (1)$$

Aangezien een hoogwatergolf een langzaam veranderende stroom is, is een redelijk aanname dat in een rivier zonder of enkel kleine kunstwerken de evenwichtsdiepte gelijk is aan de gemiddelde diepte. Met behulp van de evenwichtsdiepte en deze aanname kan vervolgens de weerstandscoefficiënt opnieuw worden uitgerekend en vervolgens weer de nieuwe evenwichtsdiepte.

$$c_{f_{gem}} \approx 0,0046, d_{e,Hoge \text{ afvoer \& storm}} \approx 9,4 \text{ m en } d_{e,Piekafoer} \approx 11,1 \text{ m} \quad (2)$$

Aan de hand van deze gegevens kan vervolgens de aanpassingslengte worden bepaald. De aanpassingslengte geeft de afstand bovenstrooms aan waarop de maatregel nog een effect heeft op de waterstand van 37%. Als deze waarde hoger wordt, betekent dit dat de maatregel over een grotere lengte effect heeft. (11)

$$L_{Hoge \text{ afvoer \& storm}} \approx 31 \text{ km en } L_{Piekafoer} \approx 36 \text{ km} \quad (3)$$

Tabel 5.1 geeft een indruk van het aanpassingspercentage op verschillende locaties.

Tabel 5.1 – Effect van een maatregel op het splitsingspunt afhankelijk van de locatie

Locatie	Afstand tot splitsingspunt	Aanpassing Hoge afvoer & storm	Aanpassing Piekafvoer
Ooij	8 km	77%	80%
Nijmegen	15 km	62%	66%
Druten	35 km	32%	38%
Tiel	45 km	23%	29%
Zaltbommel	65 km	12%	16%
Gorinchem	85 km	6%	9%

In figuur 5.1 zijn de locaties van de plaatsen die zijn opgenomen in tabel 5.1 weergegeven.

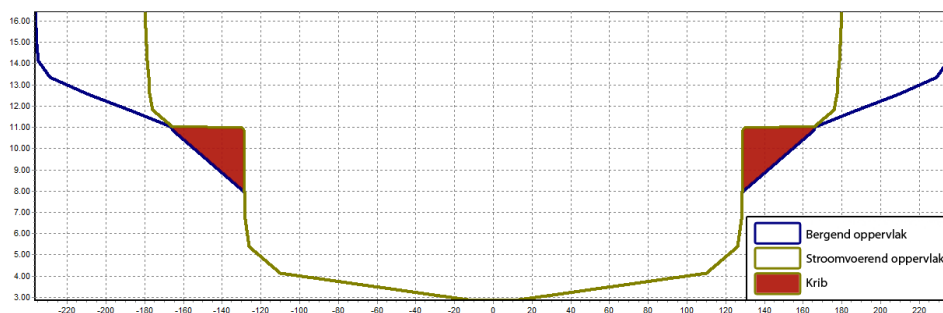


Figuur 5.1 – Meetlocaties aanpassingslengte Waal (8)

Uit tabel 5.1 blijkt dat de aanname, dat een effect minder invloed heeft op het splitsingspunt als deze verder weg ligt, klopt. Echter geldt hier wel dat maatregelen elkaar kunnen versterken door ze toe te passen op meerdere locaties in de rivier.

5.3 Verwachting effect

Aangezien het vervangen van de kribben voor langsdammen een beperkt oppervlak toevoegt aan het stroomvoerende deel van de rivier (zie figuur 5.2), zullen de langsdammen geen groot effect op de afvoerverdeeling hebben. Om een maximaal effect te bereiken moeten de langsdammen dus over een zo groot mogelijke lengte van de rivier worden toegepast.



Figuur 5.2 – Doorsnede van de rivier met krib (12)

Dit effect zal waarschijnlijk nog niet afdoende zijn en er zal dus moeten worden gekeken naar extra maatregelen naast het vervangen van de kribben. Twee voorbeelden daarvan zijn ten eerste het uitdiepen en ten tweede verbreden van de oevergeul die ontstaat door het aanleggen van de langsdammen.

6 Model

In dit hoofdstuk wordt behandeld hoe het model is gebruikt om de beïnvloeding van de afvoerverdeling van de Rijn te bepalen door middel van langsdammen. Allereerst zal behandeld worden welke algemene aannames worden gemaakt in het model. Vervolgens welke aannames specifiek op langsdammen van toepassingen zijn en ten slotte hoe het plan van aanpak is van het onderzoek in het model.

6.1 SOBEK

In de Voorstudie, zie Bijlage E, wordt uitgelegd wat SOBEK is. Hier kunt u de informatie vinden over de werking van SOBEK en de theoretische achtergrond. Deze paragraaf zal op die informatie voortbouwen.

6.1.1 Algemene aannames

SOBEK is een eendimensionaal model. Dit houdt in dat alle rivieren geschematiseerd worden tot één lijn. Op deze lijn liggen berekeningspunten. De doorsnedes tussen twee punten, met een onderlinge afstand van 500 m, in het model worden lineair met elkaar verbonden. Vervolgens worden aan de hand van de Saint-Venantvergelijkingen de waterstanden per punt berekend en de debieten tussen de punten. Deze methode houdt geen rekening met snelheidsverschillen in de breedte van het profiel. Wel kan er verschil in wrijving worden aangebracht over het dwarsprofiel.

Bij dit onderzoek wordt er gebruik gemaakt van een project waarin Nederland is gemodelleerd door de TU Delft. In SOBEK is het alleen mogelijk om de doorsnedes symmetrisch in te voeren. Naast de fout die ontstaat door deze symmetrie, zijn ook de dwarsprofielen in SOBEK enigszins verouderd. Verder wijkt dit model af van de beleidsmatige afvoerverdeling. Zo is de piek van de afvoergolf logischerwijs al een beetje afgevlakt bij het splitsingspunt van de Waal en het Pannerdensch Kanaal en stroomt er minder water over de Waal in het model dan is vastgesteld door Rijkswaterstaat (zie tabel 6.1). Het onderzoek zal zich echter richten op het regelbereik van de maatregel en er wordt een aanname gedaan dat het regelbereik ongeveer gelijk zal zijn bij deze verschillen in debiet.

Tabel 6.1 – Verschil beleidsmatige afvoerverdeling en afvoerverdeling in SOBEK (2)

Scenario	Beleidsmatige afvoer Rijn [m ³ /s]	Afvoer in SOBEK Rijn [m ³ /s]	Beleidsmatige afvoer Waal [m ³ /s]	Afvoer in SOBEK Waal [m ³ /s]
Piekafvoer	18.000	17.975	12.218	10.762
Hoge afvoer & storm	14.000	13.983	9.372	8.566
Lage afvoer: 1 april	3.400	3.385	2.308	2.295
Lage afvoer: 20 juni	2.125	2.127	1.482	1.524
Lage afvoer: 1 oktober	520	522	473	455

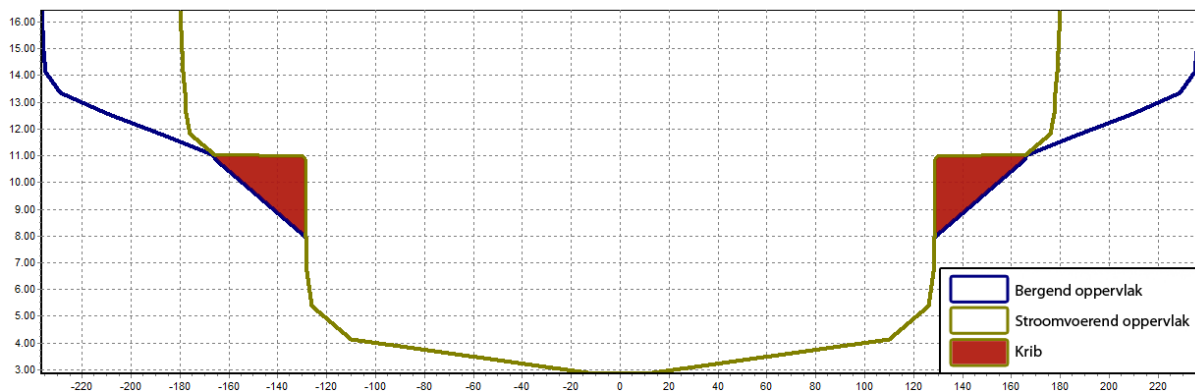
6.1.2 Langsdammen

In Hoofdstuk 4 is uitgelegd hoe langsdammen toegepast worden. Aan de hand van deze gegevens zal in deze paragraaf uitgelegd worden hoe de langsdammen in SOBEK worden ingevuld.

Aangezien langsdammen een verandering in de doorsnede bewerkstelligen zijn een aantal opties bekeken. In SOBEK is het niet mogelijk om een constructie in te voeren die op een langsdam lijkt. Het invoeren van een zomerdijk blijkt niet functioneel, aangezien er alleen kan worden gekozen om een

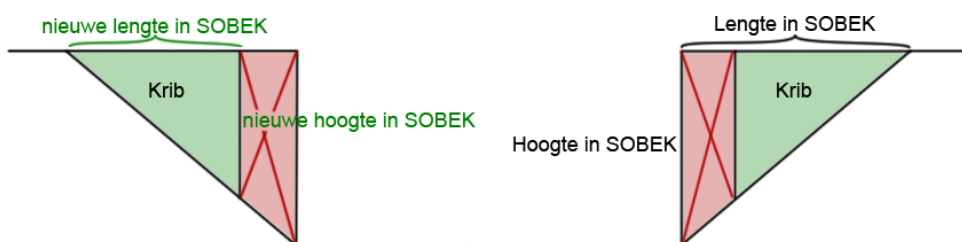
oppervlak in te voeren die achter de zomerdijk ligt. Dit oppervlak zal niet mee gaan stromen en dat is wel het geval bij langsdammen. Verder is het niet mogelijk om een opstaande rand te zetten in de dwarsdoorsnede zelf.

Het is echter wel mogelijk om met de grootte van het stroomvoerend oppervlak te spelen. De functie van langsdammen ten opzichte van kribben is dat er bergend oppervlak wordt omgezet in stroomvoerend en bergend oppervlak. De oppervlakte van de krib, de twee rode gebieden in figuur 6.1, kan dan worden toegevoegd als stroomvoerend oppervlak. Echter moet hierbij wel de aanname gedaan worden dat de oppervlakte van de langsdammen zelf te verwaarlozen is.



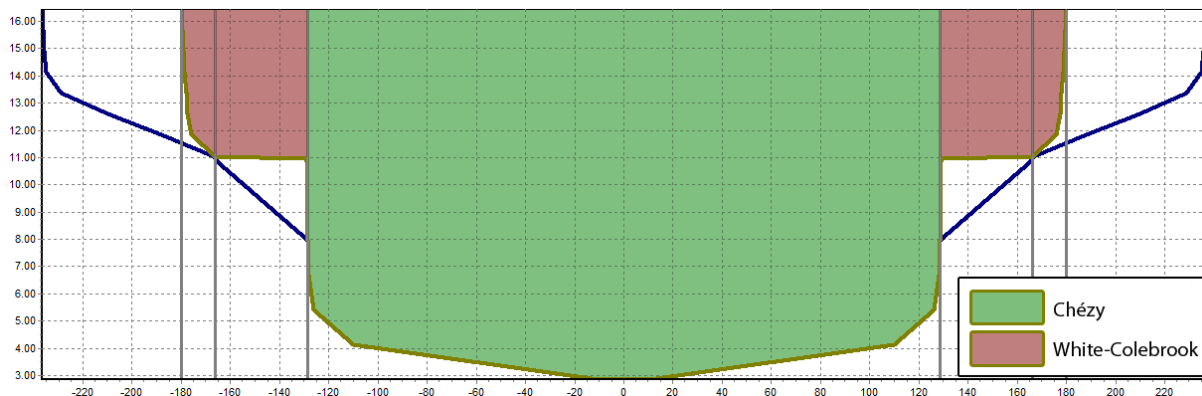
Figuur 6.1 – Doorsnede van de rivier met krib (12)

Aangezien langsdammen niet alleen wordt toegepast aan beiden zijden rivieren, maar ook wel eens in de binnenbocht, moet gekeken worden naar hoe dit in het symmetrische profiel van SOBEK ingevoerd kan worden. De aannames die hierbij gedaan zijn is dat de hoogte van de kribben gelijk zijn en dat het oppervlak van de kribben in SOBEK met dezelfde verhouding verkleind wordt als de verhouding van het oppervlak van de kribben in werkelijkheid, zoals is te zien in figuur 6.2. Voor de berekeningen en de volledige uitleg bij de aannames wordt verwezen naar Bijlage C.



Figuur 6.2 – Geschematiseerde situatie van de aangepaste kribben in SOBEK

Naast deze aanname, moet er ook gekeken worden naar de wrijving. Deze is namelijk opgedeeld in verschillende sectoren, zie figuur 6.3. In de hoofdgeul worden in het model Chézy waarden gebruikt en in de uiterwaard en boven de kribben worden White-Colebrook waarden gebruikt. Het verschil tussen de formules van Chézy en van White-Colebrook (zie Bijlage B), zoals ingevoerd in SOBEK, is dat de weerstandscoefficiënt (c_f) bij Chézy constant is bij elke waterdiepte van de rivier, terwijl de weerstandscoefficiënt (c_f) bij White-Colebrook berekend wordt aan de hand van een functie met daarin de waterdiepte. Hoe hoger het water staat, hoe meer de weerstandswaarde zal afnemen.



Figuur 6.3 – Doorsnede in SOBEK met wrijving (12)

In Bijlage B zijn voor de hoogwaterscenario's de weerstandscoefficienten van Chézy (C) en Nikuradse (k_n), Nikuradse wordt gebruikt in White-Colebrook, omgerekend naar de weerstandscoefficiënt van Chézy (c_f). Voor de hoofdgeul kwam hier een waarde uit van 0,0052 en voor de oevergeul kwamen hier de waarden uit van 0,0040 respectievelijk 0,0038 voor een debiet van 14.000 respectievelijk 18.000 m³/s.

Er wordt hierbij een aanname gemaakt om de White-Colebrook waarden te gebruiken in de oevergeul van de langsdammen. Deze aanname wordt gebaseerd om de volgende argumenten. Allereerst gaan de oevergeulen niet direct meestromen, want dit gebeurt pas op het moment dat er een bepaalde drempelhoogte wordt overschreden ter hoogte van de huidige eerste krib. Tijdens het volstromen van de langsdammen zal de weerstand langzaam afnemen evenals in de uiterwaard gebeurd. Ten tweede is de weerstandscoefficiënt van Chézy (c_f) in de uiterwaard bij de piek van de afvoeren kleiner dan die van de hoofdgeul. Dit lijkt ook een goede aanname aangezien er door Rijkswaterstaat in het referentieproject wordt gesproken om de weerstand in de oevergeul voldoende laag te houden in verband met het transporteren van sediment en ijs. (10)

6.2 Plan van Aanpak

Allereerst zal gekeken worden naar het effect van het plaatsen van de langsdammen met enkel als aanpassing het toevoegen van de stroomvoerende breedte van de krib. Dit zal gebeuren in de hoogwaterscenario's. Hierbij zal begonnen worden met het plaatsen van één langsdam en vervolgens zal er telkens één bijgeplaatst worden, zodat ook het effect van elke langsdam bekeken kan worden. De toepassingslengte, maat die aangeeft wat de afstand is vanaf het splitsingspunt waarin langsdammen in de rivier worden toegepast, van de maatregel zal dus steeds groter worden.

Vervolgens zullen er aanpassingen plaats gaan vinden in de diepte van de oevergeul. Hierbij worden de situaties onderzocht met een oevergeulverlaging van één en twee meter. Ook deze situaties worden wederom getest in de hoogwaterscenario's. Als de effecten van deze maatregelen bekend zijn, zal gekeken worden naar wat de effecten zijn van de maatregelen op de laagwaterscenario's. Daarnaast zal er ook nog kort worden gekeken naar het effect van de aanname betreffende de wrijving.

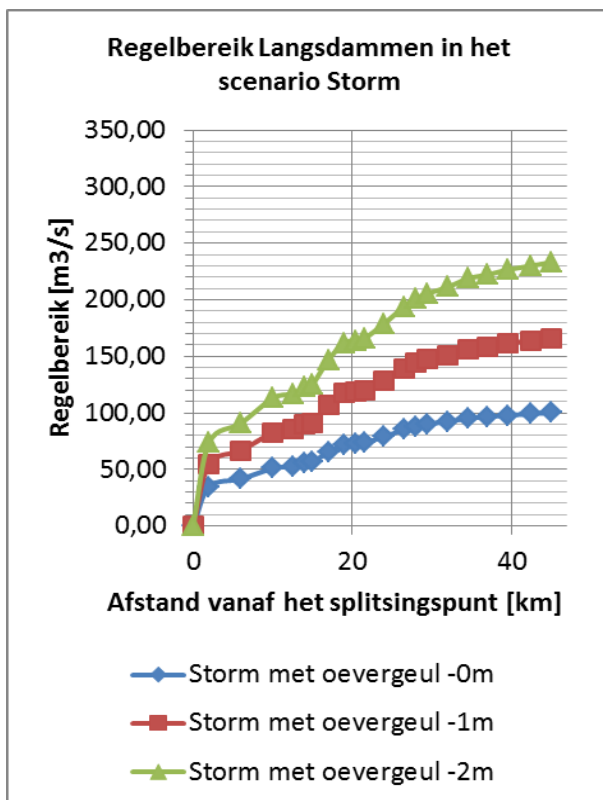
Voor een uitgebreide uitleg hoe en wat er is ingevoerd in SOBEK wordt verwezen naar Bijlage D.

7 Resultaten

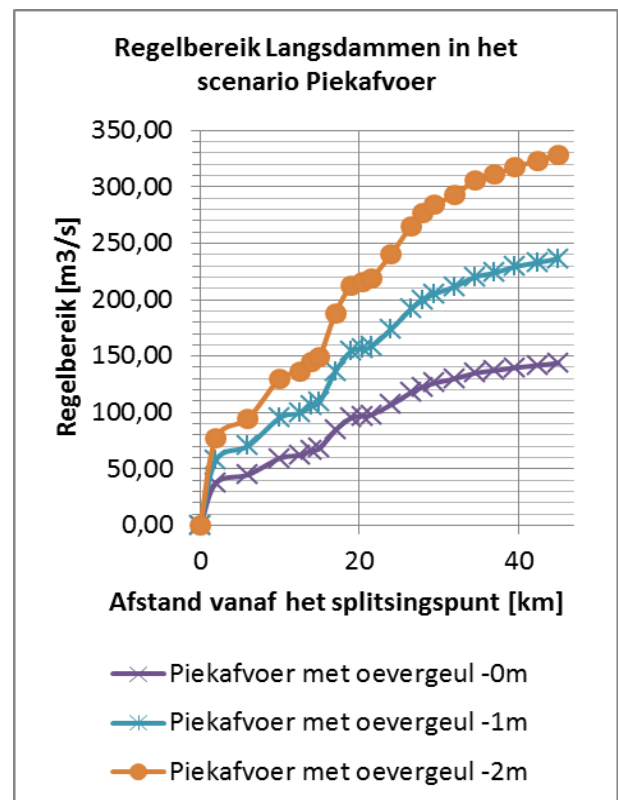
In dit hoofdstuk worden de belangrijke resultaten gepresenteerd die zijn verkregen met SOBEK. Voor alle resultaten wordt verwezen naar Bijlage D. Verder worden in deze bijlage ook alle afbeeldingen getoond die in dit hoofdstuk zijn weergegeven, maar dan in groter formaat.

7.1 Regelbereik

Het doel van dit onderzoek is het bepalen van het regelbereik van langsdammen in de Waal. Dit is onderzocht in twee scenario's Piekafvoer en Hoge afvoer & storm en beide met drie maatregelen namelijk langsdammen met een oevergeulverlaging van 0 m, 1 m en 2 m). De resultaten van het toepassen van de langsdammen zijn berekend over een lengte van 0 tot 45 km vanaf het splitsingspunt. Deze resultaten geven een regelbereik die toeneemt naarmate de toepassingslengte toeneemt. Dit is terug te zien in figuur 7.1 en figuur 7.2.



Figuur 7.1 – Regelbereik in Hoge afvoer & storm naarmate de toepassingslengte van de langsdammen toeneemt



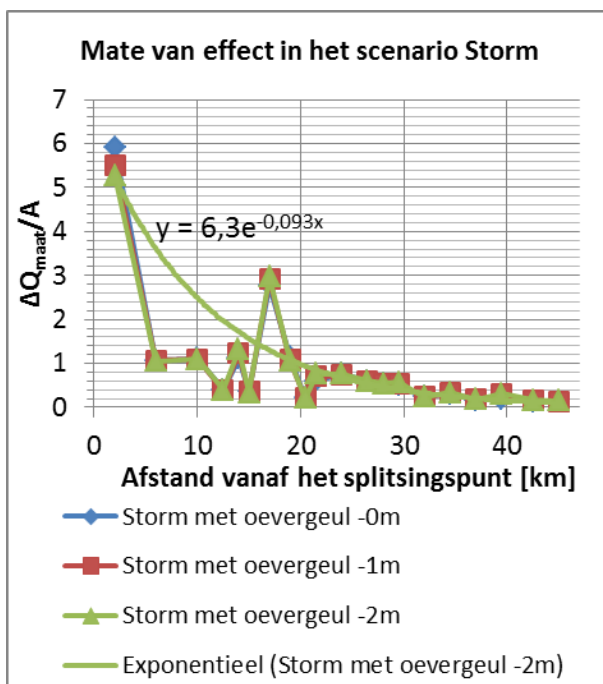
Figuur 7.2 – Regelbereik in Piekafvoer naarmate de toepassingslengte van de langsdammen toeneemt

Opvallend in figuur 7.1 en figuur 7.2 zijn de twee sprongen in het regelbereik bij 0 tot 2 km, 15 tot 17 km en de kromming aan het eind die naar een asymptoot gaat. De eerste sprong is te verklaren door de grote invloed die een maatregel heeft op de afvoerverdeling direct rond het splitsingspunt. Het effect van de maatregel is door de korte afstand nog nauwelijks afgezwakt. De tweede sprong is echter opvallend door vernauwing die optreedt bij Nijmegen. Deze steekt af ten opzichte van de andere resultaten. Na deze sprong lijken de maatregelen naar een asymptoot te gaan. De laatste waarde in deze grafiek geeft dan ook meteen de maximale waarde van het regelbereik. Deze waarde zijn samengevat in tabel 7.1.

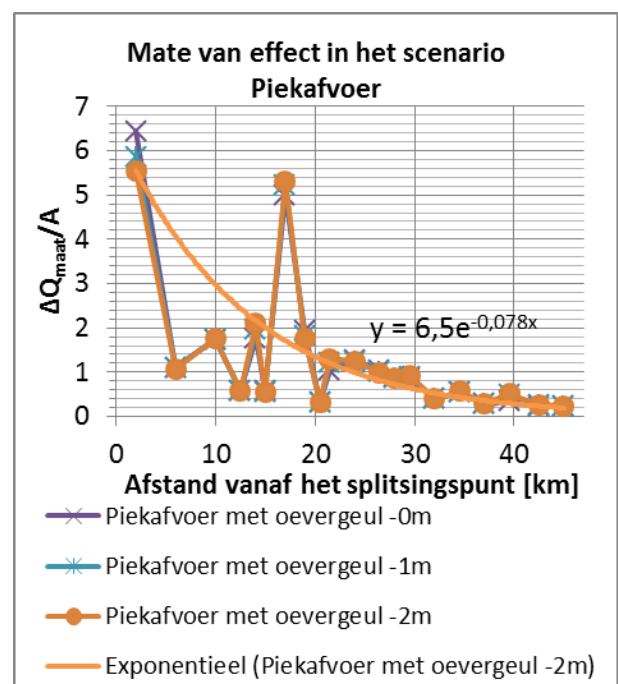
Tabel 7.1 – Maximaal regelbereik per maatregel met een toepassingslengte van 0 tot 45 km

Scenario	Hoge afvoer & storm			Piekaftervoer		
Verdieping oevergeul [m]	0	1	2	0	1	2
Maximaal regelbereik $\Delta Q_{\text{totaal,maximum}}$ [m ³ /s]	100	166	233	144	236	328

Om meer inzicht te krijgen in de verkregen resultaten wordt nu alleen gekeken naar de invloed die de aanpassing van een aantal doorsnedes geeft. Er wordt bijvoorbeeld alleen gekeken naar het effect van langsdammen op het gebied tussen 43 tot 45 km. Dit wordt gedaan aan de hand van ΔQ_{maat} , het extra regelbereik dat wordt verkregen door het toevoegen van langsdammen over een serie doorsnedes op een afstand van bijvoorbeeld 43 tot 45 km vanaf het splitsingspunt. Aangezien niet al deze serie doorsnedes over dezelfde lengte zijn toegepast en ook niet dezelfde oppervlaktes hebben, wordt het extra regelbereik van één serie doorsnedes (ΔQ_{maat}) gedeeld door het toegevoegde stroomvoerend oppervlak (A). Zo wordt een maat verkregen, waarmee de effectiviteit van een maatregel over een serie doorsnedes kan worden bepaald. Dit is weergegeven in een grafiek in figuur 7.3 en figuur 7.4.



Figuur 7.3 – Mate van effect van één serie doorsnedes in het scenario Hoge afvoer & storm



Figuur 7.4 – Mate van effect van één serie doorsnedes in het scenario Piekaftervoer

Naast de verhouding tussen $\Delta Q_{\text{maat}}/A$ is in figuur 7.3 en figuur 7.4 is ook exponentiële trendlijn toegevoegd aan gezien de functie bij benadering redelijk exponentieel afloopt. Deze afname komt ook terug in de formule volgens vergelijking (40) in Bijlage B geldt:

$$\text{Percentage aanpassing bij splitsingspunt} = e^{\frac{\text{afstand tot splitsingspunt}}{L}} \quad (4)$$

Vanuit deze vergelijking en de formules uit figuur 7.3 en figuur 7.4 kan vervolgens de aanpassingslengte (L) worden bepaald. Deze zijn als volgt:

$$L_{storm} \approx \frac{1}{0,093} \approx 10,8 \text{ km} \quad (5)$$

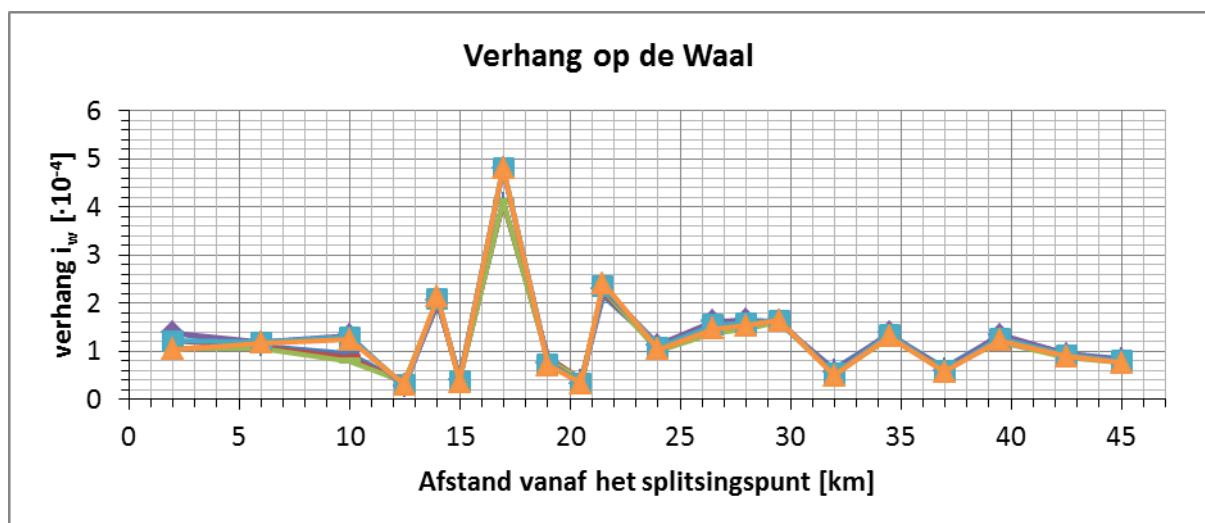
$$L_{piekafvoer} \approx \frac{1}{0,078} \approx 12,8 \text{ km} \quad (6)$$

Het blijkt dus dat er sprake is van een exponentiële afname op gebied van het effect van het toevoegend van stroomvoerend oppervlak. Dit verklaart direct waarom het regelbereik in figuur 7.1 en figuur 7.2 naar een asymptoot gaat. Daarnaast blijkt dat de aanpassingslengte veel kleiner is dan verwacht in de hypothese. Dit resulteert kleinere percentage effect dat een maatregel heeft op het splitsingspunt, zoals is weergegeven in tabel 7.2. De locatie van de steden is te zien in figuur 5.1.

Tabel 7.2 – Effect van een maatregel op het splitsingspunt afhankelijk van de locatie

Locatie	Afstand tot splitsingspunt	Effect in hypothese Storm	Effect in hypothese Piekafoer	Effect in model Storm	Effect in model Piekafoer
Ooij	8 km	77%	80%	48%	54%
Nijmegen	15 km	62%	66%	25%	31%
Druten	35 km	32%	38%	4%	6%
Tiel	45 km	23%	29%	2%	3%
Zaltbommel	65 km	12%	16%	0,2%	0,6%
Gorinchem	85 km	6%	9%	0,04%	0,1%

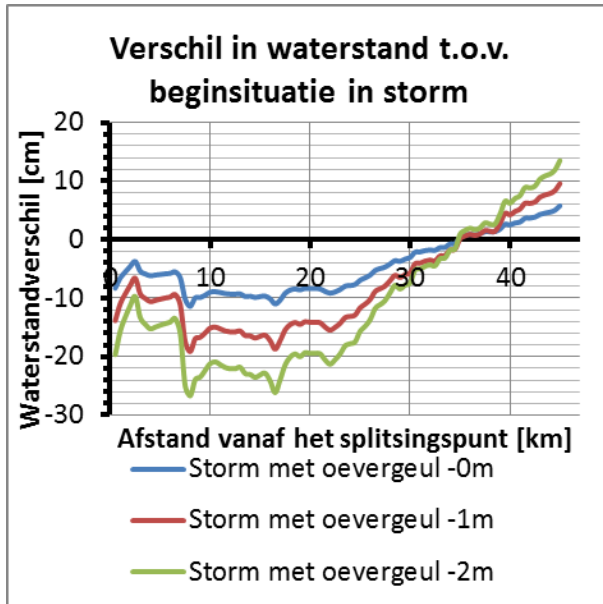
Om deze verklaring te vinden van de piek bij 15 tot 17 kilometer wordt gekeken naar het verhang van de rivier, zie figuur 7.5. In dit figuur is te zien dat het verhang bij 15 tot 17 km minimaal twee keer zo groot is als op de rest van de rivier. Dit komt, omdat er bij Nijmegen een vernauwing zit in de rivier, een zogenaamde ‘bottleneck’. Het effect wat maatregelen hier kunnen bereiken is dus vele malen groter dan op elk ander gebied in de Waal. Echter heeft dit wel als gevolg dat de maatregelen die voor deze ‘bottleneck’ worden geplaatst minder effect hebben.



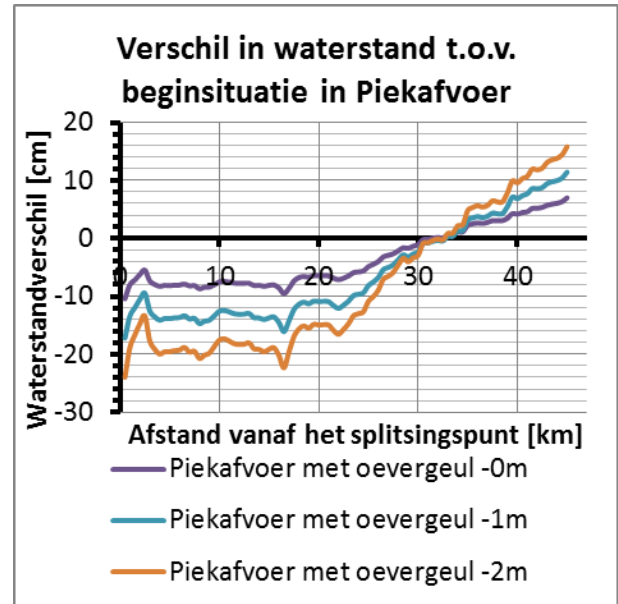
Figuur 7.5 – Verhang op de Waal bij alle maatregelen en scenario's

7.2 Waterstand

Door het toepassen van de langsdammen wordt de waterstand op de rivier flink beïnvloed. Het verschil in waterstand door het toepassen van langsdammen van 0 tot 45 kilometer wordt gegeven in figuur 7.6 en figuur 7.7.



Figuur 7.6 – Verskil in waterstand in Hoge afvoer & storm t.o.v. de beginsituatie met langsdammen van 0 tot 45 km



Figuur 7.7 – Verskil in waterstand in Piekafvoer t.o.v. de beginsituatie met langsdammen van 0 tot 45 km

De maximale waterstandsval bij het splitsingspunt is 19 cm in het scenario Hoge afvoer & storm en 24 cm in het scenario Piekafvoer indien de maatregel met een oevergeulverlaging van twee meter wordt toegepast. Verder is het opvallend dat bij 17 kilometer er bij zowel het scenario Piekafvoer als Hoge afvoer & storm een duidelijke waterstandsval optreedt. Dit komt door de vernauwing, waardoor de stroomsnelheid hoger wordt, terwijl hetzelfde debiet door de doorsnede blijft gaan.

Verder is te zien dat tot 35 kilometer in het scenario Hoge afvoer & storm en tot 32,5 kilometer in het scenario Piekafvoer er een waterstandsval optreedt op de Waal. Na dit punt treedt er een waterstandsverhoging op met een maximum na 45 km van 14 cm in het scenario Hoge afvoer & storm en 16 cm in het scenario Piekafvoer. Opvallend is dat hoe rigoureuzer de maatregel des te meer waterstandsval en waterstandsverhoging er optreedt.

7.3 Selectieve toepassing

Aangezien het effect van de maatregel niet bij elke doorsnede hetzelfde is, is een logische redenering om deze maatregel alleen maar toe te passen in de effectieve delen van de rivier. De resultaten van deze vraag worden gepresenteerd in deze paragraaf. Deze test wordt uitgevoerd bij een oevergeulverdieping van een meter in het scenario Hoge afvoer & storm.

Bij de doorsnede 24,5 tot en met 26,5 wordt voor de laatste keer een debietsverschil van groter dan $10 \text{ m}^3/\text{s}$ gemeten. Alle gebieden tussen de 0 en 26,5 en met een waarde groter dan $9 \text{ m}^3/\text{s}$ worden geselecteerd. Dit zijn de gebieden: 0,5 tot 2 km, 4,5 tot 6 km, 8 tot 10 km, 15,5 tot 19 km en 22 tot 26,5 km. Vervolgens worden alleen in deze doorsnedes langsdammen geplaatst.

Het regelbereik van langsdammen over een lengte van 0,5 tot 26,5 km is $139,21 \text{ m}^3/\text{s}$, zie Bijlage D Hoofdstuk “Langsdammen van 24,5 tot 26,5 km”. Als men vervolgens alleen de selectie, zoals in de vorige alinea is omschreven, bij elkaar optelt komt, is het regelbereik $127,74 \text{ m}^3/\text{s}$. De verwachting is dus dat door het gebruik maken van selectieve toepassing het regelbereik ongeveer $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$ afneemt. Echter blijkt uit de resultaten dat het nieuwe regelbereik $108,23 \text{ m}^3/\text{s}$ is. Dit is een afname van ongeveer $31 \text{ m}^3/\text{s}$. De conclusie die hieruit kan worden getrokken is dat als de langsdammen achter elkaar worden geplaatst, deze elkaar versterken, zodat het regelbereik groter wordt.

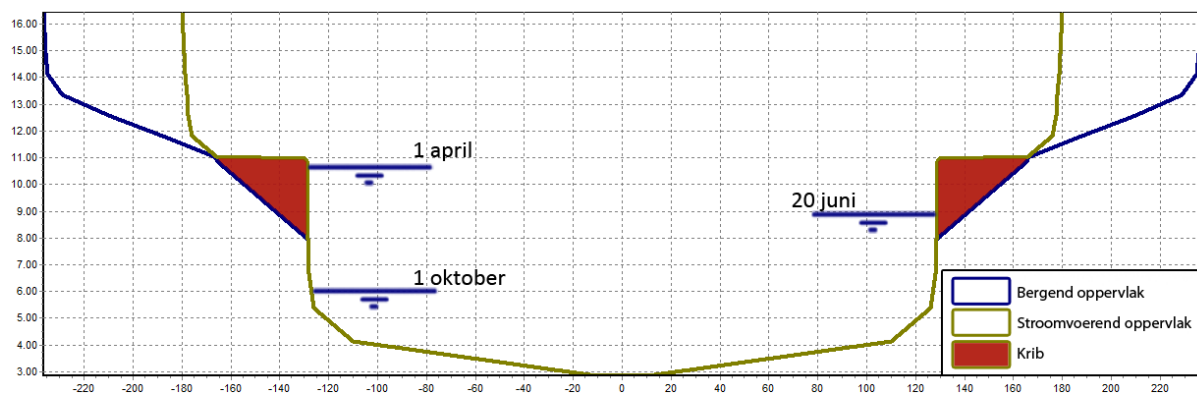
7.4 Lage afvoer

In het laagwaterscenario is er gekeken naar het effect van langsdammen bij drie afvoeren van Lobith. De data en waterstanden die bij deze debieten horen zijn te zien in tabel 7.3.

Tabel 7.3 – Waterstand op de Waal bij de Pannerdensch Kop in de laagwaterscenario's

Datum	Afvoer bij Lobith	Waterstand Waal
1 april	$3400 \text{ m}^3/\text{s}$	10,74 m
20 juni	$2125 \text{ m}^3/\text{s}$	8,99 m
1 oktober	$520 \text{ m}^3/\text{s}$	6,00 m

Op 1 april ligt de waterstand net onder de hoogte van de langsdam, zie figuur 7.8. Rond deze tijd mag er meer water over de Waal stromen, zolang in het scenario Lage afvoer met opzet IJsselmeer maar voldoende water beschikbaar is om het IJsselmeer te vullen. Door de hoogte van de drempel en de openingen kan geregeld worden dat er juist wel of geen water door de oevergeul heen stroomt.



Figuur 7.8 – Doorsnede van de Waal bij het splitsingspunt bij lage afvoer

Op 20 juni is de waterstand bijna aan de voet van de langsdam. Op dit moment stroomt de oevergeul niet meer mee, aangezien het water nooit over de drempel zal kunnen stromen. Het enige effect dat de langsdammen zullen bieden is dat de waterstand licht wordt verhoogd ten opzichte van kribben. Aangezien er normaal gesproken wel water tussen de kribben staat en nu dit gebied door de langsdammen wordt afgesloten. Dit zal dus een positief effect leveren.

Ten slotte zal er op 1 oktober een waterstand zijn die ver onder de kribben ligt. Zelfs met een bodemverlaging van de oevergeul van twee meter zonder drempel zal er geen water door de oevergeul heen stromen. Langsdammen zullen dus geen effect leveren op de afvoerverdeling bij extreem lage afvoer.

8 Conclusie

In dit rapport is onderzoek gedaan naar het toepassen van langsdammen in de rivier de Waal met als doel een zo groot mogelijke bijdrage te leveren aan de gewenste verandering in de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop in de scenario's Piekafvoer en Hoge afvoer & storm. De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

Allereerst is de toepassingslengte en de locatie van de maatregel van groot belang. Langsdammen zullen een groter effect hebben naarmate ze over een langere afstand worden toegepast, hierbij geldt wel dat hoe dichter de maatregel bij het splitsingspunt wordt geplaatst, hoe meer effect dit zal hebben op de afvoerverdeling. In het scenario Hoge afvoer & storm geldt dat na ongeveer 11 kilometer er nog een effect te merken is van 37% en in het scenario Piekafvoer geldt hetzelfde na ongeveer 13 kilometer. Verder geldt dat als langsdammen achter elkaar worden geplaatst deze elkaar versterken.

Het onderzoek van de maatregel heeft plaatsgevonden in de eerst 45 kilometer van de Waal. Dit is vanaf de Pannerdensche Kop tot het Amsterdam-Rijnkanaal bij Tiel. Het maximale regelbereik wordt gevonden als er langsdammen worden toegepast over dit hele traject, zie tabel 8.1. Uit deze tabel valt af te lezen dat het regelbereik in het scenario Piekafvoer voldoet en dat er in het scenario Hoge afvoer & storm nog extra maatregelen nodig zijn om het gewenste regelbereik te behalen.

Tabel 8.1 – Maximaal regelbereik per maatregel met een toepassingslengte van 0 tot 45 km

Scenario	Hoge afvoer & storm			Piekafvoer		
Verdieping oevergeul [m]	0	1	2	0	1	2
Maximaal regelbereik $\Delta Q_{\text{totaal,maximum}}$ [m ³ /s]	100	166	233	144	236	328

Naast het grote effect dat wordt bereikt bij het splitsingspunt, heeft het toepassen van langsdammen ook veel effect tussen de 15 en 17 kilometer. Bij deze locatie liggen de plaatsen Nijmegen en Lent en tussen deze plaatsen wordt een soort 'bottleneck' gevormd. Door de versmalling neemt op deze plaats de stroomsnelheid toe. Op het moment dat daar een aanpassing wordt gedaan heeft dat een drie keer zo groot effect als verwacht zou worden op die locatie. Aanpassing stroomopwaarts van deze locatie hebben echter minder effect.

Gevolg van deze maatregel is dat er een waterstandsdeling bij de Pannerdensche Kop plaatsvindt van maximaal 19 centimeter in het scenario Hoge afvoer & storm en 24 centimeter in het scenario Piekafvoer. Deze waterstandsdeling kan tevens gebruikt worden voor het toepassen van maatregelen met een stuwend effect, zodat er voor deze maatregel geen dijkverhogingen of andere maatregelen nodig zijn. Tot 35 kilometer in het scenario Hoge afvoer & storm en tot 32,5 kilometer in het scenario Piekafvoer treedt er een waterstandsdeling op. Na dit punt kan vervolgens een waterstandverhoging op 45 kilometer vanaf het splitsingspunt bij Tiel worden verwacht van maximaal 14 centimeter in het scenario Hoge afvoer & storm en 16 centimeter in het scenario Piekafvoer. Dit kan betekenen dat er dijkverhoging of andere aanvullende maatregelen, zoals langsdammen, moet worden toegepast vanaf 32,5 kilometer vanaf het splitsingspunt.

Tot slot zullen er geen negatieve gevolgen zijn van de langsdammen in de laagwaterscenario's indien de drempels aan het begin van de langsdammen op de juiste hoogte worden afgesteld.

9 Discussie

Dit hoofdstuk geeft een bespreking van de aannames die gemaakt zijn in dit rapport en bespreekt overige discussiepunten. Door het model en de aannames die gemaakt zijn, zit er namelijk een bepaalde onzekerheid in de uitkomst van dit onderzoek:

De afvoerverdeling volgens het model kwam niet overeen met de afvoerverdeling die is vastgesteld door Rijkswaterstaat. (2) Een van de oorzaken zou kunnen zijn dat dit model eendimensionaal is. In dit model worden de rivieren namelijk geschematiseerd tot lijnen en de snelheden over het dwarsprofiel constant veronderstelt. Dit geeft vervolgens een redelijke benadering van de werkelijkheid. Deze benadering heeft echter wel effect op de maatregel zelf. Over het algemeen geldt er dat aan de buitenkanten van de rivier en in de oevergeul de stroomsnelheid lager is dan in de hoofdgeul. Dit heeft als gevolg dat een maatregel minder debiet zal trekken, waardoor het regelbereik lager zou kunnen uitvallen. Om te testen of dit waar is, zullen langsdammen moeten worden gemodelleerd in een tweedimensionaal model.

Verder zullen de maatregelen die geplaatst worden door de andere afvoerverdeling anders reageren dan in werkelijkheid. Aangezien er geen erg ingrijpende veranderingen plaatsvinden ten opzichte van het totale debiet, wordt verwacht dat het regelbereik van de maatregelen redelijk overeenkomt met de berekende waarde.

Ten opzichte van de langsdammen is het verwaarlozen van de oppervlakte van deze maatregel een punt voor discussie. Door het verwaarlozen van het oppervlak van de langsdammen is het gedeelte stroomvoerend oppervlak dat wordt toegevoegd te groot. Echter dat niet alleen, ook wordt de hoofdgeul en de oevergeul niet van elkaar gescheiden wat in werkelijkheid wel het geval is. Deze twee aannames kunnen belangrijke gevolgen hebben op het regelbereik. Een oplossing van dit probleem is wederom het modelleren van langsdammen in een tweedimensionaal model.

Door het model worden alle rivieren als recht aangenomen en zijn de profielen in model symmetrisch. Aangezien langsdammen in bochten vaak alleen in de binnenbochten worden gelegd, moet het oppervlak van de kribben in verhouding worden aangepast. Het is namelijk niet mogelijk om alleen de kribben links te verwijderen. Echter geldt er in een eendimensionaal model dat de stroomsnelheden toch overal hetzelfde zijn, waardoor deze aanname wordt gerechtvaardigd.

In dit onderzoek worden ook langsdammen toegepast in buitenbochten met een grote straal. Er zal aanvullend onderzoek nodig zijn op het gebied van erosie of deze langsdammen geplaatst mogen worden. Indien er teveel erosie optreedt, moet er oeverbescherming worden toegepast of de plaatsing van langsdammen moet geheel achterwegen worden gelaten.

Een andere belangrijke aanname die gemaakt is in dit onderzoek is op het gebied van wrijving. De aanname is op dit moment gedaan dat dezelfde wrijvingscoëfficiënten worden gebruikt als bij de kribben en de uiterwaard. Zeker bij een oevergeulverlaging kan het ook mogelijk zijn dat dezelfde wrijving moet worden toegepast als in de hoofdgeul. Het verschil in regelbereik kan in het scenario Hoge afvoer & storm oplopen tot $36 \text{ m}^3/\text{s}$ en in het scenario Piekafvoer tot $57 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tot slot dient er ook gekeken te worden naar de kosten van deze maatregel en de verandering in het landschap die deze maatregel met zich meebrengt.

10 Aanbeveling

Vanuit dit rapport komen een aantal zaken naar voren die aanbevolen kunnen worden voor nader onderzoek.

In dit onderzoek zijn de beperkingen van het huidige model zichtbaar geworden, daarom is het nuttig om langsdammen uit te testen in een model waar alle recente en toekomstige wijzigingen, zoals de Ruimte voor de rivier projecten, in het Nederlandse rivierstelsel zijn verwerkt. Zo kan een realistischer beeld worden verkregen van de afvoerverdeling en daarmee ook een nauwkeuriger meting van het regelbereik.

Verder is het raadzaam om de langsdammen te testen in een tweedimensionaal model. Zo kunnen de juiste afmetingen van de langsdammen worden ingevoerd en wordt een realistischer beeld geschetst van de stroomsnelheden in de oevertgeul, waardoor een betrouwbaarder beeld wordt verkregen van het verhang en de diverse waterstanden. Dit leidt vervolgens tot een nauwkeurigere afvoerverdeling.

Ook de vraag onder welke omstandigheden langsdammen in de buitenbocht kunnen worden geplaatst, zonder dat er teveel erosie plaatsvindt, kan verder worden onderzocht. Als hier een antwoord op gevonden wordt, kunnen er namelijk op zoveel mogelijk plekken langsdammen worden aangelegd, waardoor het regelbereik wordt gemaximaliseerd.

Aangezien de maatregel Langsdammen ook in andere situaties dan met hoogwater geldt moet er ook gekeken worden wat er in deze situaties gebeurt. Dit betekent dat de drempelhoogte bepaald moet worden, zodat op de juiste momenten de oevertgeul mee stroomt. Verder kan worden gekeken of de langsdammen een stukje van de hoofdgeul kunnen verkleinen, zodat er meer waterhoogte ontstaat in de laagwaterscenario's. De scheepvaart kan zo langer behouden blijven. Wel moet er dan worden gekeken of bij hoogwater het water nog voldoende doorstroomt.

Tot slot zal er na 32,5 km in het scenario Piekafvoer een waterstandsverhoging op de Waal optreden. Er dient gecontroleerd te worden of de dijken vanaf deze 32,5 km tegen deze waterstandsverhoging bestand zijn. Indien dit niet het geval is, zal er een onderzoek moeten plaatsvinden waarin de mogelijkheden, zoals dijkverhoging en het plaatsen van langsdammen, worden onderzocht om deze waterstandsverhoging tegen te gaan.

Nawoord

De acht weken die hebben geleid tot dit Bachelor eindwerk zijn zeer leerzaam geweest. Voor het eerst op de universiteit heb ik echt onderzoek gedaan. Het was hierbij zeer leerzaam om te leren werken met een model en de problemen die dat met zich meegeeft. Naast het model SOBEK op zichzelf, zal ik de kennis die opgedaan is zeker nog van toepassing komen in de Master van mijn studie en wellicht in mijn verdere loopbaan.

Verder heb ik in dit eindwerk veel kennis en begrip opgedaan over het Nederlandse Rivierenstelsel. Dit komt hoofdzakelijk door de Voorstudie die in het eerste weken van het eindwerk gedaan. Zeker bij de laagwaterscenario's was bij mij veel kennis afwezig over dit onderwerp. Daarnaast heb ik ook veel geleerd over het nemen van maatregelen in de rivier en dan vooral wat de invloed is op de afvoerverdeling.

Ten slotte is het erg bijzonder geweest om samen te werken met vier mensen die voor mijn gevoel qua kennis, kunde en betrokkenheid redelijk op hetzelfde niveau in hun studie zitten. Waar ik gewend was om meestal in een project of gezamenlijk werkstuk de kar te trekken, was dat in dit geval totaal niet nodig. Ik heb het bijzonder gewaardeerd dat het mogelijk was om een langere tijd samen te werken in een gemeenschappelijk deel. Maar ook de samenwerking tijdens het individuele deel heb ik erg op prijs gesteld.

Literatuurlijst

1. Waterschappen. *Nederland leeft met water*. www.nederlandleeftmetwater.nl. Geraadpleegd 10 juni 2012.
2. Schropp, M. (2012). *MEMO Aanpassing afvoerverdeling t.b.v. DPRD*. Waterdienst.
3. Rijkswaterstaat (2011). *Langsdammen Waal*. Rijkswaterstaat. http://www.rws.nl/images/Factsheet%20Langsdammen%20Waal_tcm174-306178_tcm174-289354.pdf. Geraadpleegd 6 juni 2012.
4. Rijkswaterstaat. *Langsdammen Waal*. http://www.rijkswaterstaat.nl/water/plannen_en_projecten/voorwegen/waal/kribverlaging_waal/langsdammen_waal/. Geraadpleegd 6 juni 2012.
5. Watersportbank. *Artistieke Impressie Langsdam*. http://www.watersportbank.nl/foto/natuur-milieu/langsdam_impressie.jpg. Geraadpleegd 6 juni 2012.
6. Geopersdienst. *Langsdam in de Waal*. <http://www.geopersdienst.nl/wp-content/uploads/2012/02/langsdaminwaal7.png1328690833>. Geraadpleegd 6 juni 2012.
7. Rijkswaterstaat (2011). *Besluit langsdammen uitgesteld*. http://www.rijkswaterstaat.nl/water/plannen_en_projecten/voorwegen/waal/kribverlaging_waal/nieuws/nieuwsbrieven/november_2011/besluit-langsdammen-uitgesteld.aspx. Geraadpleegd 6 juni 2012.
8. Google (2010). *Google Maps*. <http://maps.google.nl/maps>. Geraadpleegd 11 mei 2012.
9. Rijkswaterstaat (2011). *Vragen en antwoorden informatieavond Dreumel*. http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Vragen%20en%20antwoorden%20informatieavond%20Dreumel%2C%2021%20april%202011_tcm174-307601.pdf. Geraadpleegd 6 juni 2012.
10. Rijkswaterstaat(2012). *Bijlage ABC - Ingrepen Kribverlaging Waal fase 3 en Langsdammen Wamel - Ophemert*. Rijkswaterstaat.
11. Battjes, J.A. (2002). *Vloeistofmechanica CT2100*. Delft: TU Delft - Faculteit CitG.
12. Deltares. *SOBEK*.
13. Microsoft. *Bing Maps*. <http://www.bing.com/maps>. Geraadpleegd 10 mei 2012.

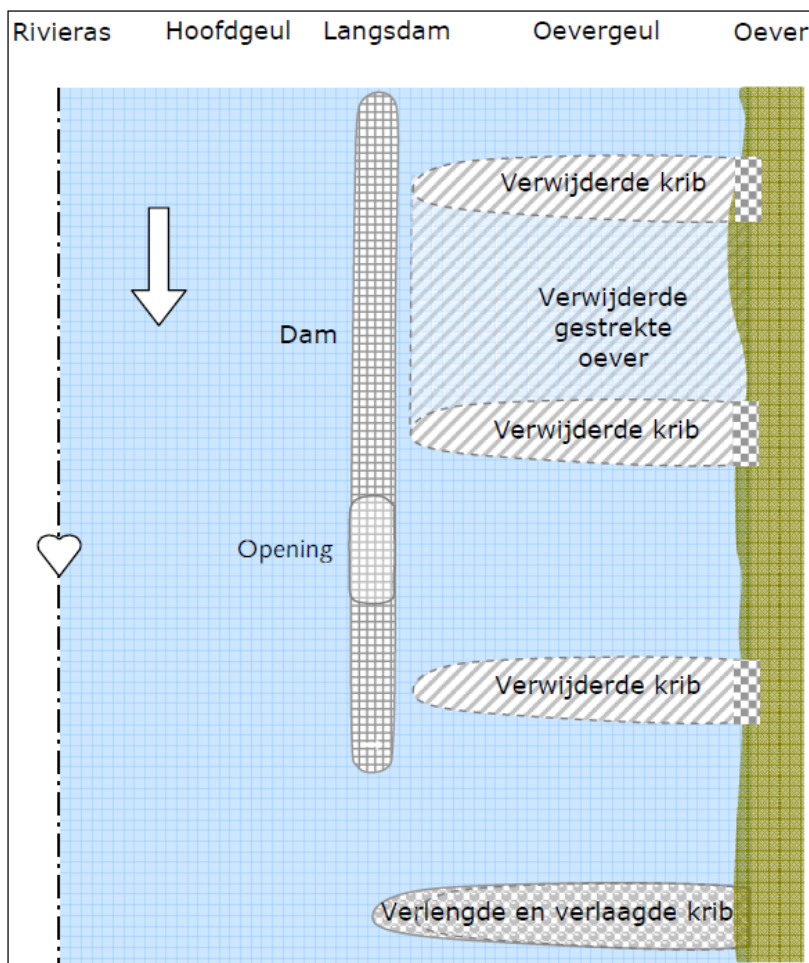
Bijlagen

Bijlage A: Beschrijving 'Langsdammen in de Waal'

In deze bijlage wordt een gedetailleerdere omschrijving gegeven over het project 'Langsdammen in de Waal'.

In de Waal worden 2 langsdammen aangelegd met 11 openingen. De hoogte van de langsdammen komt overeen met de hoogte van de huidige kribben, welke ongeveer op +2,5 m ten opzichte van Overeengekomen Lage Rivierwaterstand (OLR) liggen. De breedte van de langsdam op de kruin is ongeveer 2 m en de taluds hebben een helling van 1:2,5. De langsdammen worden ongeveer 30 m extra de vaargeul in geplaatst ten opzichte van de kop van de huidige kribben. De huidige kribben staan gemiddeld 100 dagen per jaar onder water. Dit zal ook het geval zijn bij de langsdammen.

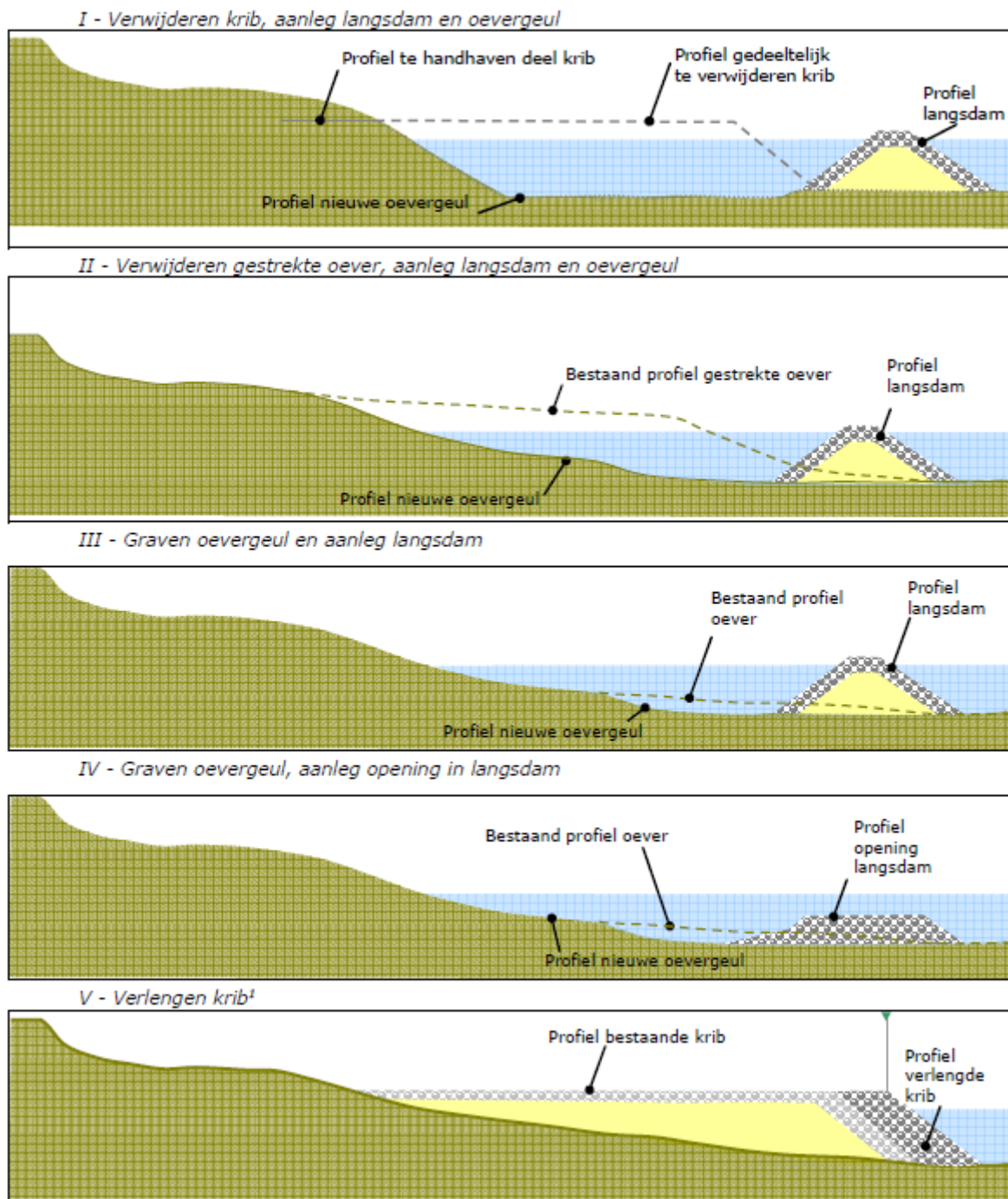
In figuur b.1 is schematisch weergegeven hoe de langsdammen aangelegd zullen worden. Zoals in figuur b.1 te zien is worden de huidige kribben verwijderd en wordt de eerste kribben verlengd en verlaagd. Door het verwijderen van de kribben ontstaat er een oeversgeul van ongeveer 90 m breed. De oeversgeul mag maximaal 2 meter verdiept worden aan de kant van de langsdam en loopt schuin op met een helling van 1:7. Deze verdieping is nodig om het effect van de opstuwung door het aanleggen van de langsdam te compenseren. De hydraulische weerstand van de oeversgeul wordt voldoende laag gehouden om sediment en ijs af te voeren.



Figuur b.1 – Schematisatie van de aanleg van een langsdam (10)

In de langsdammen zijn openingen gemaakt die altijd onder water liggen. Met deze openingen kan onder andere het sediment en het water goed doorstromen en tegelijkertijd worden verdeeld over de twee geulen. Door de hoogte van de opening te variëren kan deze verdeling worden veranderd. Echter zijn deze openingen niet regelbaar.

Bij figuur b.1 horen de dwarsdoorsneden die zijn weergegeven in figuur b.2. Dwarsdoorsnede V geeft een krib benedenstrooms van de langsdam weer en betreft dus niet de drempel aan het begin van de langsdam.



Figuur b.2 – Doorsnede aanleg langsdam (10)

Bijlage B: Berekening bij de Hypothese

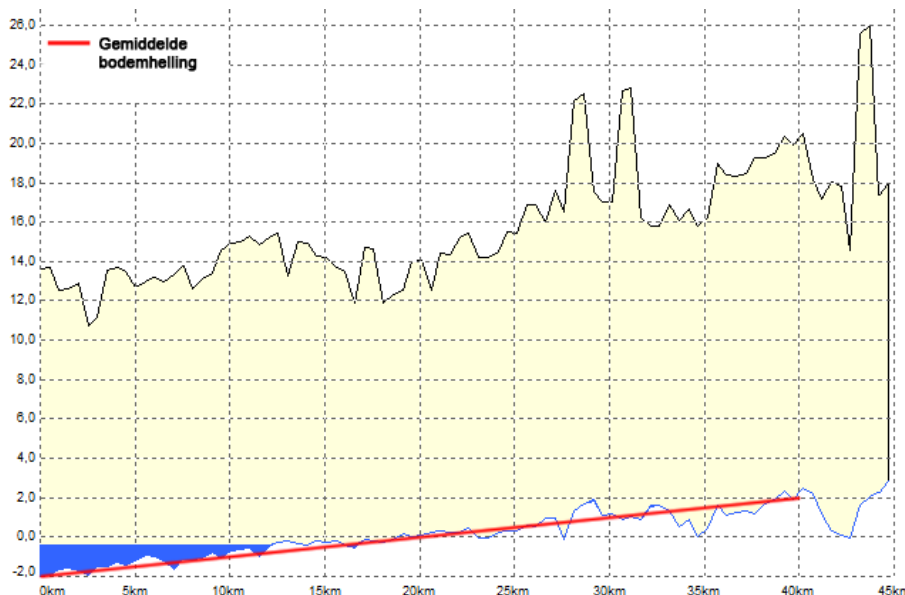
In deze bijlage zullen de berekeningen die gebruikt zijn in het Hoofdstuk 5 te vinden zijn. In deze berekeningen worden veel aannames gedaan en deze berekeningen kunnen dus alleen maar gebruikt worden om een orde grootte schatting te maken. (11)

Aannames

Bodemverhang

De eerste aanname die gemaakt is, is de bodemhelling over de Waal. In figuur b.3 is de bodemhelling van de Waal te zien vanaf het splitsingspunt (rechts op 45 km) tot het Amsterdam-Rijnkanaal (links op 0 km). Figuur b.3 geeft ook de maximale hoogte van het profiel weer, zoals deze in SOBEK zijn ingevoerd. Deze hoogte komen niet overeen met de werkelijke dijkhoogte. Te zien is dat 5 km na het splitsingspunt de bodem redelijk lineair afneemt. De volgende benadering wordt gemaakt.

$$i_b \approx \frac{2 - -2}{40 \cdot 10^3} = 1 \cdot 10^{-4} \quad (7)$$

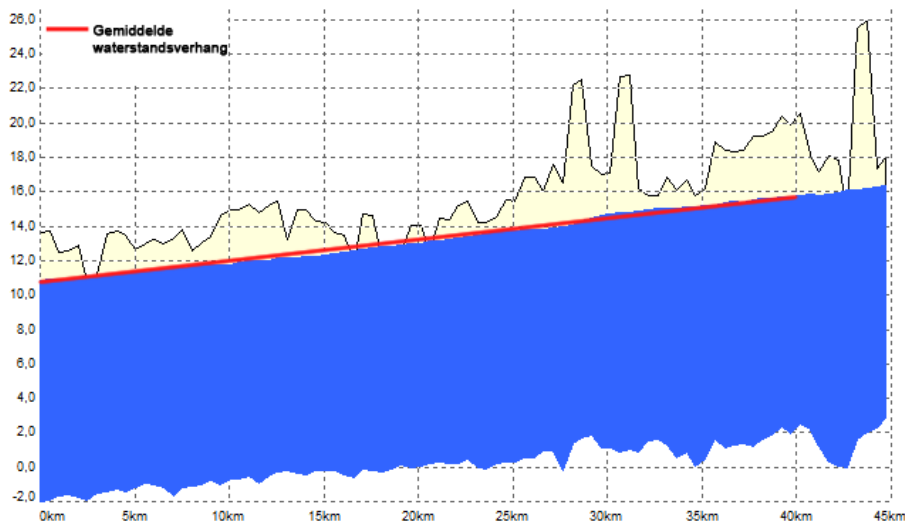


Figuur b.3 – Bodemhelling van de Waal vanaf het Splitsingspunt tot het Amsterdam Rijnkanaal (12)

Waterstandsverhang

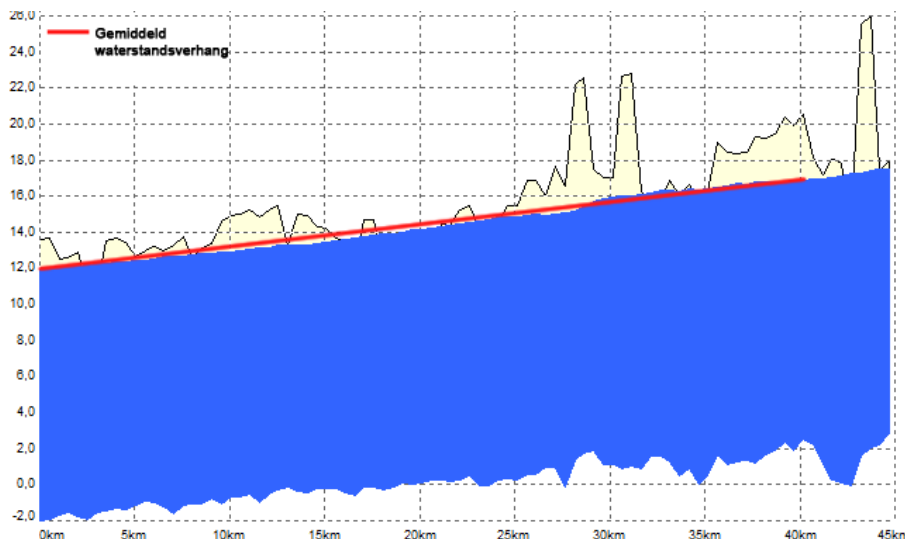
Om het waterstandsverhang te bepalen wordt hetzelfde gebied bekeken, namelijk van het splitsingspunt (rechts op 45 km) tot het Amsterdam-Rijnkanaal (links op 0 km). In figuur b.4 en figuur b.5 is het waterstandsverhang te zien in de situatie met een debiet van 14.000 m³/s en 18.000 m³/s bij Lobith. De volgende benadering wordt gemaakt:

$$i_{w,14.000 \text{ m}^3/\text{s}} \approx \frac{16 - 11}{40 \cdot 10^3} = 1,25 \cdot 10^{-4} \quad (8)$$



Figuur b.4 – Waterniveau Waal bij 14.000 m³/s bij Lobith (12)

$$i_{w,18.000 \text{ m}^3/\text{s}} \approx \frac{17 - 12}{40 \cdot 10^3} = 1,25 \cdot 10^{-4} \quad (9)$$



Figuur b.5 – Waterniveau Waal bij 18.000 m³/s bij Lobith (12)

Deze twee waarden ((8) en (9)) zijn gelijk. Dus voor hoge afvoeren kan een constant waterstandsverhang worden aangenomen.

Bij het bepalen van dit waterstandsverhang is een ordegrootte schatting voldoende aangezien deze alleen gebruikt wordt om te bepalen of Re^* (Reynoldsgetal vermenigvuldigt met een parameter) groter is dan 70. Indien dit het geval is mag de wandstroming worden gezien als ruw en mag de formule in vergelijking (17) gebruikt worden.

Viscositeit

De kinematische viscositeit (ν) van water bij 10 °C is $1,33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Hydraulische straal

De Waal is redelijk breed en daarom is het een redelijke aanname dat de hydraulische straal gelijk is aan de gemiddelde diepte ($R \approx d_{\text{gem}}$). Aangezien er geen gegevens beschikbaar zijn van de gemiddelde diepte van de Waal, zal er eerst met de maximale diepte worden gerekend. Deze maximale diepte is wel beschikbaar in SOBEK (zie figuur b.4 en figuur b.5). Later zal een controle plaatsvinden of deze aanname een goede ordegrootte schatting geeft.

$$d_{14.000 \text{ m}^3/\text{s}} \approx R_{14.000 \text{ m}^3/\text{s}} \approx \frac{(11 - 2) + (16 - 2)}{2} = 13,5 \text{ m} \quad (10)$$

$$d_{18.000 \text{ m}^3/\text{s}} \approx R_{18.000 \text{ m}^3/\text{s}} \approx \frac{(12 - 2) + (17 - 2)}{2} = 14,5 \text{ m} \quad (11)$$

Weerstandscoefficient

Verder moet er één weerstandscoefficiënt (c_f) worden bepaald over de gehele lengte van rivier. Aangezien er uiteindelijk met een model in SOBEK gerekend gaat worden, worden hier ook de weerstandswaarden uitgethaald. Deze zijn verschillend over lengte, dwarsprofiel en per debiet. De volgende gemiddelde waarden kunnen uit SOBEK worden gehaald:

$$C_{\text{gem. hoofdgeul}} \approx 43,6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (12)$$

$$k_{n, \text{ uiterwaard}} \approx 0,20 \text{ m} \quad (13)$$

Chézy (12) wordt gebruikt in de hoofdgeul en White-Colebrook (13) wordt gebruikt bij de kribben en de uiterwaard. Om deze twee parameters te vergelijken worden ze omgeschreven naar een c_f -waarde:

$$c_{f, \text{ hoofdgeul}} = g / C^2 = 9,81 / 43,6^2 \approx 0,0052 \quad (14)$$

Het omrekenen van de k_n -waarde vraagt enkele extra stappen. Eerst dient bekeken te worden welke formule gebruikt mag worden:

$$u_* = \sqrt{g \cdot R \cdot i_w} = \sqrt{9,81 \cdot 13,5 \cdot 1,25 \cdot 10^{-4}} \approx 0,13 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (15)$$

$$Re_* = \frac{u_* \cdot k}{\nu} = \frac{0,13 \cdot 0,20}{1,33 \cdot 10^{-6}} \approx 19 \cdot 10^3 \quad (16)$$

Bij een grotere hydraulische straal (R) wordt de Re_* alleen maar groter. Dit houdt in dat $Re_* > 70$ en de volgende formule kan worden gebruikt:

$$\frac{1}{\sqrt{c_f}} = 5,75 \cdot \log \left(12 \cdot \frac{R}{k} \right) \quad (17)$$

Omschrijven geeft:

$$c_f = \left(\frac{1}{5,75 \cdot \log \left(12 \cdot \frac{R}{k} \right)} \right)^2 \quad (18)$$

Als vergelijking (13), (10) en (11) worden ingevuld in vergelijking (18) dan kan de c_f -waarde worden bepaald:

$$c_{f_{14.000 \frac{m^3}{s}, uiterwaard}} \approx 0,0036 \quad (19)$$

$$c_{f_{18.000 \frac{m^3}{s}, uiterwaard}} \approx 0,0035 \quad (20)$$

$$c_{f_{gem, uiterwaard}} \approx 0,0035 \quad (21)$$

Voor de berekening moet één c_f -waarde worden aangehouden. De twee c_f -waarde in de hoofdgeul en in de uiterwaard worden daarom gemiddeld. Hierbij wordt de aanname gedaan dat over dit traject de verhouding tussen het stroomvoerend oppervlak van de hoofdgeul en die van de uiterwaard ongeveer gelijk zijn.

$$c_{f_{gem}} \approx \frac{0,0035 + 0,0052}{2} \approx 0,0044 \quad (22)$$

Gemiddelde maximale stroomvoerende breedte

In de profielen van SOBEK is ongeveer om de 1,5 km gekeken naar de maximale stroomvoerende breedte. Uit deze 26 punten is de gemiddelde maximale stroomvoerende breedte bepaald.

$$B_s \approx 1050m \quad (23)$$

Berekeningen

Aan de hand van de aannames die zijn gemaakt, kunnen de volgende berekeningen worden gemaakt.

Grensdiepte en debiet per eenheid van breedte

Bij de grensdiepte is de aanname gebruikt van vergelijking (23). De grensdiepte wordt bepaald voor 14.000 m³/s en 18.000 m³/s.

$$q_{14.000} = \frac{Q}{B_s} = \frac{14000}{1050} \approx 13,33 m^2/s \quad (24)$$

$$d_{g,14.000} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \approx 2,63 m \quad (25)$$

$$q_{18.000} = \frac{Q}{B_s} = \frac{18000}{1050} \approx 17,14 \text{ m}^2/\text{s} \quad (26)$$

$$d_{g,18.000} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \approx 3,11 \text{ m} \quad (27)$$

Evenwichtsdiepte

De evenwichtsdiepte kan worden bepaald aan de hand van de aannames en berekeningen uit de vergelijkingen (7), (22), (24) en (26). De evenwichtsdiepte wordt bepaald voor 14.000 m³/s en 18.000 m³/s.

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{c_f}{i_b} \cdot \frac{q^2}{g}} \text{ met } q = \frac{Q}{B_s} \quad (28)$$

$$d_{e,14.000} = \sqrt[3]{\frac{0,0044}{1 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{13,33^2}{9,81}} = 9,27 \approx 9,3 \text{ m} \quad (29)$$

$$d_{e,18.000} = \sqrt[3]{\frac{0,0044}{1 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{17,14^2}{9,81}} = 10,96 \approx 11,0 \text{ m} \quad (30)$$

Controle

In vergelijking (10) en (11) is aangenomen dat de gemiddelde diepte gelijk is aan de maximale diepte. Aangezien een hoogwatergolf een langzame verandering is in de stroom is de aanname dat de evenwichtsdiepte gelijk is aan de maximale waterdiepte een redelijk goede benadering.

Invullen in vergelijking (15) en (16) geeft een Re* die veel groter is als 70. Dit houdt in dat vergelijking (17) gebruikt mag worden.

Door de veranderde hydraulische straal in vergelijking (10) en (11). Betekent dat de c_f-waarde uit de vergelijkingen (19), (20), (21) en (22) veranderd. Deze wordt:

$$c_{f_{14.000 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, \text{uiterwaard}}} \approx 0,0040 \quad (31)$$

$$c_{f_{18.000 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, \text{uiterwaard}}} \approx 0,0038 \quad (32)$$

$$c_{f_{\text{gem}, \text{uiterwaard}}} \approx 0,0039 \quad (33)$$

$$c_{f_{\text{gem}}} \approx \frac{0,0039 + 0,0052}{2} \approx 0,0046 \quad (34)$$

Ten slotte kan de evenwichtsdiepte, zie vergelijking (29) en (30), opnieuw worden uitgerekend:

$$d_{e,14.000} = \sqrt[3]{\frac{0,0046}{1 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{13,33^2}{9,81}} = 9,27 \approx 9,4 \text{ m} \quad (35)$$

$$d_{e,18.000} = \sqrt[3]{\frac{0,0044}{1 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{17,14^2}{9,81}} = 10,96 \approx 11,1 \text{ m} \quad (36)$$

De afwijking voor een ordegrootte schatting zijn minimaal. Hierom kan er verder gerekend worden met deze evenwichtsdieptes.

Aanpassingslengte

De aanpassingslengte kan nu bepaald worden aan de hand van de volgende formule:

$$L = \frac{1 - i_b/c_f}{3i_b} d_e \quad (37)$$

$$L_{14.000} = \frac{1 - i_b/c_f}{3i_b} d_e = \frac{1 - 1 \cdot 10^{-4}/0,0046}{3 \cdot 10^{-4}} \cdot 9,4 = 30,652 \text{ km} \approx 31 \text{ km} \quad (38)$$

$$L_{18.000} = \frac{1 - i_b/c_f}{3i_b} d_e = \frac{1 - 1 \cdot 10^{-4}/0,0046}{3 \cdot 10^{-4}} \cdot 11,1 = 36,2 \text{ km} \approx 36 \text{ km} \quad (39)$$

De aanpassingslengte is de lengte waar de maatregel nog een effect heeft van 37% bovenstrooms.

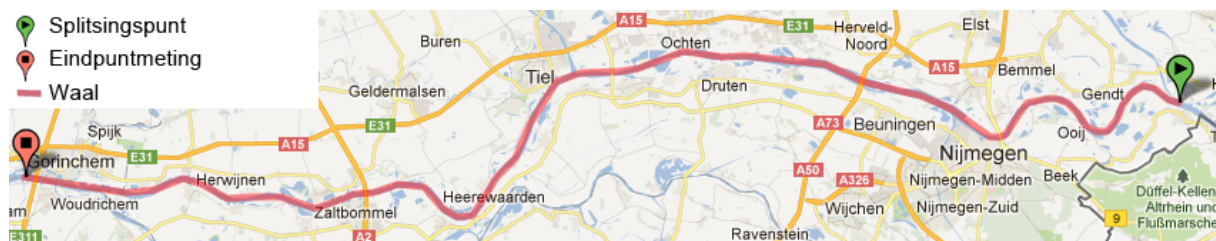
Aan de hand van de aanpassingslengte kan het verwachte aanpassingspercentage worden bepaald op verschillende locaties aan de hand van de volgende formule:

$$\text{Percentage aanpassing bij splitsingspunt} = e^{\frac{\text{afstand tot splitsingspunt}}{L}} \quad (40)$$

Om een indruk te geven van het effect is van een aantal plaatsen het aanpassingspercentage in tabel b.1 weergegeven. In figuur b.6 is een kaartje gegeven met daarop de Waal en de plaatsen die zijn opgenomen in tabel b.1.

Tabel b.1 - Aanpassing op het splitsingspunt

Locatie	Afstand tot splitsingspunt	Aanpassing Hoge afvoer & storm	Aanpassing Piekafvoer
Ooij	8 km	77%	80%
Nijmegen	15 km	62%	66%
Druten	35 km	32%	38%
Tiel	45 km	23%	29%
Zaltbommel	65 km	12%	16%
Gorinchem	85 km	6%	9%



Figuur b.6 – Meetlocaties aanpassingslengte Waal (8)

Bijlage C: Invoer langsdam binnenbocht

In SOBEK is het niet mogelijk om aan één kant van het profiel een aanpassing te doen en aan de andere kant niet. Echter worden er wel langsdammen toegepast die alleen in de binnenbocht liggen. In deze bijlage zal een beschrijving te vinden zijn hoe als nog in SOBEK ingevoerd zal worden dat er langsdammen worden toegepast in plaats van kribben.

Aanpak en aannames

De grootte van de kribben in de binnenbocht en in de buitenbocht zijn niet gelijk. Zo verschillende de lengte en de hoogte van deze kribben. De hoogte van de kribben in de Waal is onbekend, terwijl de lengte van deze kribben goed te achterhalen is. (8) (13) Om een benadering te maken van de verhouding van de oppervlaktes tussen de kribben wordt de aanname gedaan dat de hoogte van de kribben in de binnenbocht en de buitenbocht gelijk zijn, zie figuur b.7. Het volgende kan worden afgeleid over het oppervlak dat behouden moet blijven:

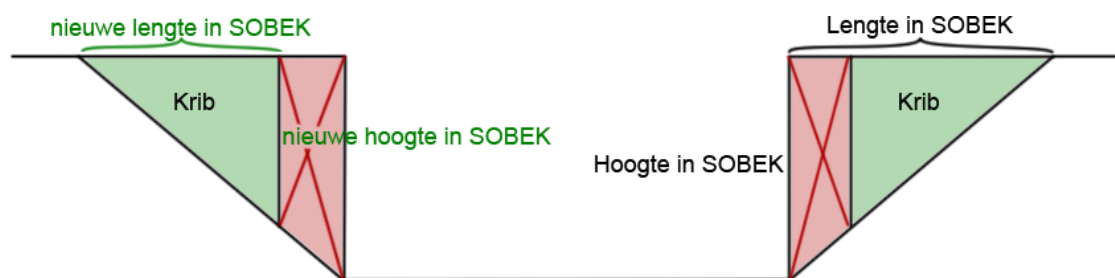
$$\frac{A_{bui}}{A_{tot}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot l_{bui} \cdot h}{\frac{1}{2} \cdot l_{bui} \cdot h + \frac{1}{2} \cdot l_{bin} \cdot h} = \frac{l_{bui}}{l_{bui} + l_{bin}} \quad (41)$$



Figuur b.7 – Geschematiseerde situatie van de werkelijkheid

Deze verhouding, zie vergelijking (41), wordt gebruikt om te bepalen in hoeverre het oppervlak van de symmetrische kribben moet worden verkleind. Hierbij wordt de aanname gedaan dat er oppervlakte verwijderd mag worden in de lengterichting van de kribben. Aangezien SOBEK een eendimensionaal model is met overal gelijke stroomsnelheden maakt het niet uit waar het oppervlak wordt verwijderd. Deze aanname wordt geschematiseerd in figuur b.8 en resulteert in de volgende vergelijking:

$$\frac{A_{bui}}{A_{tot}} = \frac{A_{SOBEK,nieuw}}{A_{SOBEK,oud}} \quad (42)$$



Figuur b.8 – Situatie in SOBEK

Berekening

Aan de hand van deze aanname kan berekend worden wat de nieuwe lengte en hoogte van de kribben in SOBEK worden.

Allereerst wordt daarvoor vergelijking (42) ingevuld:

$$\frac{l_{bui}}{l_{bui} + l_{bin}} = \frac{2 \cdot \frac{1}{2} \cdot l_{SOBEK,nieuw} \cdot h_{SOBEK,nieuw}}{2 \cdot \frac{1}{2} \cdot l_{SOBEK,oud} \cdot h_{SOBEK,oud}} \quad (43)$$

Aangezien de bodem van de krib in SOBEK lineair verloopt geldt de volgende relatie:

$$h_{SOBEK,nieuw} = \frac{h_{SOBEK,oud}}{l_{SOBEK,oud}} \cdot l_{SOBEK,nieuw} \quad (44)$$

Vergelijking (44) invullen in vergelijking (43) geeft:

$$\frac{l_{bui}}{l_{bui} + l_{bin}} = \frac{l_{SOBEK,nieuw} \cdot \frac{h_{SOBEK,oud}}{l_{SOBEK,oud}} \cdot l_{SOBEK,nieuw}}{l_{SOBEK,oud} \cdot \frac{h_{SOBEK,oud}}{l_{SOBEK,oud}}} \quad (45)$$

Omschrijven geeft de volgende formule om de nieuwe lengte van de krib te berekenen:

$$l_{SOBEK,nieuw} = \sqrt{(l_{SOBEK,oud})^2 \cdot \frac{l_{bui}}{l_{bui} + l_{bin}}} \quad (46)$$

$h_{SOBEK,nieuw}$ kan nu berekend worden aan de hand van vergelijking (44).

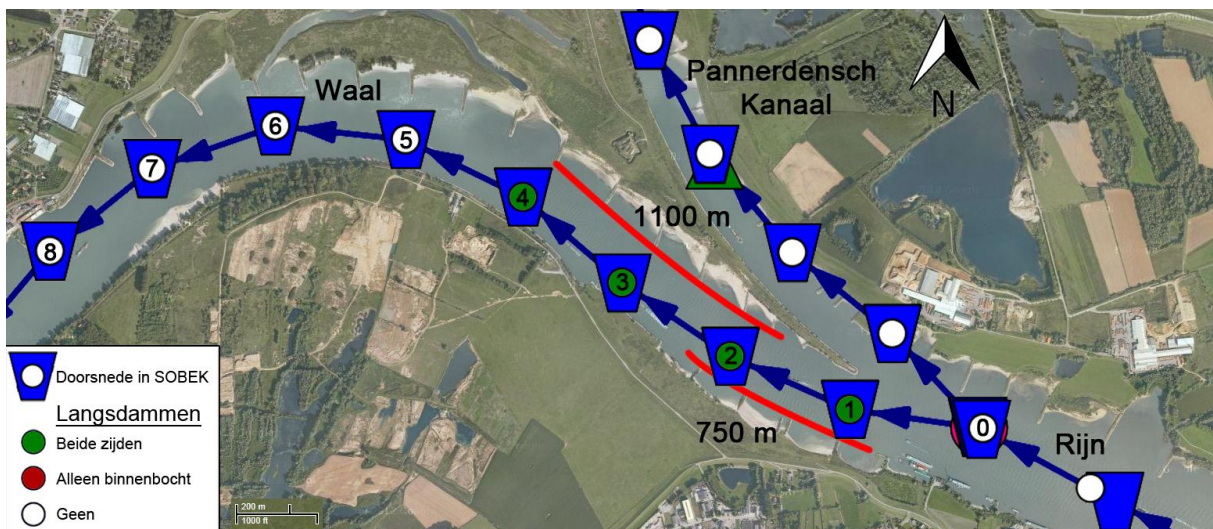
Aan de hand van deze gegevens kan berekend worden welke getallen ingevoerd moeten worden om een figuur te krijgen zoals in figuur b.8

Bijlage D: Invoer en Resultaten SOBEK

In deze bijlage wordt weergegeven wat er in het model SOBEK is ingevoerd en wat de resultaten daarvan zijn. Dit wordt eerste gedaan door stap voor stap te laten zien waar de langsdammen in de Waal gerealiseerd zijn en vervolgens wat daarvan het toegevoegde effect is. Vervolgens wordt aan het eind een overzicht gegeven van de resultaten in de vorm van tabellen en grafieken.

Vooronderzoek over kleine afstand

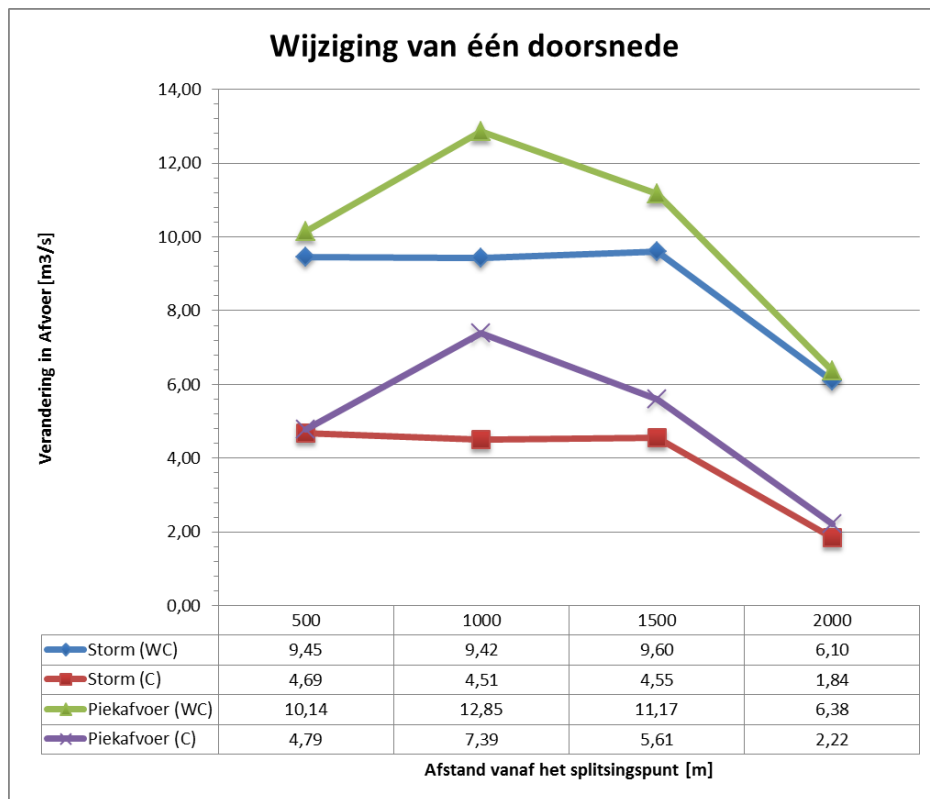
Allereerst is kort gekeken naar de effecten van langsdammen op kleine afstanden van het splitsingspunt. Dit gebied is weergegeven in figuur b.9. In dit gedeelte, zoals beschreven in Hoofdstuk 4, zijn in de eerste 2 km twee langsdammen toegepast. Dit betekent dat de punten 1 tot en met 4 moeten worden aangepast in SOBEK. Aangezien alle kribben worden verwijderd in deze zone kan het hele stroomvoerende oppervlak ter grootte van de kribben worden toegevoegd. Op het moment dat alle kribben behouden blijven wordt een groene kleur weergegeven in figuur b.9. Een rode kleur wordt weergegeven als alleen in de binnenbocht langsdammen worden aangelegd, terwijl in de buitenbocht wel kribben aanwezig zijn en ten slotte wordt een witte kleur weergegeven als er niets aan het dwarsprofiel wordt aangepast.



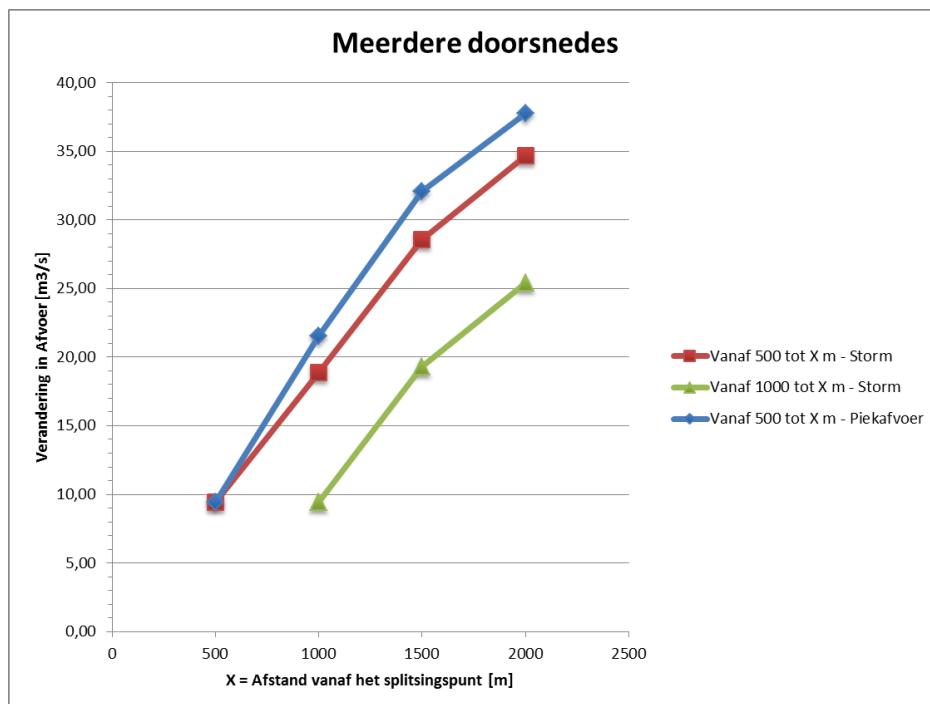
Figuur b.9 – Toepassing langsdammen van 0 tot 4 km na het splitsingspunt

Allereerst wordt gekeken wat het effect is als er maar één doorsnede wordt aangepast. Telkens wordt dus één van de punten 1 tot en met 4 (500 m tot en met 2 km) aangepast. Hierbij wordt ook direct gekeken wat het effect is van de aanname welke wrijvingscoëfficiënt (Chézy (C) of Nikuradse in White-Colebrook (WC)) wordt meegenomen ter hoogte van de langsdammen (zie Hoofdstuk 6). De resultaten van worden weergegeven in figuur b.10.

Nadat de resultaten van het wijzigen van één doorsnede zijn gevonden kan ook worden gekeken wat het effect is als meerdere doorsnedes achter elkaar worden aangepast. Hierbij wordt twee keer als startpunt de doorsnede 1 genomen in de scenario's Hoge afvoer & storm en Piekafvoer en één keer als startpunt doorsnede 2 genomen in het scenario Hoge afvoer & storm. Uit figuur b.11 kan worden afgelezen dat het aanpassen van de doorsnedes in de eerste 2 km redelijk goed bij elkaar op te tellen is.



Figuur b.10 – Resultaten na wijziging van één doorsnede in SOBEK met verschillende weerstandscoefficienten



Figuur b.11 – Resultaten na wijziging van meerdere doorsnedes vanaf 500 of 1000 m tot X m

Indien Chézy wordt toegepast in piekafvoer met doorsnede 1 tot en met 4 aangepast wordt een debietsverandering van 17,33 m³/s gevonden in plaats van 37,77 m³/s.

Vervolgonderzoek

Om duidelijk de resultaten te kunnen presenteren, volgt eerst een korte uitleg over de volgorde van het onderzoek en hoe de resultaten gepresenteerd worden.

Opbouw van het onderzoek

Het onderzoek wordt gestart bij het splitsingspunten. Direct na het splitsingspunt worden over een aantal doorsnedes, de doorsnedes liggen om de 500 m, langsdammen geplaatst. Vervolgens wordt er getest in de scenario's Hoge afvoer & storm en Piekafvoer. Nadat de resultaten bekend zijn wordt de oevergeul bij de langsdammen 1 meter verlaagd en wordt er opnieuw getest in de twee scenario's. Dit laatste wordt herhaald met een oevergeulverlaging van 2 meter.

Als hier de resultaten van bekend zijn wordt er over een aantal nieuwe doorsnedes bekeken waar en of er langsdammen worden geplaatst. Indien deze zijn gedefinieerd, worden weer de drie maatregelen (langsdammen met verlaging van de oevergeul met 0, 1 en 2m) getest in de twee hoogwatersscenario's. Deze stappen worden vervolgens herhaald tot na 45 km bij het Amsterdam-Rijnkanaal is aangekomen.

Manier van presenteren

Allereerst wordt toegelicht op welke locatie de langsdammen worden geplaatst. In deze tekst wordt links en rechts gezien vanuit de positie dat men stroomafwaarts de Waal overgaat oftewel richting zee. De toelichting wordt gedaan aan de hand van de afbeeldingen figuur b.12 tot en met figuur b.31.

Vervolgens worden er per pagina twee tabellen gegeven met de resultaten uit het model SOBEK. Dit zijn de tabellen tabel b.3 tot en met tabel b.42. Een voorbeeld van een dergelijke tabel is tabel b.2.

Tabel b.2 – Resultaten langsdammen van 0,5 tot 2 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i _w [·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				1,63	16,35
Ld.	586	8600,60	34,67	34,67	6,4	1,38	16,32
Ld. -1m	991	8620,59	54,66	54,66	5,9	1,23	16,31
Ld. -2m	1396	8639,70	73,77	73,77	5,5	1,07	16,29

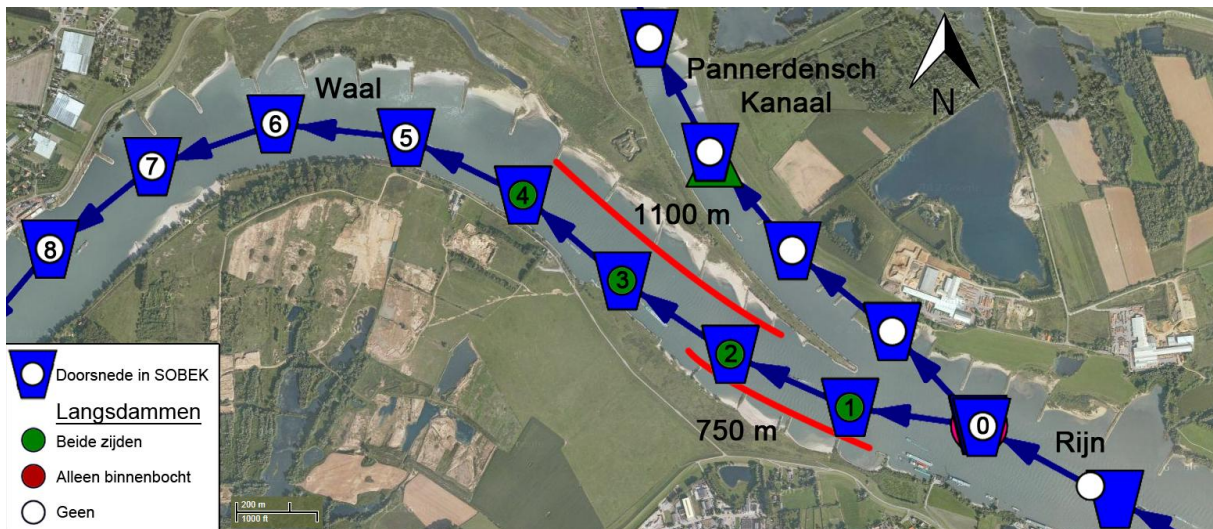
In deze tabel worden de volgende afkortingen gebruikt:

Basis	= Scenario in SOBEK zonder maatregelen
Ld.	= Langsdam
Ld. -1m	= Langsdam met een oevergeul die 1 m is uitgediept
X [m]	= Beginpunt maatregel
Y [m]	= Eindpunt maatregel
A [m ²]	= Grootte van het stroomvoerend oppervlak van de oevergeul van de langsdam
Q _{waal} [m ³ /s]	= Debiet door de waal
ΔQ _{maat} [m ³ /s]	= Regelbereik van de besproken maatregel van X tot Y km
ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	= Regelbereik van de tot dan toe besproken maatregelen van 0,5 tot Y km
ΔQ _{maat} /A [·10 ⁻²]	= Maat om het rendement van de oevergeul te bepalen
i _w [·10 ⁻⁴]	= Waterstandsverhang van de rivier gezien over de lengte X tot Y km
h [m]	= Waterstand op de Waal bij de Pannerdensch Kop (0 km)

Ten slotte wordt er een korte verklaring gegeven over de verkregen resultaten.

Langsdammen van 0,5 tot 2 km

De keuze van de locatie van de langsdammen is toegelicht in Hoofdstuk 4.



Figuur b.12 – Toepassing langsdammen van 0 tot 4 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.3 – Resultaten langsdammen van 0,5 tot 2 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				1,63	16,35
Ld.	586	8600,60	34,67	34,67	6,4	1,38	16,32
Ld. -1m	991	8620,59	54,66	54,66	5,9	1,23	16,31
Ld. -2m	1396	8639,70	73,77	73,77	5,5	1,07	16,29

Tabel b.4 – Resultaten langsdammen van 0,5 tot 2 km in het scenario Piekafvoer

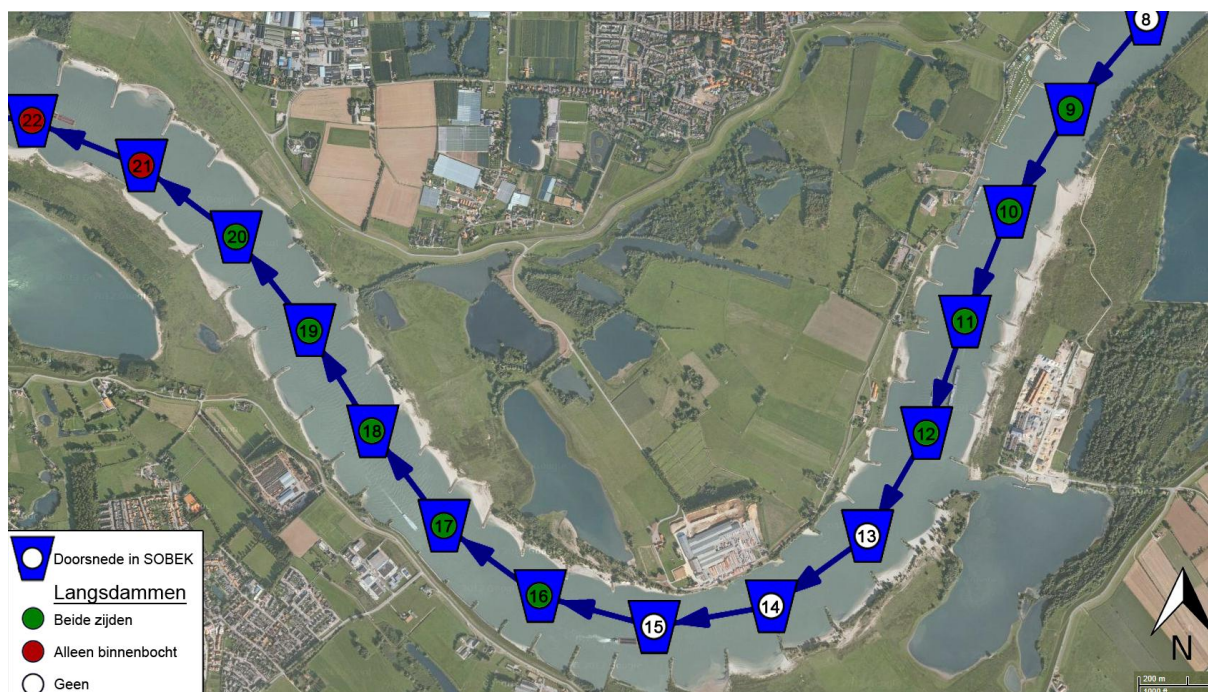
	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				1,66	17,49
Ld.	586	10799,87	37,77	37,77	6,4	1,38	17,47
Ld. -1m	991	10820,25	58,15	58,15	5,9	1,22	17,45
Ld. -2m	1396	10839,56	77,46	77,46	5,5	1,05	17,44

Verklaring resultaten

Direct na het splitsingspunt is het effect van de maatregel relatief groot, omdat men nauwelijks te maken heeft met aanpassingslengte. De vergroting van het stroomvoerend oppervlak is relatief groot en het verhang is daar ook relatief groot. Dit laatste zorgt er ook voor dat de invloed die het oppervlak heeft goed bijdraagt aan de verandering in debietsverdeling.

Langsdammen van 4,5 tot 6 km

Vanaf doorsnede 9 tot en met 12 volgt een redelijk recht stuk van 1,5km en hier worden aan beide zijden langsdammen toegepast. Bij doorsnede 13 tot en met 15 is er een scherpe bocht met nauwelijks kribben in de binnenbocht. Hier worden dan ook geen langsdammen geplaatst.



Figuur b.13 – Toepassing langsdammen van 4,5 tot 6 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.5 – Resultaten langsdammen van 4,5 tot 6 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				1,13	16,35
Ld.	651	8607,56	6,96	41,63	1,1	1,11	16,32
Ld. -1m	1134	8632,65	12,06	66,72	1,1	1,09	16,30
Ld. -2m	1617	8656,77	17,07	90,84	1,1	1,07	16,28

Tabel b.6 – Resultaten langsdammen van 4,5 tot 6 km in het scenario Piekafvoer

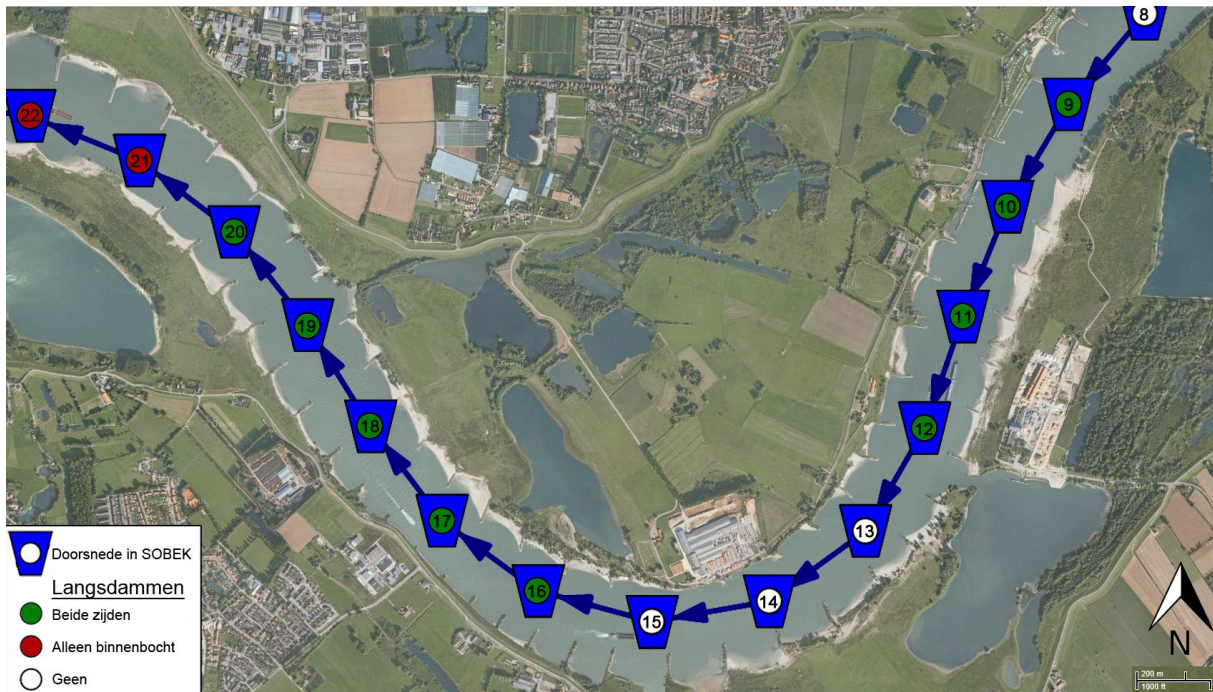
	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				1,20	17,49
Ld.	651	10807,02	7,15	44,92	1,1	1,19	17,46
Ld. -1m	1134	10832,52	12,27	70,42	1,1	1,18	17,44
Ld. -2m	1617	10856,81	17,25	94,71	1,1	1,17	17,42

Verklaring resultaten

Het effect van deze maatregel is duidelijk kleiner dan direct bij het splitsingspunt. Dit komt omdat deze maatregel op een grotere afstand wordt toegepast dan direct rond het splitsingspunt. Daarnaast is het verhang van bij de maatregel over het algemeen kleiner dan bij de maatregel van 0,5 tot 2 km. Dit wordt ruim niet teniet gedaan door het grotere oppervlak dat wordt toegevoegd aan het stroomvoerende deel van de rivier.

Langsdammen van 8 tot 10 km

Na doorsnede 15 is de bocht weer zo goed als ten einde en komt er weer een recht stuk van ongeveer 2 km waar aan beide kanten van de rivier langsdammen toegepast zullen worden. De locatie van deze maatregel is vlak bij het dorpje Ooij (linksonder in figuur b.14).



Figuur b.14 – Toepassing langsdammen van 8 tot 10 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.7 – Resultaten langsdammen van 8 tot 10 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				1,08	16,35
Ld.	838	8616,83	9,27	50,9	1,1	0,96	16,31
Ld. -1m	1429	8648,33	15,68	82,4	1,1	0,88	16,29
Ld. -2m	2020	8679,00	22,23	113,07	1,1	0,81	16,26

Tabel b.8 – Resultaten langsdammen van 8 tot 10 km in het scenario Piekafvoer

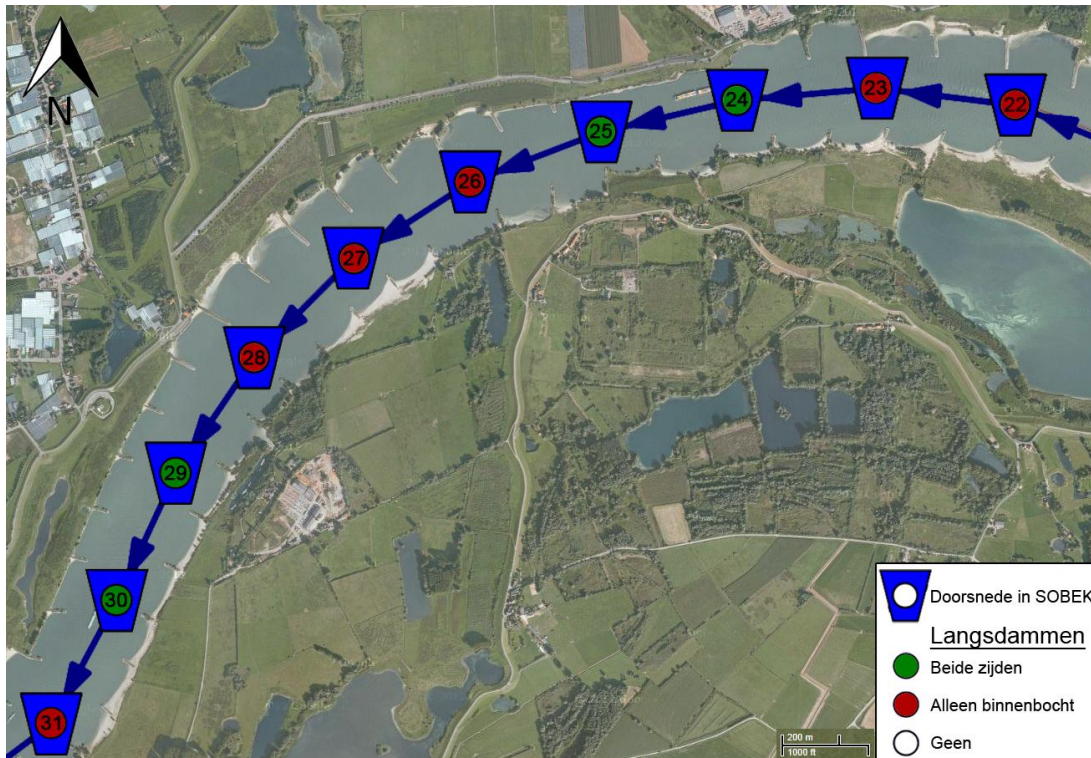
	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				1,40	17,49
Ld.	838	10821,64	14,62	59,54	1,7	1,34	17,45
Ld. -1m	1429	10857,45	24,93	95,35	1,7	1,29	17,42
Ld. -2m	2020	10892,25	35,44	130,15	1,8	1,24	17,40

Verklaring resultaten

Deze maatregel heeft duidelijk meer invloed dan de vorige maatregel. Naast natuurlijk het oppervlakte van de oevergeul die groter is dan bij de maatregel van 4,5 tot 6 km, is hier ook het verhang groter. Opvallend bij deze maatregel is dat doordat het verhang groter is bij het scenario Piekafvoer dat ook het effect bij deze maatregel duidelijk hoger is (1,7 in plaats van 1,1).

Langsdammen van 10,5 tot 12,5 km

Na doorsnede 20 zet zich een bocht in naar links, zie figuur b.14. In deze bocht, van doorsnede 21 tot 23, liggen zowel kribben in de binnenbocht als de buitenbocht. Er zullen vanwege de scherpste van de bocht, alleen in de binnenbocht langsdammen worden toegepast. De langsdammen worden vervolgens doorgezet in het rechte stuk bij de doorsnede 24 en 25.



Figuur b.15 – Toepassing langsdammen van 10,5 tot 12,5 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.9 – Resultaten langsdammen van 10,5 tot 12,5 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				0,31	16,35
Ld.	448	8618,61	1,78	52,68	0,4	0,33	16,31
Ld. -1m	712	8651,10	2,77	85,17	0,4	0,35	16,28
Ld. -2m	977	8682,90	3,90	116,97	0,4	0,37	16,26

Tabel b.10 – Resultaten langsdammen van 10,5 tot 12,5 km in het scenario Piekafvoer

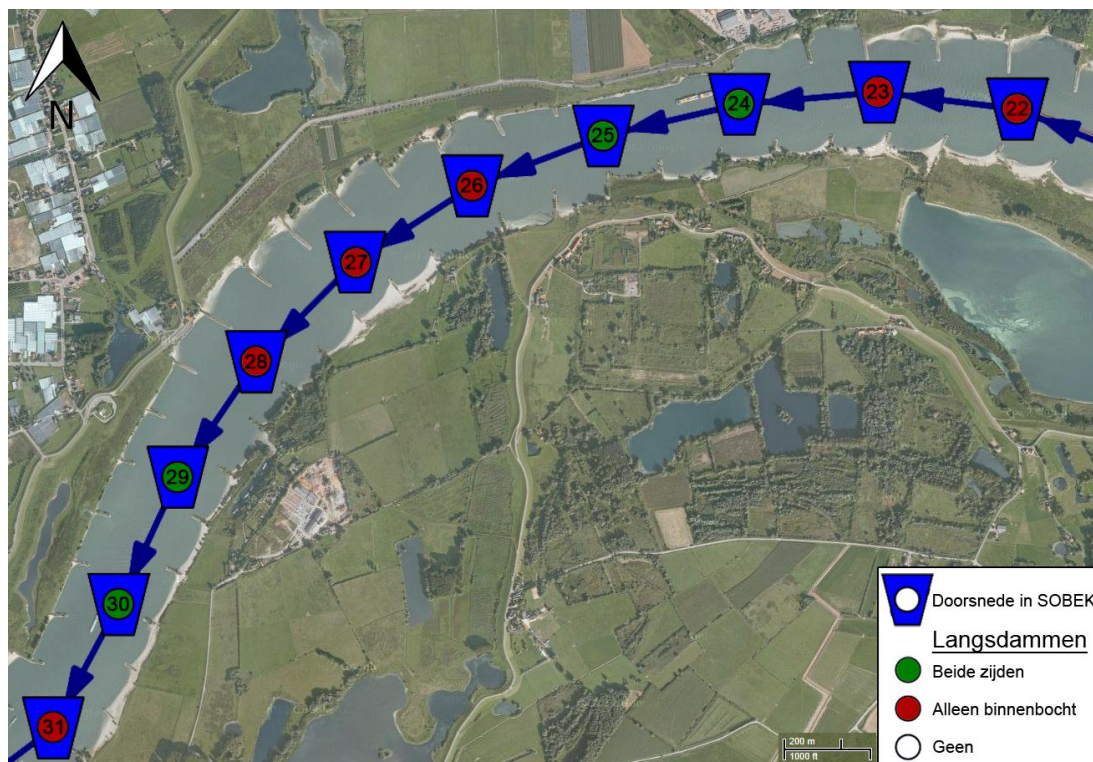
	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				0,26	17,49
Ld.	448	10824,25	2,61	62,15	0,6	0,27	17,45
Ld. -1m	712	10861,48	4,03	99,38	0,6	0,29	17,42
Ld. -2m	977	10897,9	5,65	135,80	0,6	0,31	17,39

Verklaring resultaten

Het verhang is sterk verkleind evenals de oppervlakte van de oevergeul. Dit komt onder andere omdat hier alleen kribben in de binnenbocht kunnen worden verwijderd. Gevolg is dat het effect van deze maatregel erg klein is.

Langsdammen van 13 tot 14 km

Een flauwere bocht wordt gevonden tussen de doorsnedes 26 en 28. Deze bocht is echter zo scherp dat er alleen langsdammen in de binnenbocht kunnen worden toegepast.



Figuur b.16 – Toepassing langsdammen van 13 tot 14 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.11 – Resultaten langsdammen van 13 tot 14 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				1,94	16,35
Ld.	244	8621,34	2,73	55,41	1,1	1,98	16,31
Ld. -1m	345	8655,35	4,25	89,42	1,2	2,03	16,28
Ld. -2m	446	8688,76	5,86	122,83	1,3	2,07	16,25

Tabel b.12 – Resultaten langsdammen van 13 tot 14 km in het scenario Piekafvoer

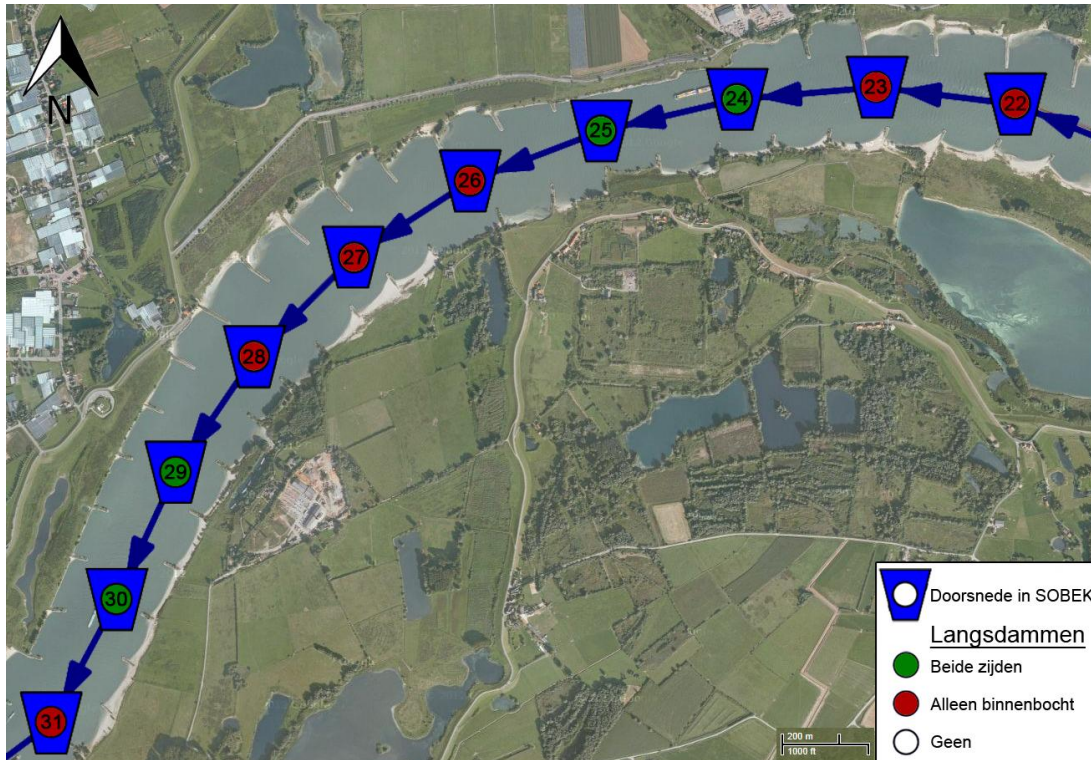
	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				2,02	17,49
Ld.	244	10828,58	4,33	66,48	1,8	2,06	17,44
Ld. -1m	345	10868,24	6,76	106,14	2,0	2,10	17,42
Ld. -2m	446	10907,23	9,33	145,13	2,1	2,13	17,39

Verklaring resultaten

Het verhang over dit gedeelte is gezien over de hele rivier hoog. Echter kunnen er alleen langsdammen worden toegepast in de binnenbocht. Dit zorgt ervoor dat het oppervlak van de oevergeul niet groot is, waardoor het uiteindelijke regelbereik dat deze maatregel bewerkstelligt erg klein is.

Langsdammen van 14 tot 14,5 km

Nog twee doorsnedes zijn recht voordat er een scherpe bocht wordt gemaakt naar rechts. Aan beide zijden van de rivier worden langsdammen toegepast.



Figuur b.17 – Toepassing langsdammen van 14 tot 14,5 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.13 – Resultaten langsdammen van 14 tot 14,5 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				0,50	16,35
Ld.	295	8622,43	1,09	56,50	0,4	0,47	16,31
Ld. -1m	518	8657,17	1,82	91,24	0,4	0,44	16,28
Ld. -2m	741	8691,28	2,52	125,35	0,3	0,41	16,25

Tabel b.14 – Resultaten langsdammen van 14 tot 14,5 km in het scenario Piekaafvoer

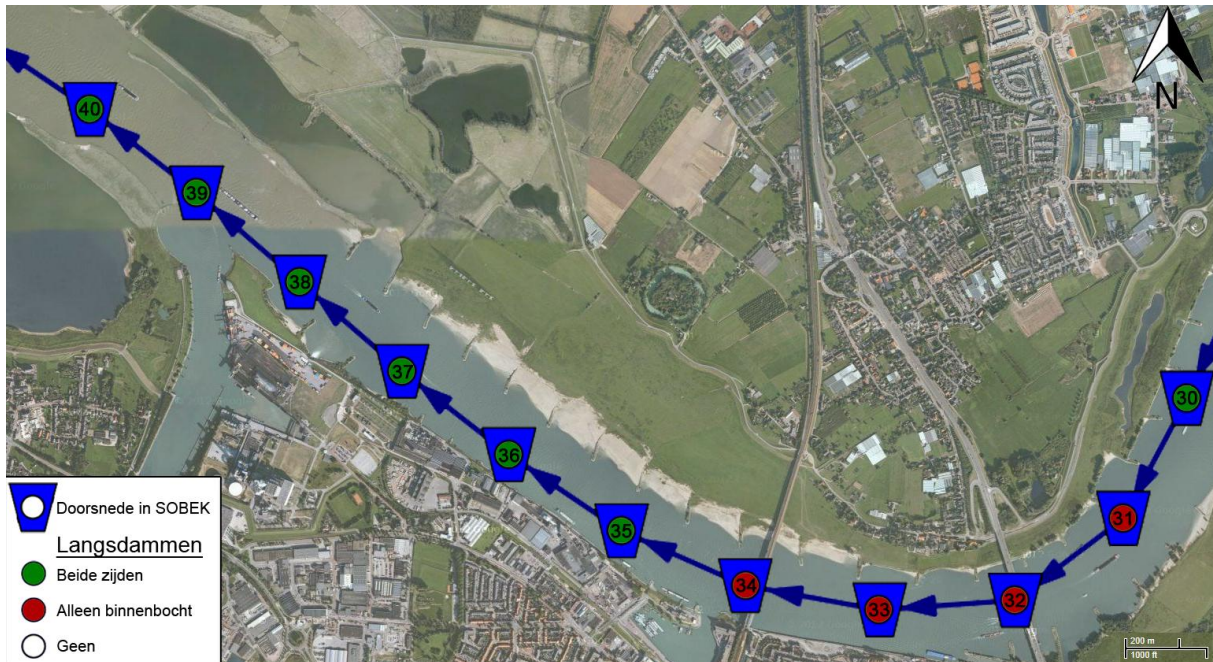
	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				0,45	17,49
Ld.	295	10830,31	1,73	68,21	0,6	0,42	17,44
Ld. -1m	518	10871,11	2,87	109,01	0,6	0,39	17,41
Ld. -2m	741	10911,20	3,97	149,10	0,5	0,37	17,38

Verklaring resultaten

Het verhang is op deze plek erg laag. Dit komt vermoedelijk door de 'bottleneck' die zich in het volgende gebied bevindt van de maatregel 15,5 tot 17 km. Doordat het verhang erg laag is, heeft de maatregel weinig effect.

Langsdammen van 15,5 tot 17 km

Deze bocht ligt tussen de plaatsen Lent en Nijmegen. Door de bebouwing die dicht op de rivier staat, heeft de rivier erg weinig ruimte. Daarnaast staan er ook nog twee bruggen in de rivier, die haar nog meer versmalt. Er liggen een paar kleine kribben in de binnenbocht welke zullen worden vervangen door langsdammen.



Figuur b.18 – Toepassing langsdammen van 15,5 tot 17 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.15 – Resultaten langsdammen van 15,5 tot 17 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				4,05	16,35
Ld.	323	8631,36	8,93	65,43	2,8	4,09	16,30
Ld. -1m	527	8672,52	15,35	106,59	2,9	4,11	16,27
Ld. -2m	731	8712,98	21,70	147,05	3,0	4,12	16,23

Tabel b.16 – Resultaten langsdammen van 15,5 tot 17 km in het scenario Piekaafvoer

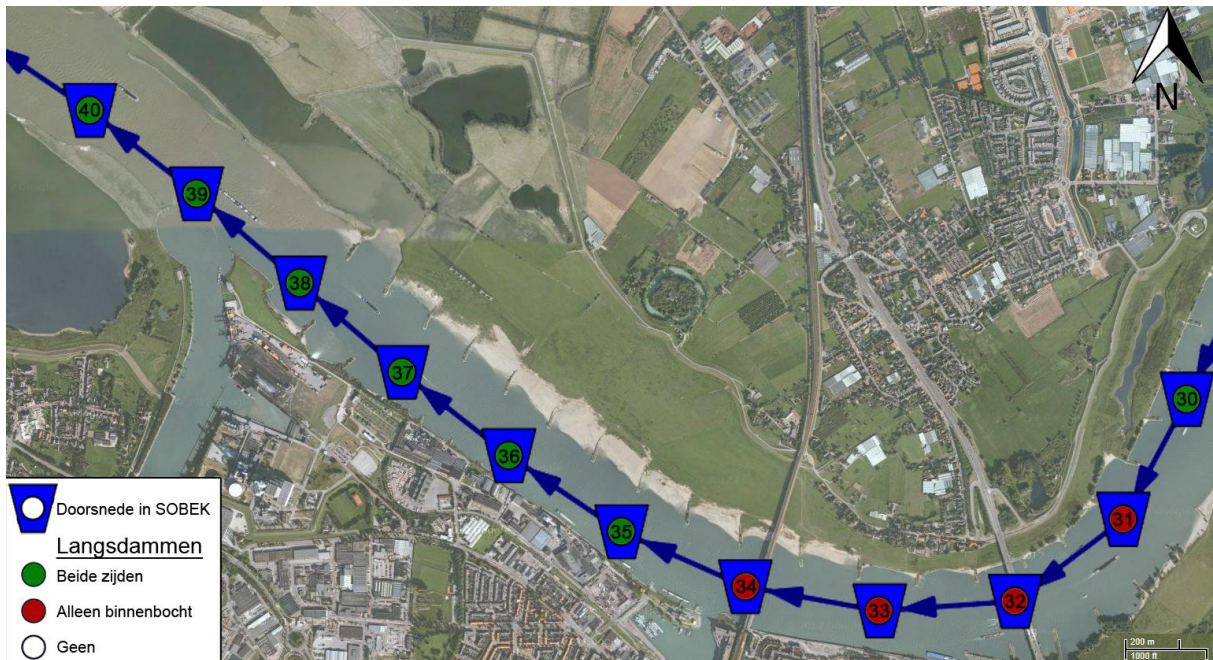
	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				4,76	17,49
Ld.	323	10846,45	16,14	84,35	5,0	4,80	17,43
Ld. -1m	527	10898,66	27,55	136,56	5,2	4,81	17,39
Ld. -2m	731	10950,06	38,86	187,96	5,3	4,81	17,36

Verklaring resultaten

Ondanks het relatief kleine oppervlak wat wordt toegevoegd aan de rivier is het resultaat van deze maatregel erg groot. Op de maatregel bij het splitsingspunt na zelfs met het grootste effect. Het verhang is erg groot rond deze doorsnedes. Dit komt, omdat door de bebouwing dit de 'bottleneck' van de Waal is. Maatregel in dit gebied hebben dus een erg groot effect van 2,5 tot 10 keer zo groot ten opzichte van de maatregelen in de omgeving.

Langsdammen van 17,5 tot 19 km

Na de 'bottleneck' is er een recht stuk van 2 km tot aan het Maas-Waalkanaal. Hier kunnen zowel langsdammen worden toegepast aan de linkerkant als aan de rechterkant van de rivier, ook al zijn de kribben aan de linkerkant minimaal.



Figuur b.19 – Toepassing langsdammen van 17,5 tot 19 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.17 – Resultaten langsdammen van 17,5 tot 19 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				0,93	16,35
Ld.	566	8637,86	6,50	71,93	1,1	0,89	16,29
Ld. -1m	983	8683,09	10,57	117,16	1,1	0,86	16,26
Ld. -2m	1400	8727,87	14,89	161,94	1,1	0,83	16,22

Tabel b.18 – Resultaten langsdammen van 17,5 tot 19 km in het scenario Piekafvoer

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				0,81	17,49
Ld.	566	10857,45	11,00	95,35	1,9	0,76	17,42
Ld. -1m	983	10916,41	17,75	154,31	1,8	0,74	17,38
Ld. -2m	1400	10974,82	24,76	212,72	1,8	0,71	17,34

Verklaring resultaten

Het verhang is van 17,5 tot 19 km weer flink verkleind. Echter zal dit rechte stuk nog redelijk meeliften op het grote verhang over het gebied tussen 15,5 tot 17 km vanaf het splitsingspunt. Vandaar dat het regelbereik van deze maatregel hier nog redelijk groot is.

Langsdammen van 19,5 tot 20,5 km

Ondanks de lichte bocht die zich inzet vanaf doorsnede 39, zie figuur b.19, worden de doorsnedes 39 tot 41 nog als recht gezien.



Figuur b.20 – Toepassing langsdammen van 19,5 tot 20,5 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.19 – Resultaten langsdammen van 19,5 tot 20,5 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				0,40	16,35
Ld.	406	8638,73	0,87	72,80	0,2	0,41	16,29
Ld. -1m	682	8684,52	1,43	118,59	0,2	0,41	16,26
Ld. -2m	958	8729,91	2,04	163,98	0,2	0,41	16,22

Tabel b.20 – Resultaten langsdammen van 19,5 tot 20,5 km in het scenario Piekafvoer

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				0,34	17,49
Ld.	406	10858,77	1,32	96,67	0,3	0,34	17,42
Ld. -1m	682	10918,56	2,15	156,46	0,3	0,34	17,38
Ld. -2m	958	10977,86	3,04	215,76	0,3	0,34	17,34

Verklaring resultaten

Het oppervlak is klein en het bodemverhang is klein. Verder wordt de afstand tot het splitsingspunt steeds groter.

Langsdammen van 21 tot 21,5 km

De lichte bocht die te zien is vanaf doorsnede 39 tot doorsnede 45 heeft zijn dieptepunt in de doorsnedes 42 en 43. Op deze twee doorsnedes worden alleen langsdammen toegepast in de binnenbocht.



Figuur b.21 – Toepassing langsdammen van 21 tot 21,5 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.21 – Resultaten langsdammen van 21 tot 21,5 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				2,08	16,35
Ld.	118	8639,45	0,72	73,52	0,6	2,16	16,29
Ld. -1m	171	8685,72	1,20	119,79	0,7	2,23	16,25
Ld. -2m	224	8731,63	1,72	165,70	0,8	2,29	16,22

Tabel b.22 – Resultaten langsdammen van 21 tot 21,5 km in het scenario Piekafvoer

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				2,23	17,49
Ld.	118	10860,00	1,23	97,90	1,0	2,31	17,42
Ld. -1m	171	10920,61	2,05	158,51	1,2	2,37	17,38
Ld. -2m	224	10980,77	2,91	218,67	1,3	2,42	17,33

Verklaring resultaten

Het verhang is groot, maar het oppervlak is klein. Verder is het effect van deze maatregel klein, omdat de maatregel over een korte lengte wordt toegepast.

Langsdammen van 22 tot 24 km

Op 22 tot 24 km vanaf het splitsingspunt zijn de bochten minimaal. Er kunnen dus langsdammen worden toegepast aan beide zijden van de rivier. De lengte van deze maatregel is groter dan de vorige maatregelen. Deze maatregel wordt ter hoogte van de plaats Beuningen toegepast.



Figuur b.22 – Toepassing langsdammen van 22 tot 24 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.23 – Resultaten langsdammen van 22 tot 24 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				1,18	16,35
Ld.	708	8644,81	5,36	78,88	0,8	1,12	16,29
Ld. -1m	1225	8694,77	9,05	128,84	0,7	1,07	16,25
Ld. -2m	1742	8744,89	13,26	178,96	0,8	1,02	16,20

Tabel b.24 – Resultaten langsdammen van 22 tot 24 km in het scenario Piekafvoer

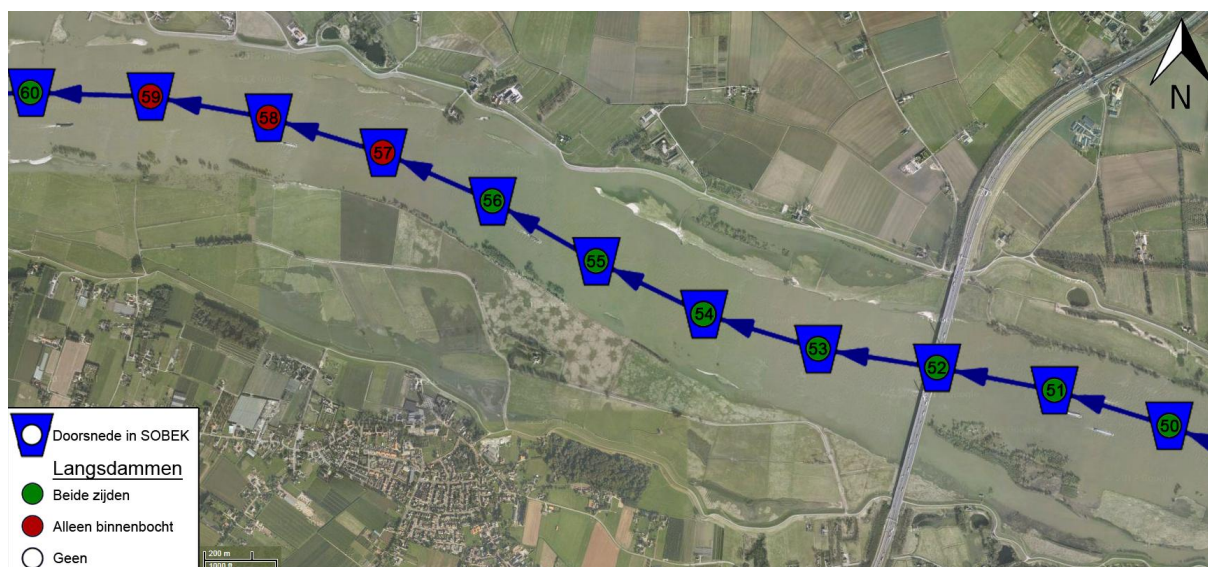
	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				1,20	17,49
Ld.	708	10869,01	9,01	106,91	1,3	1,14	17,42
Ld. -1m	1225	10935,93	15,32	173,83	1,3	1,09	17,37
Ld. -2m	1742	11002,42	21,65	240,32	1,2	1,04	17,32

Verklaring resultaten

De grootte van het stroomvoerende oppervlak dat wordt toegevoegd is groot. Dit komt mede door de lengte van deze toepassing. Doordat het verhang op dit gedeelte van de rivier nog redelijk groot is, is het effect van de maatregel relatief groot.

Langsdammen van 24,5 tot 26,5 km

Op 24,5 tot 26,5 km vanaf het splitsingspunt zijn eveneens de bochten minimaal. De langsdammen worden toegepast aan beide zijden van de rivier. Dit gaat om de doorsnedes 49 tot en met 53. De Waal kruist bij doorsnede 52 de A50 richting Arnhem en Eindhoven.



Figuur b.23 – Toepassing langsdammen van 24,5 tot 26,5 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.25 – Resultaten langsdammen van 24,5 tot 26,5 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				1,67	16,35
Ld.	1039	8651,06	6,25	85,13	0,6	1,55	16,28
Ld. -1m	1774	8705,14	10,37	139,21	0,6	1,47	16,24
Ld. -2m	2509	8759,92	15,03	193,99	0,6	1,38	16,19

Tabel b.26 – Resultaten langsdammen van 24,5 tot 26,5 km in het scenario Piekafvoer

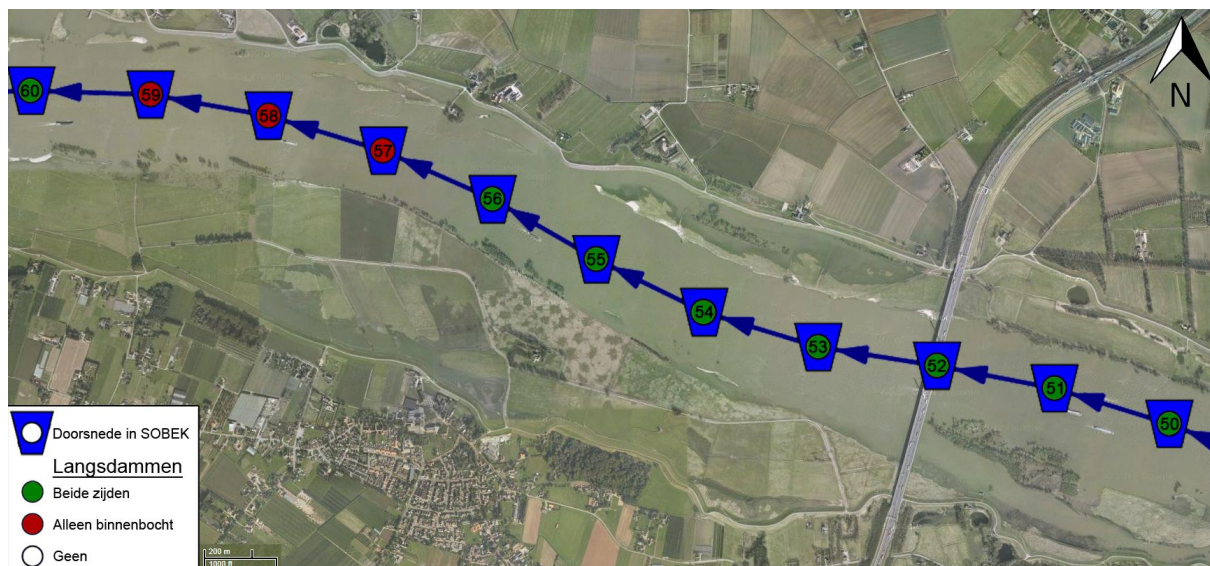
	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				1,75	17,49
Ld.	1039	10879,79	10,78	117,69	1,0	1,63	17,41
Ld. -1m	1774	10953,76	17,83	191,66	1,0	1,55	17,35
Ld. -2m	2509	11027,37	24,95	265,27	1,0	1,47	17,30

Verklaring resultaten

De grootte van het stroomvoerende oppervlak dat wordt toegevoegd is groot. Dit komt mede door de lengte van deze toepassing. Doordat het verhang op dit gedeelte van de rivier nog redelijk groot is, is het effect van de maatregel relatief groot.

Langsdammen van 27 tot 28 km

Bij 54 wordt een lichte bocht ingezet naar rechts tot aan doorsnede 56, waar de rivier weer afbuigt naar links. De rivier maakt hier geen scherpe bocht en er wordt verwacht dat hier langsdammen geplaatst kunnen worden. Blijkt dit achteraf niet het geval dan zal er oeverbescherming moeten worden toegepast.



Figuur b.24 – Toepassing langsdammen van 27 tot 28 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.27 – Resultaten langsdammen van 27 tot 28 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				1,66	16,35
Ld.	554	8654,00	2,94	88,07	0,5	1,58	16,28
Ld. -1m	955	8710,14	5,00	144,21	0,5	1,52	16,23
Ld. -2m	1356	8767,29	7,37	201,36	0,5	1,46	16,18

Tabel b.28 – Resultaten langsdammen van 27 tot 28 km in het scenario Piekafvoer

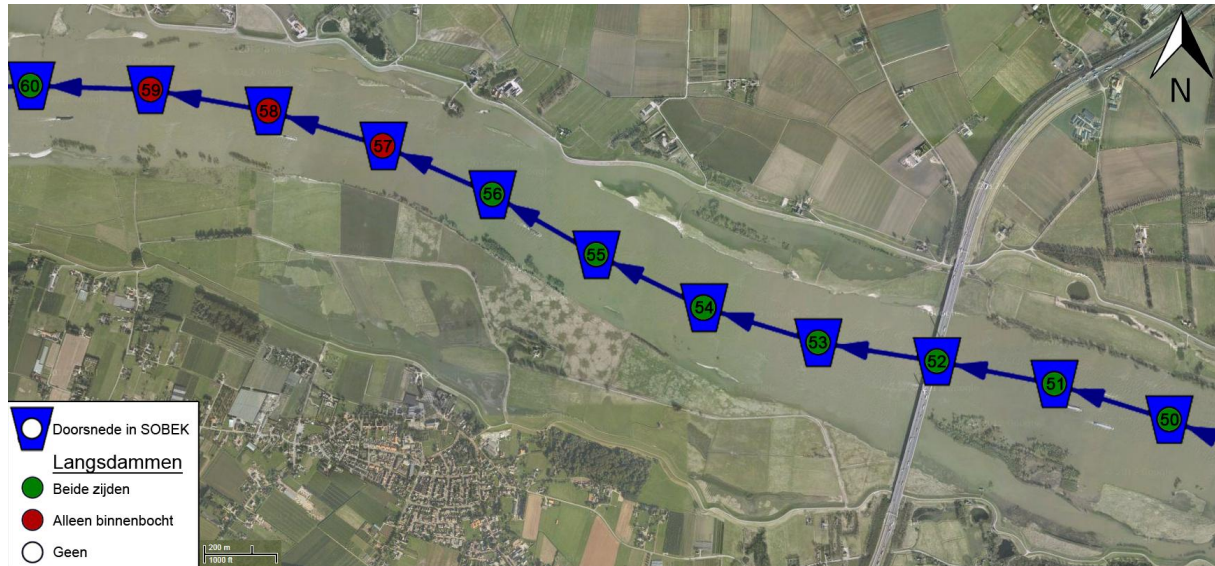
	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				1,73	17,49
Ld.	554	10884,76	4,97	122,66	0,9	1,65	17,40
Ld. -1m	955	10962,11	8,35	200,01	0,9	1,60	17,35
Ld. -2m	1356	11039,21	11,84	277,11	0,9	1,54	17,29

Verklaring resultaten

Het verhang is hier net is kleiner dan de maatregel van 24,5 en 26,5 km. Het stroomvoerende oppervlak dat wordt toegevoegd is echter ongeveer de helft kleiner, omdat deze over een afstand wordt uitgevoerd die ook de helft kleiner is. Gevolg is dat het effect van deze maatregel net iets meer dan de helft kleiner is.

Langsdammen van 28,5 tot 29,5 km

Bij doorsnede 57 wordt een bocht ingezet die net iets scherper is dan deze tussen doorsnede 54 tot 56. Deze eindigt ter hoogte van doorsnede 59.



Figuur b.25 – Toepassing langsdammen van 28,5 tot 29,5 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.29 – Resultaten langsdammen van 28,5 tot 29,5 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				1,63	16,35
Ld.	406	8656,05	2,05	90,12	0,5	1,60	16,28
Ld. -1m	578	8713,20	3,06	147,27	0,5	1,62	16,23
Ld. -2m	749	8771,62	4,33	205,69	0,6	1,63	16,18

Tabel b.30 – Resultaten langsdammen van 28,5 tot 29,5 km in het scenario Piekafvoer

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				1,65	17,49
Ld.	406	10888,26	3,50	126,16	0,9	1,62	17,40
Ld. -1m	578	10967,32	5,21	205,22	0,9	1,64	17,34
Ld. -2m	749	11046,22	7,01	284,12	0,9	1,64	17,29

Verklaring resultaten

Het verhang blijft redelijk constant en het oppervlak is nog verder afgenomen, omdat er alleen langsdammen worden toegepast in de binnenbocht. Er vindt dus nog meer reductie plaats in regelbereik.

Langsdammen van 30 tot 32 km

Vanaf doorsnede 60 volgt een lang nagenoeg recht stuk. Over vijf doorsnedes worden de langsdammen aangelegd tot en met doorsnede 64. Aan de onderzijde van figuur b.26 is de plaats Druten te zien.



Figuur b.26 – Toepassing langsdammen van 30 tot 32 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.31 – Resultaten langsdammen van 30 tot 32 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				0,69	16,35
Ld.	948	8658,29	2,24	92,36	0,2	0,63	16,28
Ld. -1m	1615	8717,09	3,89	151,16	0,2	0,58	16,23
Ld. -2m	2282	8777,19	5,57	211,26	0,2	0,54	16,18

Tabel b.32 – Resultaten langsdammen van 30 tot 32 km in het scenario Piekafvoer

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				0,64	17,49
Ld.	948	10892,10	3,84	130,00	0,4	0,58	17,40
Ld. -1m	1615	10973,64	6,32	211,54	0,4	0,54	17,34
Ld. -2m	2282	11055,11	8,89	293,01	0,4	0,50	17,28

Verklaring resultaten

Vanaf doorsnede 60 daalt het verhang drastisch met een grootte van een factor 2 à 3. Gevolg is dat het effect van de grote hoeveelheid stroomvoerend oppervlak dat wordt toegevoegd nauwelijks merkbaar is op de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop. Dit komt overigens ook omdat de afstand tot het splitsingspunt steeds dichterbij de aanpassingslengte komt. De verwachting van het effect van de waterstandsverlaging bij Druten is ongeveer 35%, zie Bijlage B.

Langsdammen van 32,5 tot 34,5 km

Het rechte stuk loopt verder door en er wordt gekeken naar het aanleggen van langsdammen over de doorsnedes 65 tot 69.



Figuur b.27 – Toepassing langsdammen van 32,5 tot 34,5 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.33 – Resultaten langsdammen van 32,5 tot 34,5 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				1,42	16,35
Ld.	886	8661,05	2,76	95,12	0,3	1,36	16,27
Ld. -1m	1516	8722,07	4,98	156,14	0,3	1,32	16,22
Ld. -2m	2146	8784,63	7,44	218,70	0,3	1,27	16,17

Tabel b.34 – Resultaten langsdammen van 32,5 tot 34,5 km in het scenario Piekafvoer

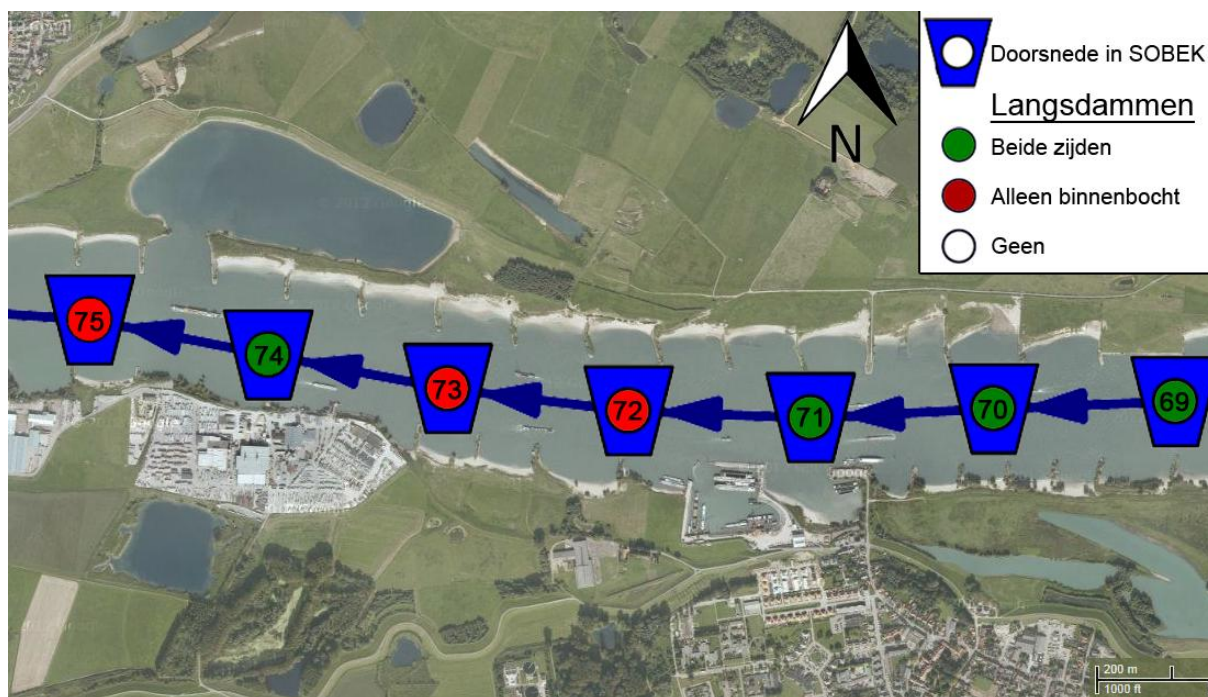
	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				1,45	17,49
Ld.	886	10896,94	4,84	134,84	0,5	1,39	17,40
Ld. -1m	1516	10982,03	8,39	219,93	0,6	1,36	17,33
Ld. -2m	2146	11067,20	12,09	305,10	0,6	1,31	17,27

Verklaring resultaten

Het effect van deze langsdammen is iets groter door het grotere verhang. Echter is het stroomvoerend oppervlak dat wordt toegevoegd iets kleiner, waardoor er maar een licht groter regelbereik is.

Langsdammen van 35 tot 37 km

De volgende doorsneden die aangepast worden zijn de doorsneden 70 tot en met 74. Er vormt zich in dit stuk een bocht naar rechts. Gekozen wordt om geen langsdammen aan te leggen in de buitenbocht bij de doorsneden 72 en 73. Bij de rest van de doorsneden, 70, 71 en 74 kunnen aan beide kanten langsdammen worden aangelegd.



Figuur b.28 – Toepassing langsdammen van 35 tot 37 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.35 – Resultaten langsdammen van 35 tot 37 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				0,69	16,35
Ld.	840	8662,43	1,38	96,50	0,2	0,65	16,27
Ld. -1m	1347	8724,43	2,36	158,50	0,2	0,64	16,22
Ld. -2m	1854	8788,12	3,49	222,19	0,2	0,63	16,17

Tabel b.36 – Resultaten langsdammen van 35 tot 37 km in het scenario Piekafvoer

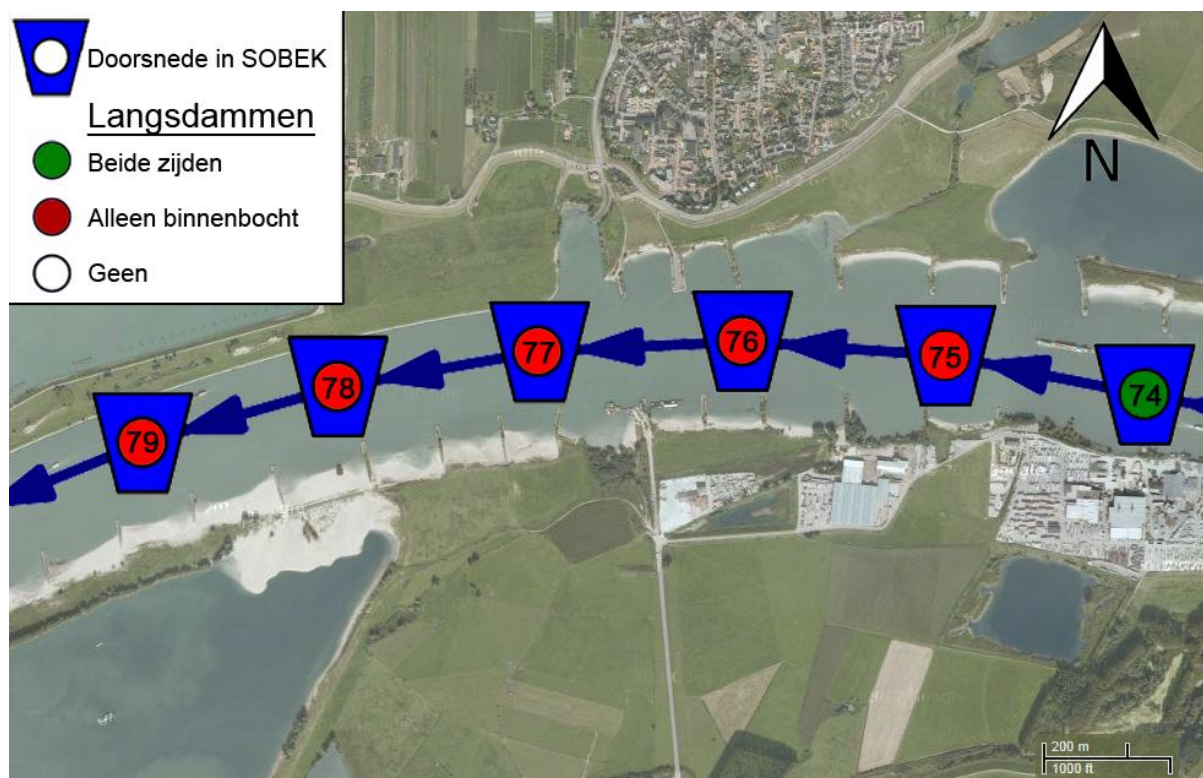
	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				0,62	17,49
Ld.	840	10899,28	2,34	137,18	0,3	0,59	17,39
Ld. -1m	1347	10985,84	3,81	223,74	0,3	0,58	17,33
Ld. -2m	1854	11072,56	5,36	310,46	0,3	0,57	17,27

Verklaring resultaten

Het verhang neemt af, de afstand tot het splitsingspunt wordt groter. Gevolg is dat onafhankelijk van het relatief grote oppervlak de debietsverdeling weinig veranderd bij de Pannerdenschekop.

Langsdammen van 37,5 tot 39,5 km

De bocht naar links wordt ingezet vanaf doorsnede 75. De bocht is dusdanig scherp dat er geen langsdammen worden toegepast in de buitenbocht. Bij de doorsnedes 77 tot en met 79 zijn überhaupt geen kribben aanwezig in de buitenbocht, zodat in SOBEK nog steeds de grootte van de volledige kribben kan worden toegevoegd.



Figuur b.29 – Toepassing langsdammen van 37,5 tot 39,5 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.37 – Resultaten langsdammen van 37,5 tot 39,5 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				1,38	16,35
Ld.	720	8663,79	1,36	97,86	0,2	1,32	16,27
Ld. -1m	1056	8727,50	3,07	161,57	0,3	1,24	16,22
Ld. -2m	1392	8792,44	4,32	226,51	0,3	1,20	16,16

Tabel b.38 – Resultaten langsdammen van 37,5 tot 39,5 km in het scenario Piekafvoer

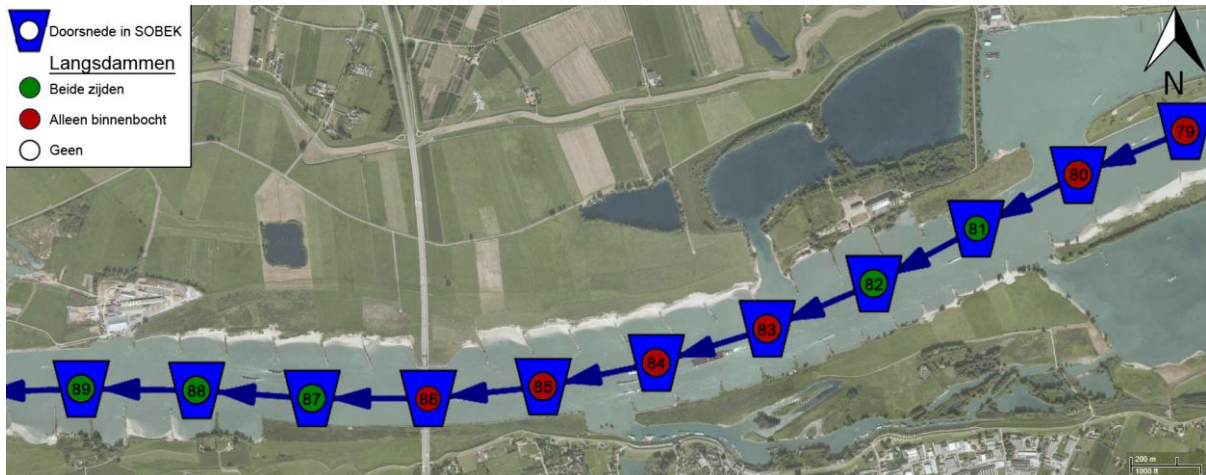
	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				1,41	17,49
Ld.	720	10901,73	2,45	139,63	0,3	1,35	17,39
Ld. -1m	1056	10991,15	5,31	229,05	0,5	1,27	17,33
Ld. -2m	1392	11079,61	7,05	317,51	0,5	1,23	17,26

Verklaring resultaten

Het verhang is boven gemiddeld, maar het oppervlak is kleiner ten opzichte van de voorgaande maatregelen en de afstand tot het splitsingspunt wordt groter. Gevolg is dat de debietsverdeling weinig veranderd bij de Pannerdenschekop.

Langsdammen van 40 tot 42,5 km

Bij doorsnede 80 eindigt de bocht naar links. Daarna volgt er een recht stuk van 1 km bij doorsnede 81 en 82. Bij doorsnede 80 tot en met 86 volgt een bocht naar rechts. In deze maatregel worden het toevoegen van langsdammen tot en met doorsnede 85 meegenomen. De brug bij doorsnede is de N323 en deze weg ligt langs het dorp Boven-Leeuwen.



Figuur b.30 – Toepassing langsdammen van 40 tot 42,5 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.39 – Resultaten langsdammen van 40 tot 42,5 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				1,00	16,35
Ld.	950	8665,08	1,29	99,15	0,1	0,95	16,27
Ld. -1m	1526	8729,85	2,35	163,92	0,2	0,91	16,22
Ld. -2m	2102	8795,99	3,55	230,06	0,2	0,88	16,16

Tabel b.40 – Resultaten langsdammen van 40 tot 42,5 km in het scenario Piekafvoer

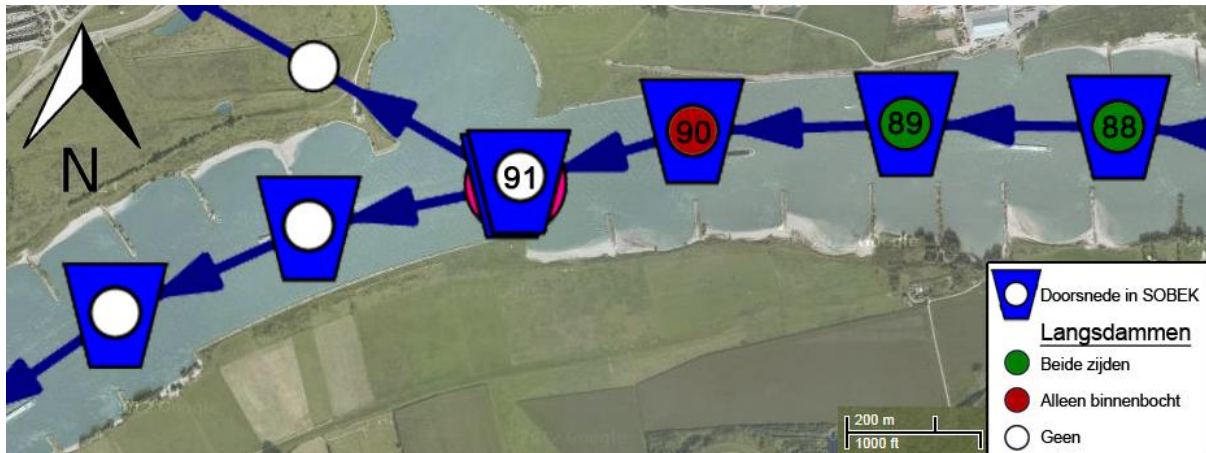
	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				1,00	17,49
Ld.	950	10903,97	2,24	141,87	0,2	0,95	17,39
Ld. -1m	1526	10995,04	3,89	232,94	0,3	0,92	17,32
Ld. -2m	2102	11085,12	5,51	323,02	0,3	0,90	17,26

Verklaring resultaten

Het verhang neemt af, de afstand tot het splitsingspunt wordt groter. Gevolg is dat onafhankelijk van het relatief grote oppervlak de debietsverdeling weinig veranderd bij de Pannerdensche kop.

Langsdammen van 43 tot 45 km

De laatste paar doorsnedes zijn 87 tot en met 90. Er liggen geen profielen meer in de buitenbocht, dus overal kunnen de kribben verwijderd worden om langsdammen te plaatsen. In doorsnede 91 zijn geen kribben meer aanwezig. Bij deze doorsnede ligt ook het knooppunt van de Waal met het Amsterdam-Rijnkanaal. Dit knooppunt ligt ter hoogte van de stad Tiel.



Figuur b.31 – Toepassing langsdammen van 43 tot 45 km na het splitsingspunt (8)

Tabel b.41 – Resultaten langsdammen van 43 tot 45 km in het scenario Hoge afvoer & storm

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		8565,93				0,93	16,35
Ld.	851	8666,22	1,14	100,29	0,1	0,86	16,27
Ld. -1m	1413	8731,85	2,00	165,92	0,1	0,82	16,21
Ld. -2m	1975	8799,10	3,11	233,17	0,2	0,77	16,16

Tabel b.42 – Resultaten langsdammen van 43 tot 45 km in het scenario Piekafvoer

	A[m ²]	Q _{waal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} [m ³ /s]	ΔQ _{totaal} [m ³ /s]	ΔQ _{maat} /A	i[·10 ⁻⁴]	h[m]
Basis		10762,10				0,90	17,49
Ld.	851	10905,95	1,98	143,85	0,2	0,83	17,39
Ld. -1m	1413	10998,35	3,31	236,25	0,2	0,80	17,32
Ld. -2m	1975	11089,90	4,78	327,80	0,2	0,76	17,25

Verklaring resultaten

Het verhang neemt af, de afstand tot het splitsingspunt wordt groter. Gevolg is dat onafhankelijk van het relatief grote oppervlak de debietsverdeling weinig veranderd bij de Pannerdenschekop. Op 45 km blijft er volgens Bijlage B nog 23 tot 29% over van de waterstandsval bij de Pannerdenschekop. Verder dalen de resultaten gestaag en hebben geen grote invloed meer. Er wordt voor gekozen om niet meer verder te gaan.

Resultatenoverzicht

In dit hoofdstuk zal het overzicht worden gegeven van de tot nu toe getoonde resultaten. Allereerst zal een uitleg worden gegeven over de grafieken die getoond worden. Dit wordt eerst gedaan, zodat de grafieken van de verschillende scenario's zo groot mogelijk op één pagina kunnen worden vergeleken.

Regelbereik en verhang

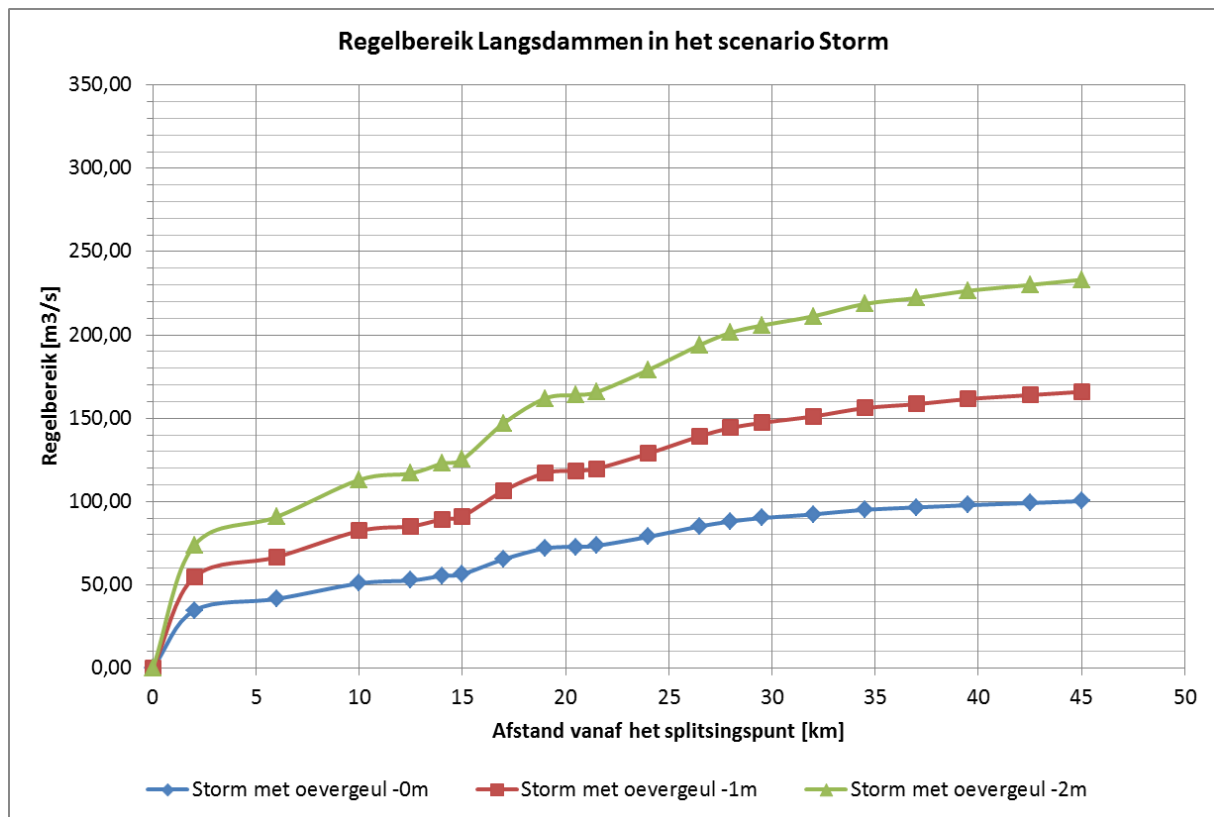
Allereerst wordt in figuur b.32 en figuur b.33 het regelbereik van de langsdammen gegeven naar mate de toepassingslengte toeneemt. Dit houdt in dat het eerste punt alleen langsdammen heeft bij de doorsnedes 0,5 tot 2 km, het tweede punt bij de doorsnedes 0,5 tot 2 km en 4,5 tot 6 km, enzovoorts. Uit de grafieken kan het maximale regelbereik worden afgeleid, zie tabel b.43.

Tabel b.43 – Maximaal regelbereik per maatregel

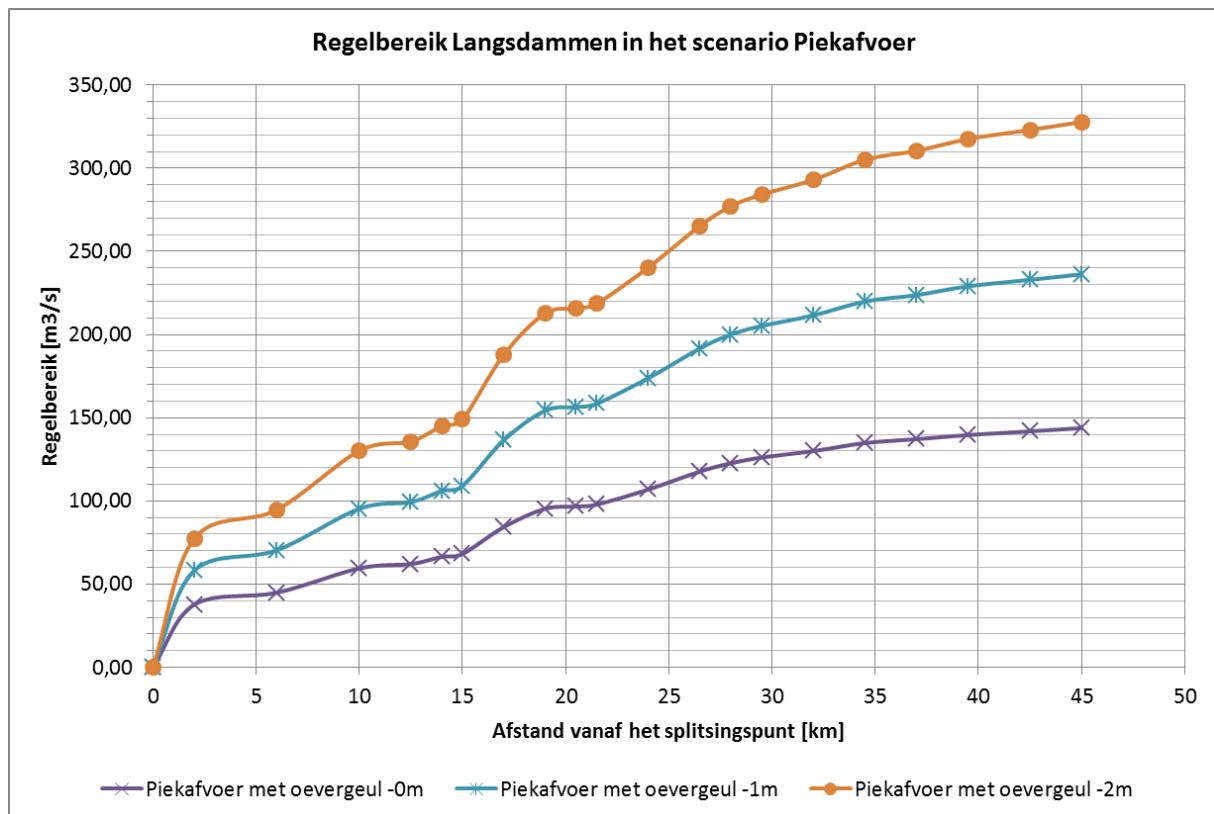
Scenario	Hoge afvoer & storm			Piekafvoer		
Verdieping oevergeul [m]	0	1	2	0	1	2
Maximaal regelbereik $\Delta Q_{\text{totaal, maximum}}$ [m ³ /s]	100	166	233	144	236	328

Vanuit figuur b.32 en figuur b.33 kan worden afgeleid wat het regelbereik is per serie doorsnedes, zoals is gedefinieerd in de tot nu toe getoonde resultaten. Dit is weergegeven in figuur b.34. Ter vergelijking wordt op deze pagina ook het verhang weergegeven in figuur b.35, zodat het effect van het verhang kan worden vergeleken met het extra debiet dat per serie doorsnedes wordt verkregen.

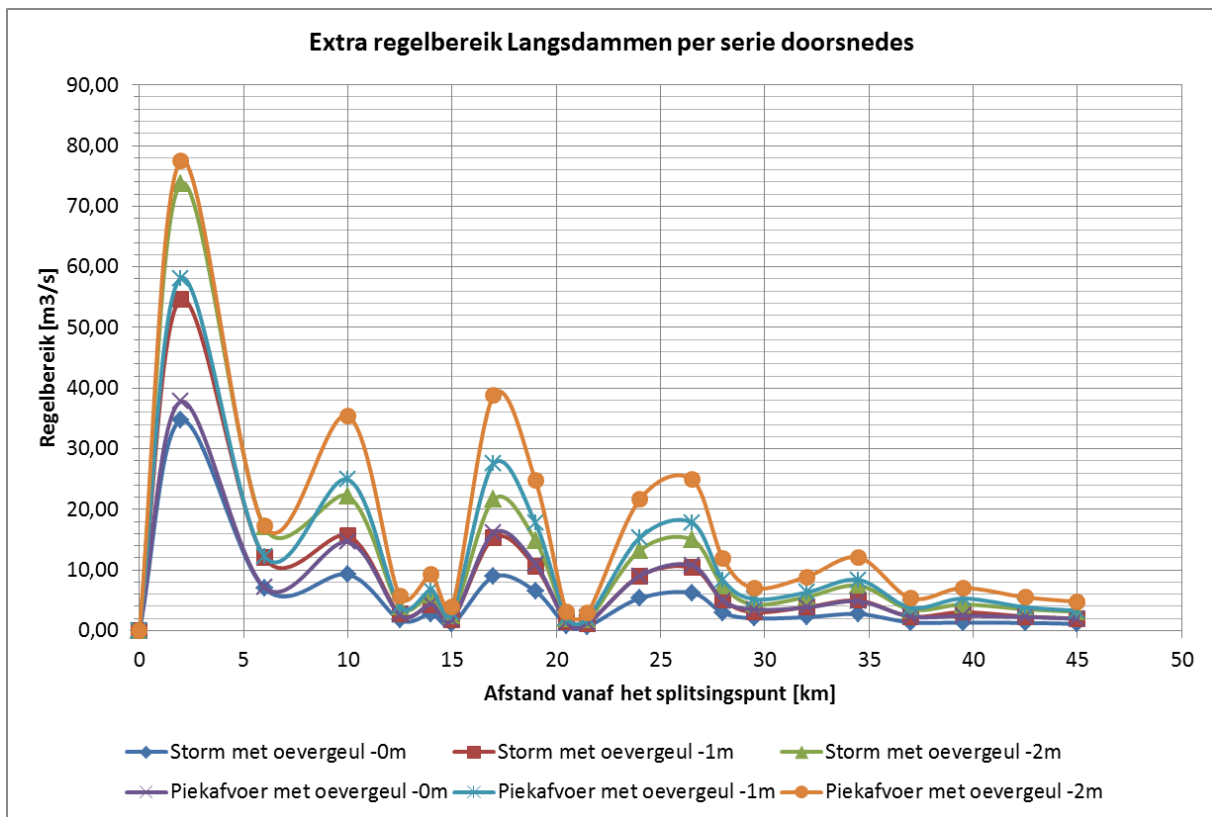
Figuur b.34 geeft echter nog geen compleet beeld van de situatie, aangezien de lengte en het oppervlak van de langsdammen sterk verschilt tussen de serie doorsnedes. Om dit verschil op te hebben is de grootheid $\frac{\text{regelbereik}}{\text{toegevoegd stroomvoerend oppervlak}} \left(\frac{\Delta Q_{\text{totaal}}}{A} \right)$ ingevoerd. Deze grootheid geeft relatief weer wat het effect van het veranderen van de doorsnedes is. Dit voor de twee scenario's weergegeven in figuur b.36 en figuur b.37.



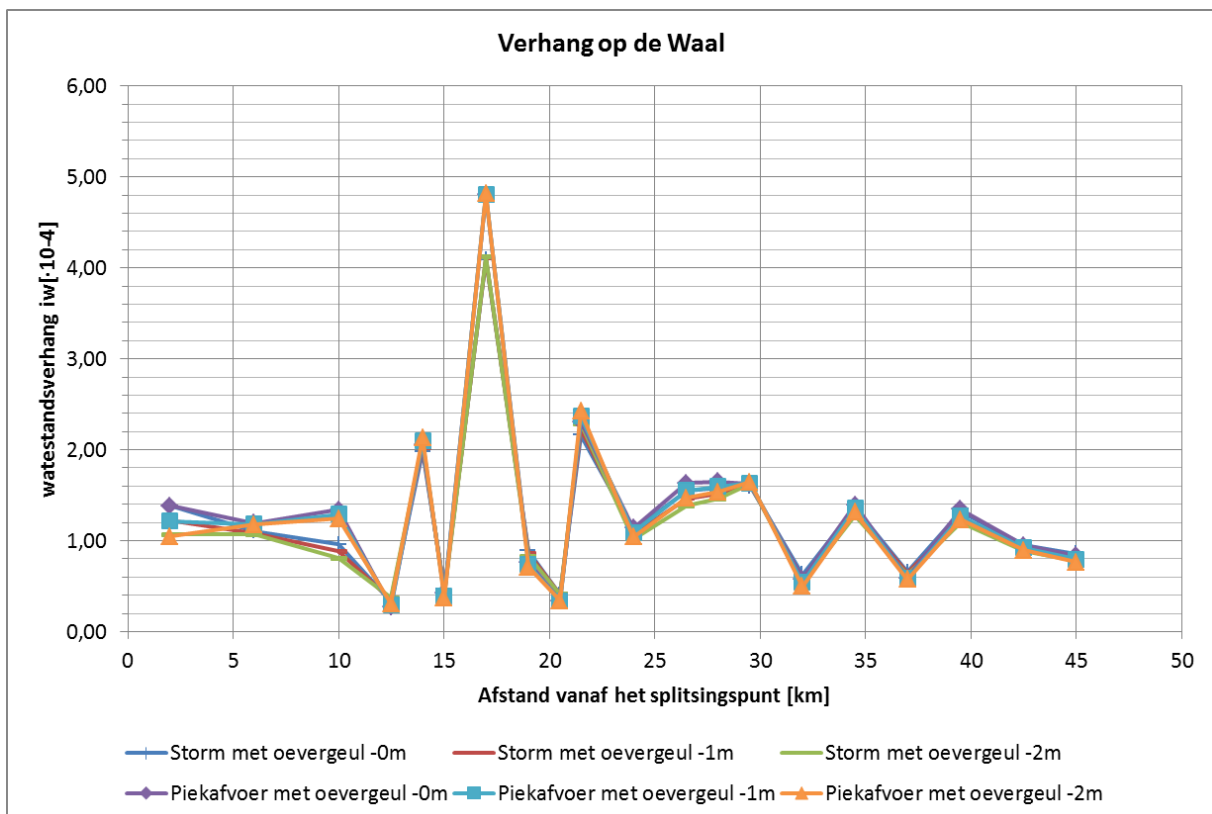
Figuur b.32 – Regelbereik in Hoge afvoer & storm naarmate de toepassingslengte van de Langsdammen toeneemt



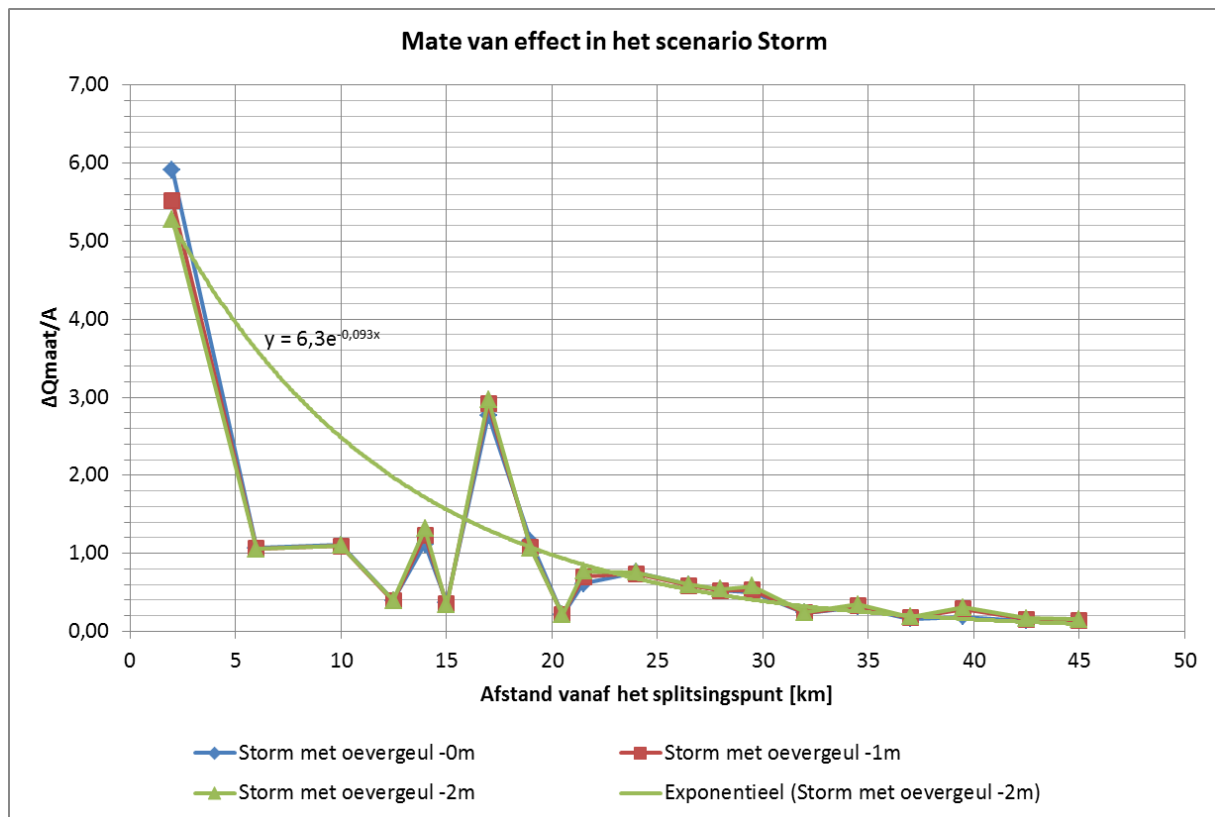
Figuur b.33 – Regelbereik in Piekfvoer naarmate de toepassingslengte van de Langsdammen toeneemt



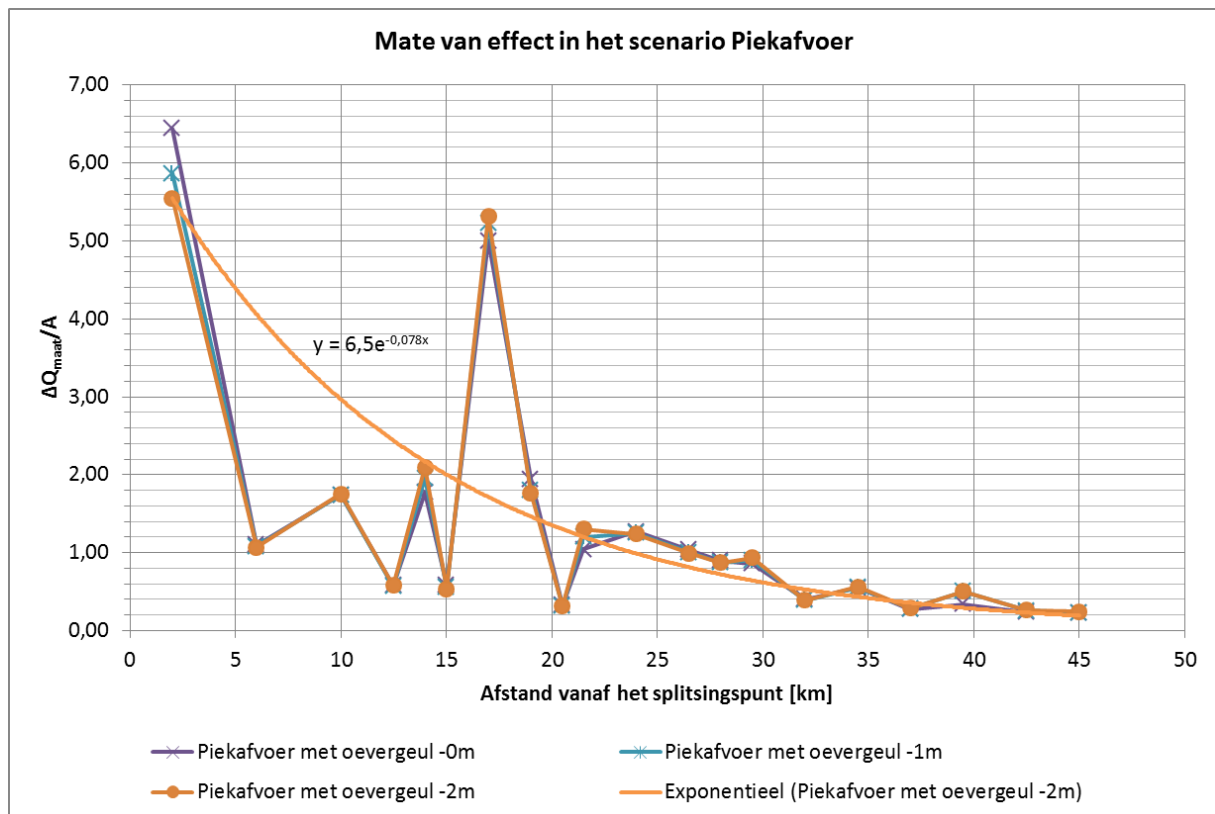
Figuur b.34 – Regelbereik van één serie doorsnedes Langsdammen



Figuur b.35 – Verhang op de Waal bij verschillende scenario's en maatregelen



Figuur b.36 – Mate van effect van één serie doorsneden in het scenario Hoge afvoer & storm



Figuur b.37 – Mate van effect van één serie doorsneden in het scenario Piekafvoer

Deze twee figuren blijken volgens benadering redelijk exponentieel af te lopen op de piek bij 15,5 tot 17 km na. De formules van deze exponentiele verdeling die kunnen worden gevonden zijn:

$$y_{storm} = 6,3 \cdot e^{-0,093x} \quad (47)$$

$$y_{piekafvoer} = 6,5 \cdot e^{-0,078x} \quad (48)$$

Volgens vergelijking (40) in Bijlage B geldt:

$$\text{Percentage aanpassing bij splitsingspunt} = e^{\frac{\text{afstand tot splitsingspunt}}{L}} \quad (49)$$

De aanpassingslengte in vergelijking (47) en (48) zijn dan:

$$L_{storm} \approx \frac{1}{0,093} \approx 10,8 \text{ km} \quad (50)$$

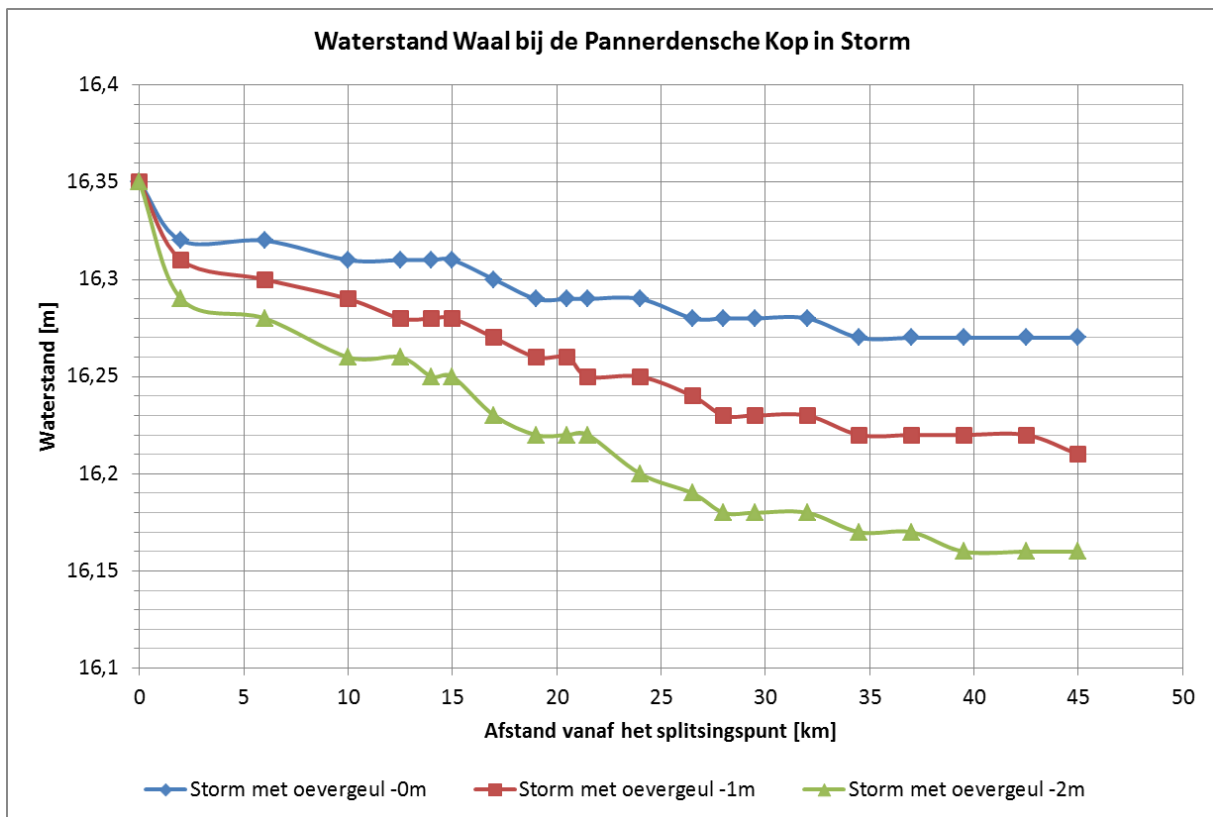
$$L_{piekafvoer} \approx \frac{1}{0,078} \approx 12,8 \text{ km} \quad (51)$$

De aanpassingslengtes gevonden in SOBEK (zie vergelijking (50) en (51)) zijn dus een stuk kleiner als de vergelijkingen gevonden in de hypothese (zie vergelijking (38) en (39)).

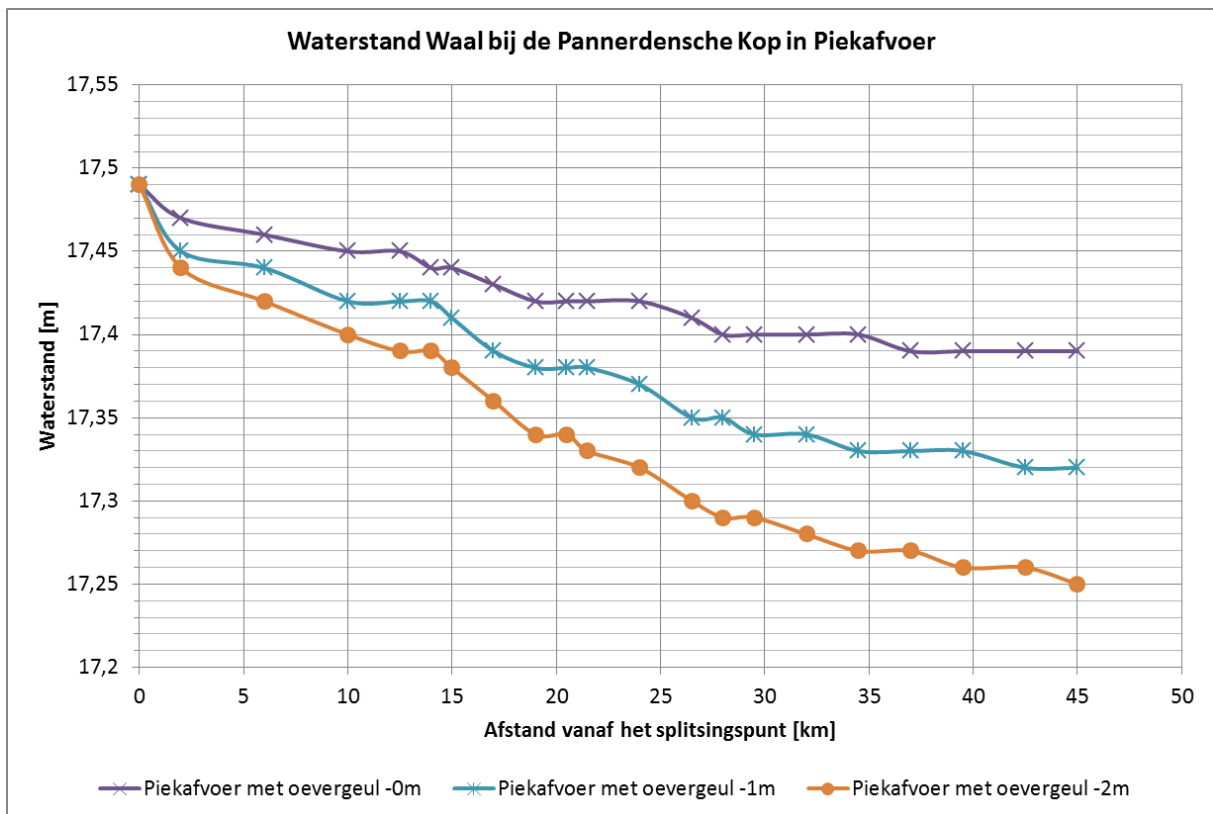
Waterstand

De volgende resultaten hebben betrekking tot de waterstand op de Waal door het toepassen van de maatregel Langsdammen. In figuur b.39 en figuur b.38 wordt de waterstand bij de Pannerdensche Kop weergegeven in de twee scenario's bij een toenemende toepassingslengte. Te zien is dat er een maximale waterstandsval kan worden bereikt van 19 cm in het scenario Hoge afvoer & storm en 24 cm in het scenario Piekafvoer.

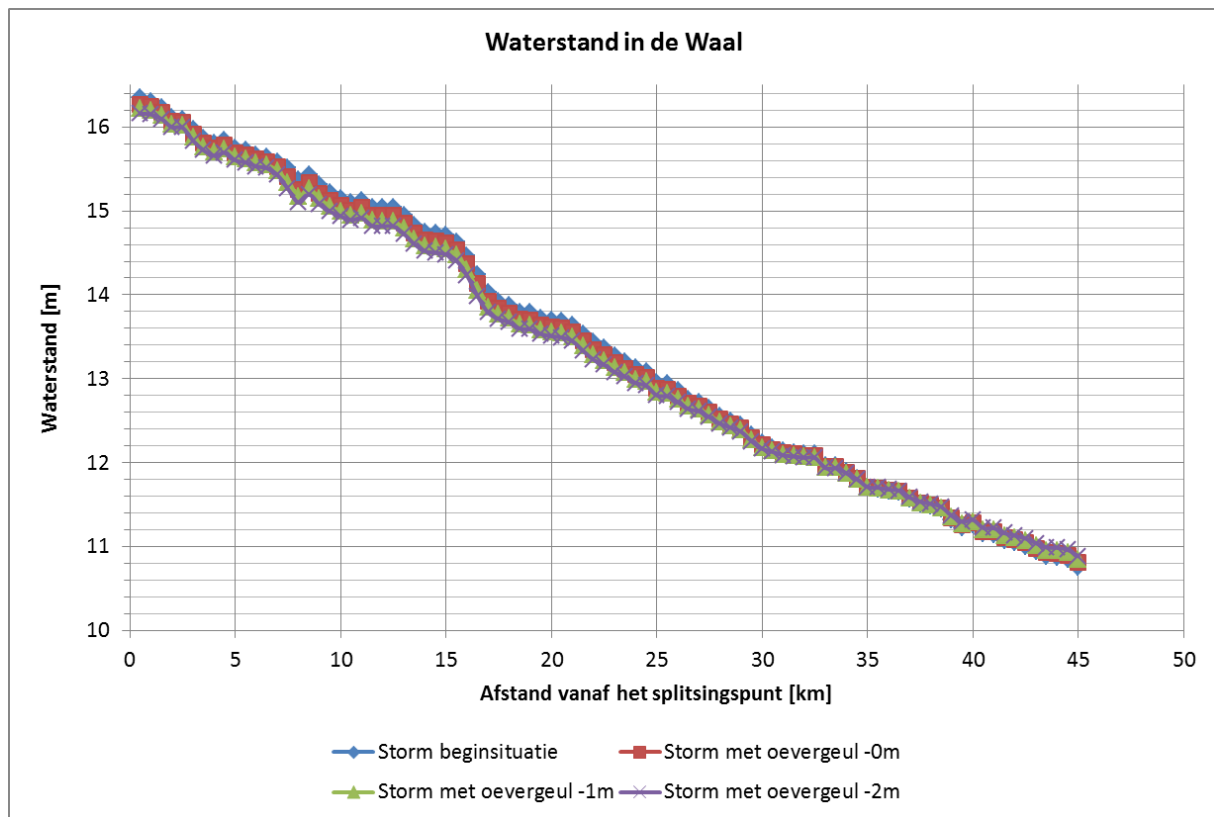
De laatste vier figuren geven de waterstand en het waterstandverschil weer bij de maatregelen met een toepassingslengte van 0 tot 45 km. In figuur b.40 en figuur b.41 is goed te zien dat er tussen de 15 en 17 km een flinke waterstandsval optreedt. In figuur b.42 en figuur b.43 is het waterstandverschil te zien ten opzichte van de beginsituatie. Opvallend hierin is dat hoe rigoureuzer de maatregel hoe meer waterstandsval er optreedt in van 0 tot 35 km in het scenario Hoge afvoer & storm en 0 tot 32,5 km in het scenario Piekafvoer en hoe hoger de waterstandsverhoging na 32,5 en 35 km. Verder valt het op dat in alle gevallen het nulpunt ongeveer rond de 35 km in het scenario Hoge afvoer & storm en 32,5 in het scenario Piekafvoer ligt.



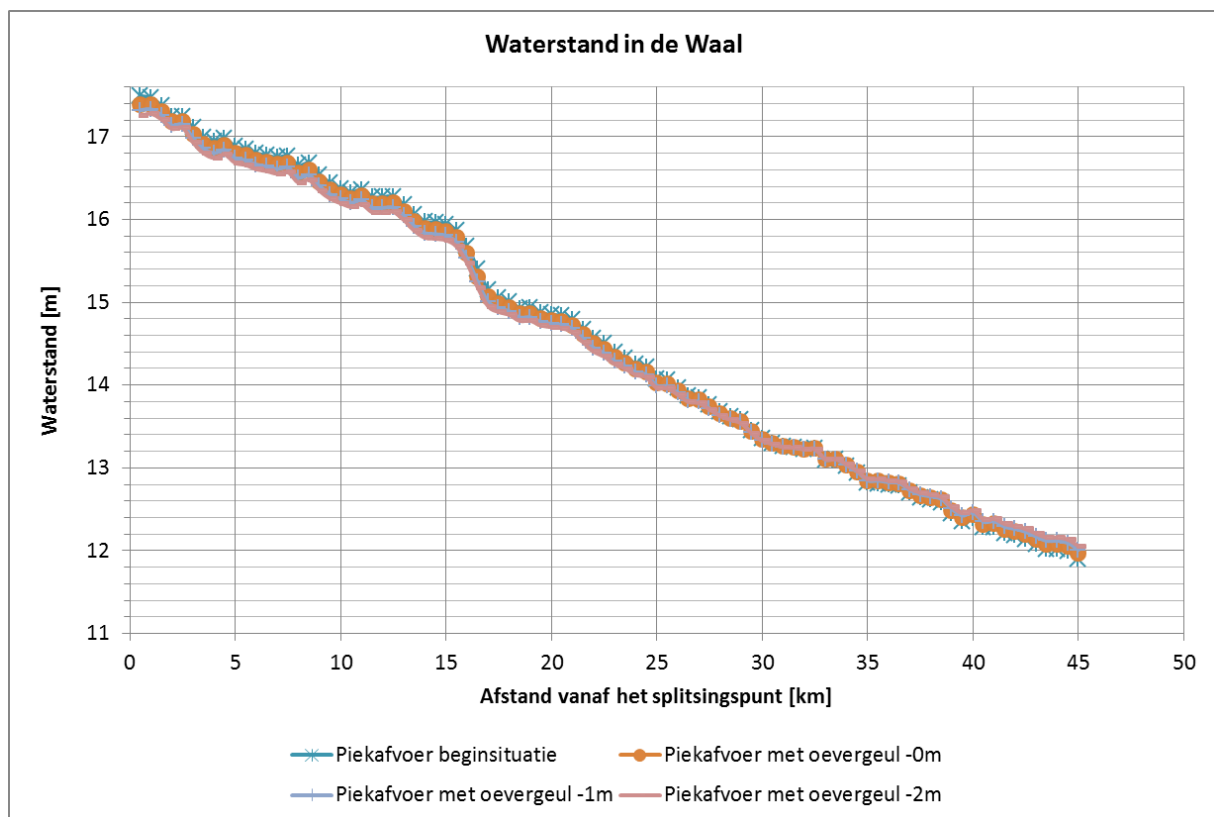
Figuur b.38 – Waterstand in Hoge afvoer & storm bij de Pannerdensch Kop naarmate de toepassingslengte toeneemt



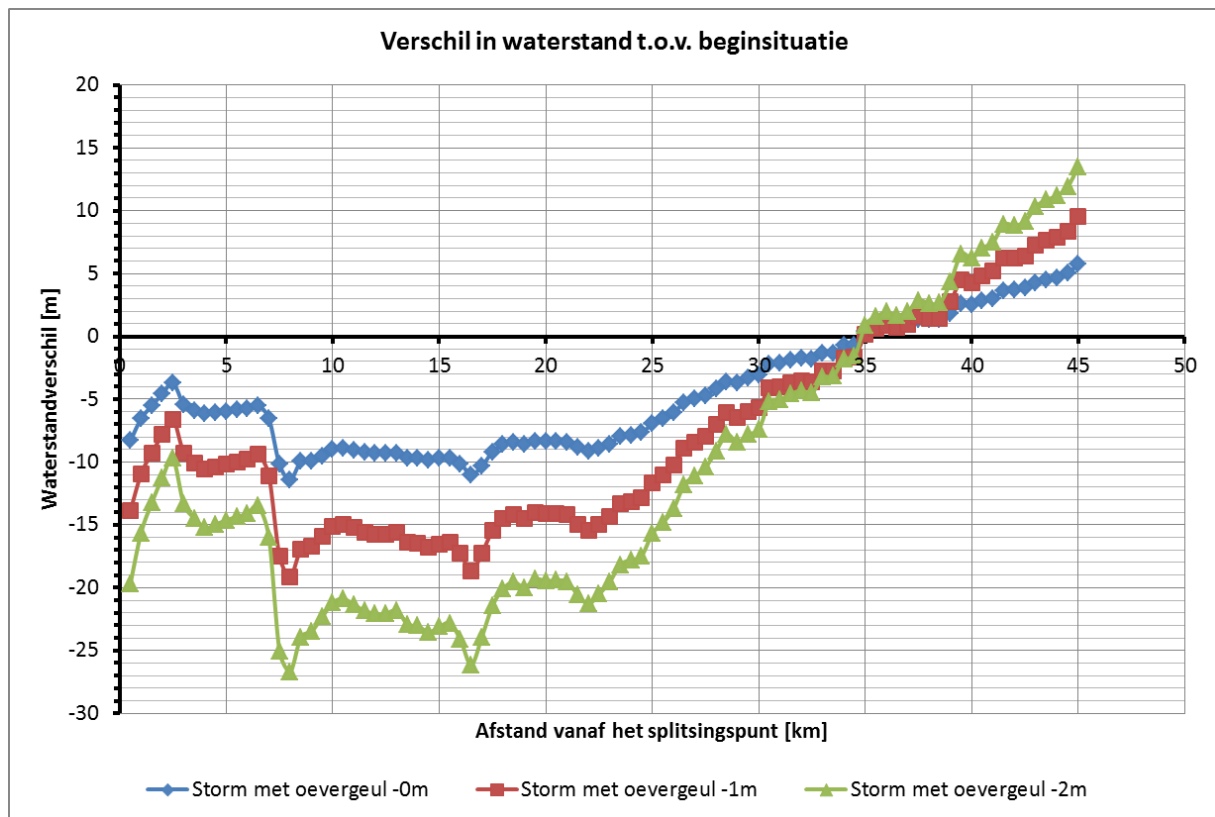
Figuur b.39 – Waterstand in Piekafvoer bij de Pannerdensch Kop naarmate de toepassingslengte toeneemt



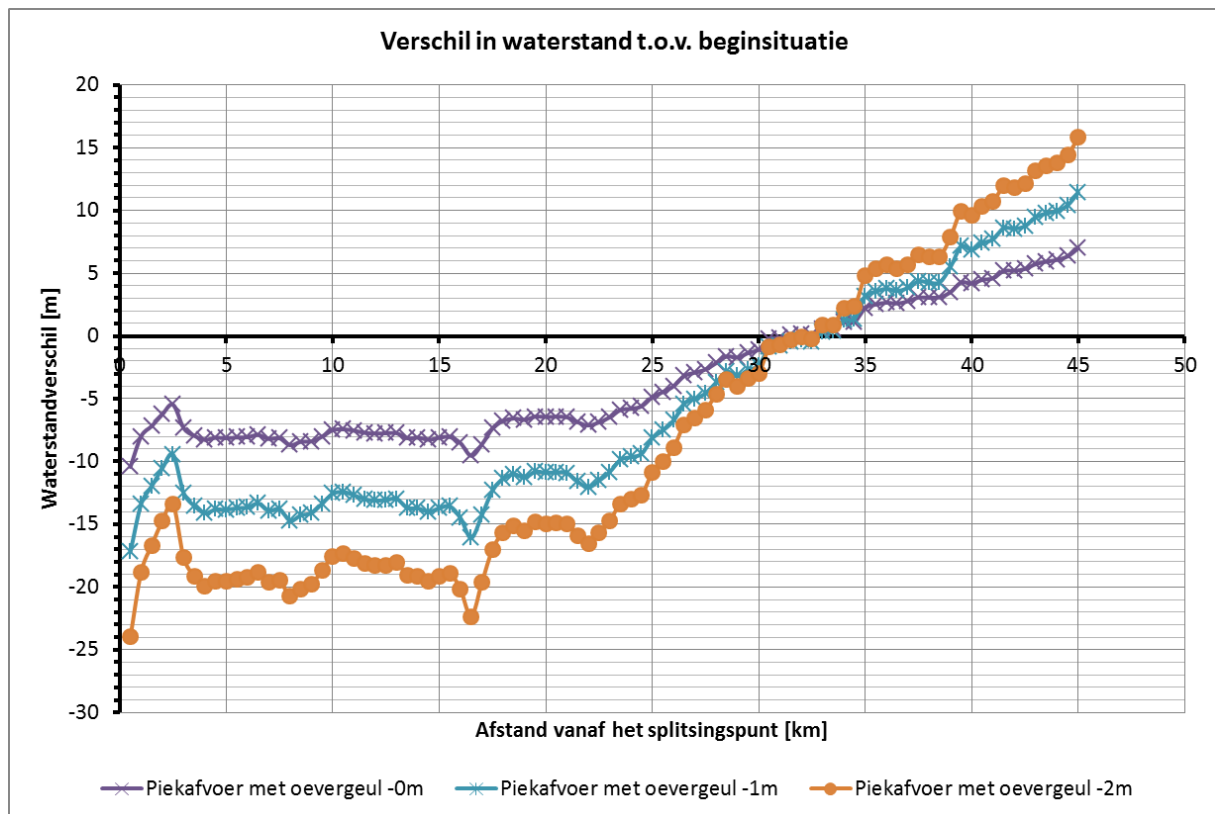
Figuur b.40 – Waterstand in de Waal in het scenario Hoge afvoer & storm



Figuur b.41 – Waterstand in de Waal in het scenario Piekafvoer



Figuur b.42 – Vershil in waterstand in Hoge afvoer & storm t.o.v. de beginsituatie met langsdammen van 0,5 tot 45 km



Figuur b.43 – Vershil in waterstand in Piekafvoer t.o.v. de beginsituatie met langsdammen van 0,5 tot 45 km

Overige resultaten

Wrijving

In beide scenario's wordt bij een oevergeulverlaging van 2 m over de lengte van 0 tot 45 km getest wat het effect is van de aanname betreffende de weerstand. De gegevens zijn weergegeven in tabel b.44. Indien White-Colebrook wordt gebruikt, is de wrijving hetzelfde gemodelleerd als oorspronkelijk in de uiterwaard. Deze aanname is gedaan in het onderzoek. Indien Chézy wordt gebruikt, is de wrijving hetzelfde gemodelleerd als in de hoofdgeul. Het verschil tussen het regelbereik bij dezen twee aannames wordt weergegeven door $\Delta Q_{\text{wrijving}}$.

Tabel b.44 – Effect van de aanname met betrekking tot weerstand op het regelbereik

Scenario	Wrijving	$Q_{\text{waal}} [\text{m}^3/\text{s}]$	$\Delta Q_{\text{totaal}} [\text{m}^3/\text{s}]$	$\Delta Q_{\text{wrijving}} [\text{m}^3/\text{s}]$
Hoge afvoer & storm	White-Colebrook	8799,10	233,17	
Hoge afvoer & storm	Chézy	8762,62	196,79	36,38
Piekafvoer	White-Colebrook	11089,90	327,80	
Piekafvoer	Chézy	11032,93	270,83	56,97

Selectieve toepassing

Aangezien het effect van de maatregel niet bij elke doorsnede hetzelfde is, is een logische redenering om deze maatregel alleen maar toe te passen in de effectieve delen van de rivier. De resultaten van deze vraag worden gepresenteerd in deze paragraaf.

Deze test wordt uitgevoerd bij een oevergeulverdieping van 1 meter in het scenario Hoge afvoer & storm.

Bij de doorsnede 24,5 tot en met 26,5 wordt voor de laatste keer een debietsverschil van groter dan $10 \text{ m}^3/\text{s}$ gemeten. Alle gebieden tussen de 0 en 26,5 en met een waarde groter dan $9 \text{ m}^3/\text{s}$ worden geselecteerd. Dit zijn de gebieden: 0,5 tot 2 km, 4,5 tot 6 km, 8 tot 10 km, 15,5 tot 19 km en 22 tot 26,5 km. Vervolgens wordt alleen in deze doorsnedes langsdammen geplaatst.

Het regelbereik van langsdammen over een lengte van 0,5 tot 26,5 km is $139,21 \text{ m}^3/\text{s}$. Als men vervolgens alleen de selectie bij elkaar optelt komt, is het regelbereik $127,74 \text{ m}^3/\text{s}$. De verwachting is dat door het gebruik maken van selectieve toepassing het regelbereik ongeveer $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$ afneemt. Echter blijkt uit de resultaten dat het nieuwe regelbereik $108,23 \text{ m}^3/\text{s}$ is. Dit is een afname van ongeveer $31 \text{ m}^3/\text{s}$. De conclusie die hieruit kan worden getrokken is dat als de langsdammen achter elkaar worden geplaatst, deze elkaar versterken, zodat het regelbereik groter wordt.

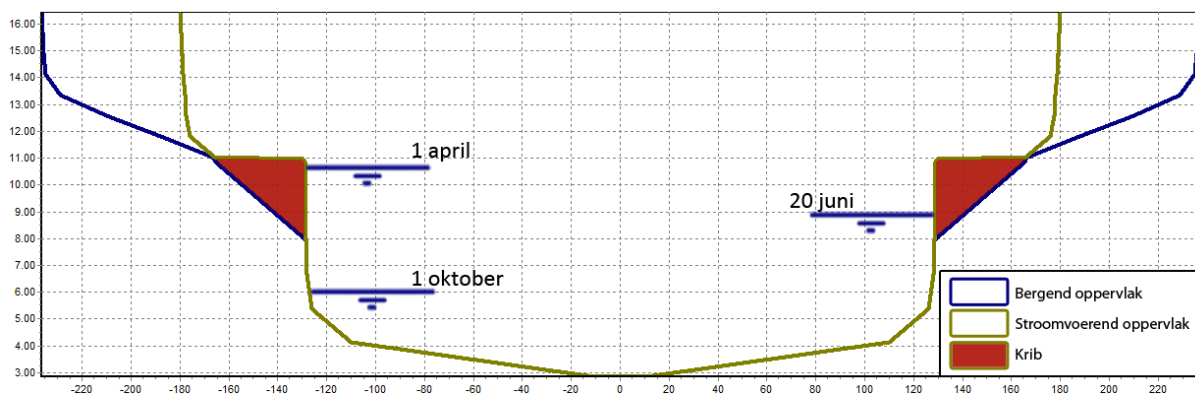
Lage afvoer

In het laagwaterscenario is er gekeken naar het effect van langsdammen bij 3 afvoeren van Lobith: 3400 m³/s (1 april, begin lage afvoergolf), 2125 m³/s (20 juni, begin zomer) en 520 m³/s (1 oktober, dal). De waterstanden die bij deze debieten horen zijn te zien in tabel b.45.

Tabel b.45 – Waterstand op de Waal bij de Pannerdensch Kop in de laagwaterscenario's

Datum	Afvoer bij Lobith	Waterstand Waal
1 april	3400 m ³ /s	10,74 m
20 juni	2125 m ³ /s	8,99 m
1 oktober	520 m ³ /s	6,00 m

Vervolgens kan in het profiel bekeken worden waar de langsdammen ten opzichte van de waterstand ligt, zie figuur b.44.



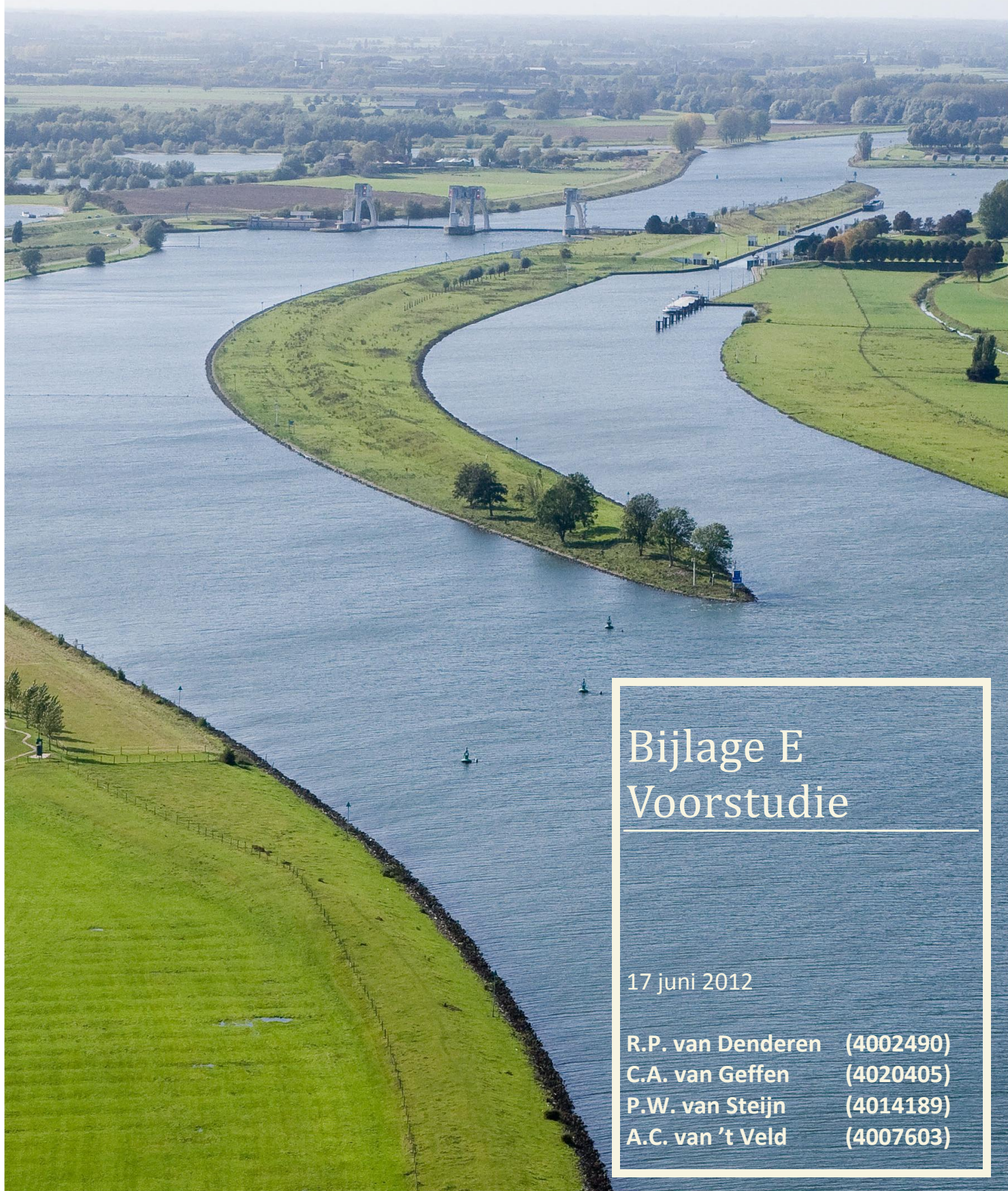
Figuur b.44 – Doorsnede van de Waal bij het splitsingspunt bij lage afvoer

Op 1 april ligt de waterstand net onder de hoogte van de langsdam. Rond deze tijd is het echter nog niet erg als er iets meer water over de Waal stroomt, zolang er in het scenario Lage afvoer met opzet IJsselmeer maar voldoende water is om het IJsselmeer te vullen. Door het sturen van de hoogte van de drempel en de openingen kan geregeld worden dat er juist wel of geen water door de oevergeul heen stroomt.

Op 20 juni is de waterstand bijna aan de voet van de langsdam. Op dit moment stroomt de oevergeul niet meer mee, aangezien het water nooit over de drempel zal kunnen stromen. Het enige effect dat de langsdammen zullen bieden is dat de waterstand licht wordt verhoogd ten opzichte van kribben. Aangezien er normaal gesproken wel water tussen de kribben staat en nu dit gebied door de langsdammen wordt afgesloten. Dit zal dus alleen een positief effect leveren.

Ten slotte zal er op 1 oktober een waterstand zijn die ver onder de kribben ligt. Zelfs met een bodemverlaging van de oevergeul van twee meter zonder drempel zal er geen water door de oevergeul heen stromen. Langsdammen zullen dus geen effect hebben op de afvoerverdeling bij extreem lage afvoer.

Beïnvloeding Afvoerverdeling Rijn



Bijlage E Voorstudie

17 juni 2012

R.P. van Denderen (4002490)

C.A. van Geffen (4020405)

P.W. van Steijn (4014189)

A.C. van 't Veld (4007603)

Voorstudie

Beïnvloeding Afvoerverdeling Rijn

CT3000-09 Bachelor Eindwerk

17 juni 2012

Technische Universiteit Delft

Begeleiders

Ir. T. Rijcken

Ir. T. de Haan

Studenten

R.P. van Denderen (4002490)

C.A. van Geffen (4020405)

P.W. van Steijn (4014189)

A.C. van 't Veld (4007603)



Voorwoord

Voor u ligt de Voorstudie die door de projectgroep BAR, Beïnvloeding Afvoerverdeling Rijn, is samengesteld. Deze projectgroep is samengesteld ten behoeve van het Bachelor Eindwerk van Civiele Techniek van de TU Delft. De projectgroep bestaat uit vier studenten die negen weken hebben gewerkt om een manier te vinden om de afvoerverdeling van de Rijn te beïnvloeden. In deze Voorstudie wordt een basis gelegd voor de gewenste afvoeren die met de maatregelen bereikt moet worden. Daarnaast worden er verschillende maatregelen verder onderzocht in de individuele stukken van de studenten.

Wij willen graag onze begeleiders ir. T. Rijcken en ir. T. de Haan bedanken voor hun ondersteuning en hulp. Zonder wie dit onderzoek niet mogelijk was geweest.

Beïnvloeding Afvoerverdeling Rijn, BAR

Delft, juni 2012

Leeswijzer

In hoofdstuk 1 en 2 vindt u een inleiding en een probleemstelling, waarna in hoofdstuk 3 de doelstelling wordt gepresenteerd met daarin de hoofd- en deelvragen. Na de doelstelling volgt een toelichting op de werking van het software pakket SOBEK dat gebruikt wordt bij dit Bachelor Eindwerk. Vervolgens worden achtereenvolgens de eerste drie deelvragen uitgewerkt in de hoofdstukken 5, 6, 7 en 8.

Inhoudsopgave

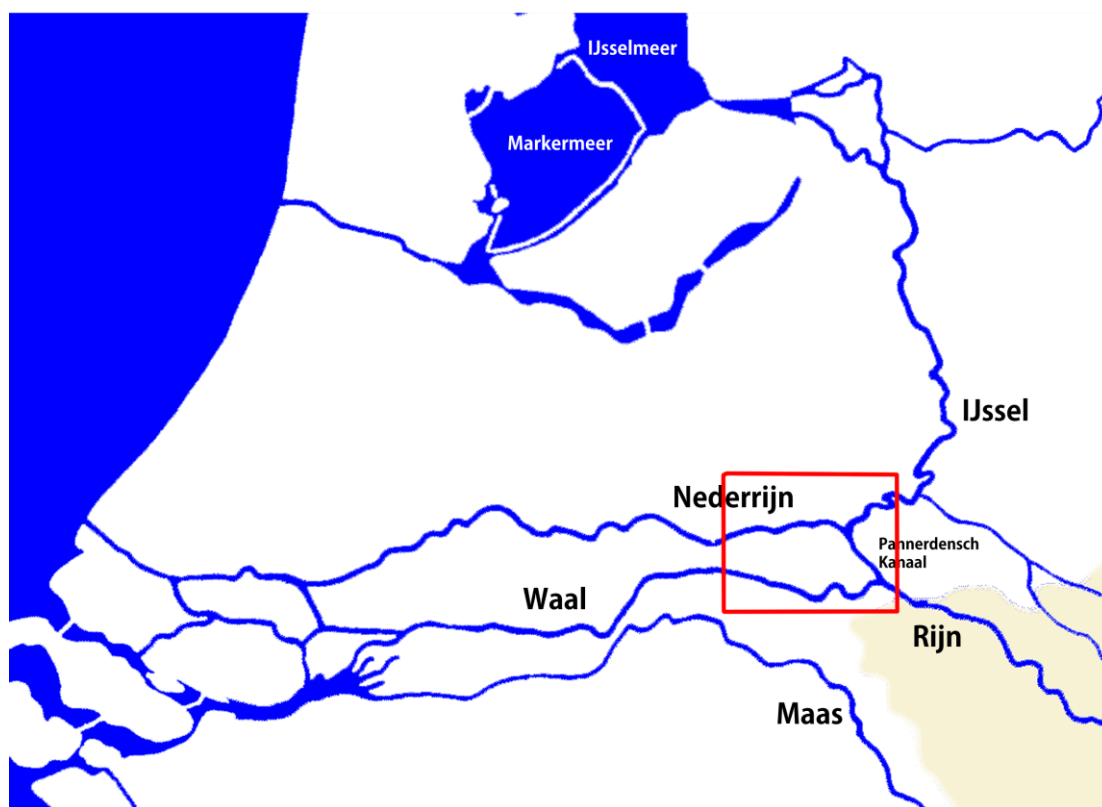
1	Inleiding	1
2	Probleemstelling.....	3
3	Doelstelling	4
3.1	Hoofdvraag	4
3.2	Deelvragen	4
4	SOBEK	5
4.1	Werking SOBEK.....	5
4.2	Theoretische achtergrond	9
5	Eisen.....	11
5.1	Veiligheid	11
5.2	Zoetwatervoorziening	11
5.3	Scheepvaart.....	12
6	Scenario's.....	13
6.1	Deltascenario.....	13
6.2	Hydraulische scenario's	13
6.3	Huidige stand van regelwerken.....	17
6.4	Randvoorwaarden	20
7	Gewenste afvoerverdelingen	27
7.1	Scenario Piekafvoer	27
7.2	Scenario Hoge afvoer & storm	29
7.3	Scenario Lage afvoer met opzet IJsselmeerpeil	32
7.4	Scenario Lage afvoer zonder opzet IJsselmeerpeil.....	37
7.5	Gewenste veranderingen in afvoerverdeling.....	38
8	Maatregelen	40
8.1	Mogelijke maatregelen	40
8.2	Effectieve en haalbare maatregelen	45
	Literatuurlijst	47
	Auteursvermelding.....	49
	Nawoord.....	50
	Bijlagen	51
	Bijlage A: Berekening Opzet IJsselmeer.....	52

1 Inleiding

Nederland kent een lange geschiedenis in de strijd tegen het water. Al vele eeuwen wordt er alles aan gedaan om het overstromingsrisico zoveel mogelijk te beperken. De eerste bewoners van de laaggelegen gebieden in Nederland maakten al kunstmatige heuvels om het water buiten de deur te houden. Later werd er begonnen met de bedijking van de rivieren en kustgebieden om het achterliggende land verder te kunnen beschermen tegen overstromingen. Na de watersnoodramp in 1953 werden er, volgens het Deltaplan, een serie van Deltawerken aangelegd om een ramp als deze in de toekomst te voorkomen. Op dit moment is er veel aandacht voor de afvoer van de Nederlandse rivieren wegens toekomstige zeespiegelstijgingen en een verhoging van deze hoge afvoeren. Waarmee de kans op overstromingen wordt vergroot. Met het project “Ruimte voor de Rivier” worden op 39 locaties maatregelen genomen om de rivier weer meer ruimte te geven om daarmee de afvoercapaciteit van de rivieren te vergroten. (1)

Naast de hierboven beschreven geschiedenis van de hoogwaterbescherming van Nederland krijgt momenteel ook de lage rivierafvoer steeds meer aandacht. In een droge periode moet er namelijk voldoende zoetwater beschikbaar zijn voor onder andere de Nederlandse landbouw en drinkwatervoorziening. Lage rivierafvoeren hebben verder negatieve gevolgen voor de scheepvaart welke minder tot geen vracht kunnen vervoeren door een te lage waterstand op de hoofdvaarwegen. Ook zorgt de toenemende zoutindringing in het Noordzeekanaal en Rijn-Maas mondingsgebied bij een lage rivierafvoer voor een verzilting voor de Nederlandse landbouw en drinkwatervoorziening (2) (3). De verwachting is dat in de toekomst de toevoer van zoetwater in drogere perioden afneemt en de benodigde zoetwater vraag toeneemt. Hierdoor zullen verschillende tekorten ontstaan.

Aangezien Nederland in de toekomst steeds meer te maken krijgt met extremere klimaatcondities, zullen verschillende maatregelen genomen moeten worden om het huidige overstromingsrisico bij extreem hoge afvoer te kunnen handhaven en de negatieve effecten bij een extreem lage afvoer te minimaliseren. Daarom zullen verschillende maatregelen bekeken worden, die de waterstanden en de afvoerdeling van de Nederlandse rivieren beïnvloeden om bij zowel een lage als een hoge rivierafvoer het water op een goede manier te kunnen afvoeren. In Figuur 1.1 is een overzichtskaart weergegeven van het gebied dat beschouwd zal worden. Het rood omkaderde deel van de kaart geeft het gebied weer waar maatregelen gemodelleerd zullen worden welke de afvoerdeling van de Rijn beïnvloeden.



Figuur 1.1 – Overzichtskaart Nederlandse rivieren met systeemgrens

2 Probleemstelling

In het kader van het Deltaprogramma zijn voor de lange termijn (tot 2100) vier verschillende Deltascenario's gedefinieerd voor het gebied van Rijnmond-Drechtsteden, welke onder andere een hogere rivier afvoer in natte tijden en een stijging van de zeespiegel verwachten (4). De verwachting is dat het huidige Nederlandse watersysteem niet voldoet om bij de maatgevende hoogwatersituatie in de toekomst het water af te voeren. Hierdoor zal in deze situatie het overstromingsrisico toenemen.

Naast de toename van de hoogwaterafvoer, kan verwacht worden volgens twee Deltascenario's dat de extreem lage afvoer van de Nederlandse rivieren in de zomer zal afnemen. Dit heeft een aantal problemen tot gevolg voor de scheepvaart en de zoetwatervoorziening.

West-Nederland is sterk afhankelijk van de waterinlaat vanuit de rivieren voor de zoetwatervoorziening. In droge perioden is voldoende zoetwater nodig in West-Nederland voor onder andere het op orde houden van de dijken, de drinkwatervoorziening, de industrie en de landbouw. Tevens is een groot deel van het zoetwater nodig voor het handhaven van de waterkwaliteit en voor het handhaven van de waterstanden in de polders. Verschillende innamepunten voor zoetwater spelen hierbij een rol waaronder het innamepunt bij Gouda. In een droge situatie treedt er een verzilting op van de Hollandse IJssel waardoor inname uit deze rivier een deel van het jaar niet mogelijk is. Verder sluit de inlaat bij Bernisse enkele keren per jaar door verzilting via de nieuwe waterweg. In het geval van langere droge periodes in de toekomst, zal de vraag naar zoetwater in West-Nederland stijgen terwijl deze twee inlaatpunten dreigen te verzilten, wat kan leiden tot een tekort aan zoetwater. (4)

Verder zullen er door de voorspelde extremere klimaatcondities vaker beperkingen voor de scheepvaartsector optreden. Een extreem lage rivierafvoer heeft kleinere waterdieptes tot gevolg, wat betekent dat schippers het gewicht van hun beladingen moeten verminderen om op de rivier te kunnen blijven varen. In een zeer extreme situatie is het zelfs mogelijk dat de rivier tijdelijk niet bevaarbaar is voor bepaalde scheepstypen. Daarnaast zullen bij extreem hoog watercondities de zeekeringen vaker gesloten worden, wat tevens een belemmering van de scheepvaart oplevert.

Door de steeds extremer wordende afvoeren, komt er meer vraag naar het sturen van de afvoerdeling van de Rijn wat op dit moment nog nauwelijks mogelijk is. Door het sturen kan bij een hoge en lage afvoer het water op een optimale manier verdeeld worden om te voldoen aan gestelde eisen met betrekking tot veiligheid, zoetwatervoorziening en scheepvaart voor het jaar 2050.

3 Doelstelling

Volgend uit de probleemstelling beschreven in hoofdstuk 2, is de volgende hoofdvraag gedefinieerd met bijbehorende deelvragen welke in de komende hoofdstukken beantwoord zullen worden.

3.1 Hoofdvraag

Welke combinaties van maatregelen zijn mogelijk om bij verschillende scenario's de afvoerverdeling van de Rijn te beïnvloeden, zodat wordt voldaan aan de eisen op het gebied van veiligheid, zoetwatervoorziening en scheepvaart?

3.2 Deelvragen

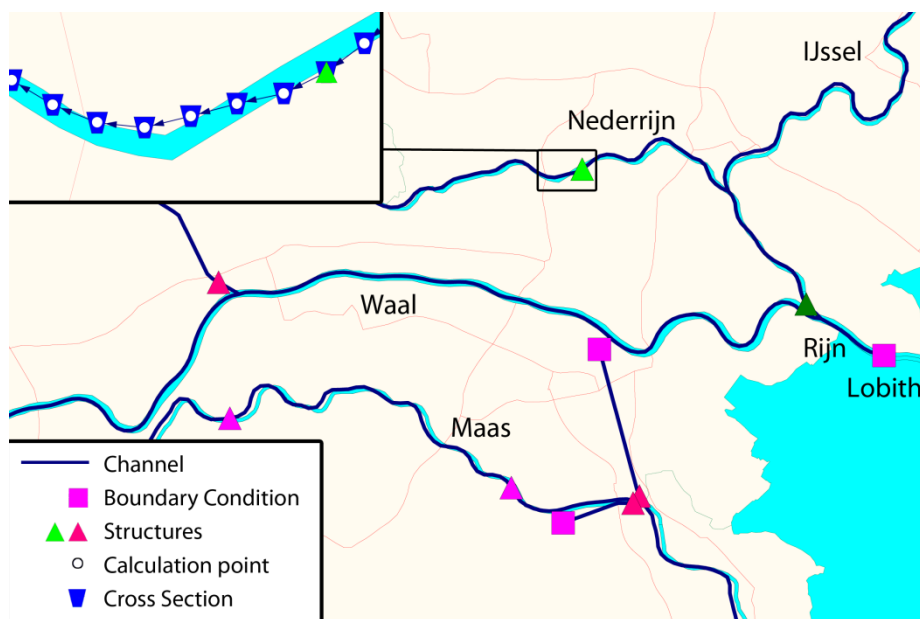
- 1) Wat zijn de eisen op het gebied van veiligheid, zoetwatervoorziening en scheepvaart?
- 2) Welke hydraulische scenario's zullen worden uitgewerkt om mogelijke maatregelen vast te stellen?
- 3) Met welke maatregelen kan de afvoerverdeling van de Rijn beïnvloed worden? Een keuze tussen de mogelijke maatregelen zal gemaakt worden op basis van het effect van de maatregel op de afvoerverdeling en de haalbaarheid van de maatregel.
- 4) Wat is bij de gedefinieerde scenario's het effect van de verschillende maatregelen op de afvoerverdeling?
- 5) Welke combinatie van maatregelen kan per scenario worden toegepast zodat wordt voldaan aan de gestelde eisen?
- 6) Op welke manier kunnen de maatregelen voor verschillende scenario's samengesteld worden tot combinaties van maatregelen die alle scenario's laten voldoen aan de gestelde eisen?

4 SOBEK

Voor het bepalen van de effecten van verschillende maatregelen op de afvoerverdeling van de Rijn wordt gebruik gemaakt van het softwarepakket SOBEK. Dit is een integraal pakket waarin een complex systeem van waterwegen gemodelleerd kan worden, waarna vervolgens de waterstroming, waterkwaliteit en morfologische verandering in het systeem gesimuleerd kunnen worden. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van een bestaand project waarin het Nederlandse hoofdwatersysteem gemodelleerd staan. Het onderzoek zal zich beperken tot het analyseren van de waterbeweging met behulp van het model. In paragraaf 4.1 zal de werking van SOBEK beschreven worden waarna in paragraaf 4.2 de theoretische achtergrond van het model aan bod komt.

4.1 Werking SOBEK

Om een beeld te geven van de mogelijkheden met het model wordt in deze paragraaf een toelichting gegeven op de werking van SOBEK. Met behulp van illustraties en tekstuele uitleg wordt uiteengezet welke gegevens ingevoerd kunnen worden en wat de uitkomsten zijn die het model levert. Dit om toe te lichten hoe deze software bij kan dragen aan het beantwoorden van de hoofdvraag. Alle Engelstalige termen zijn de benamingen van onderdelen zoals gebruikt in het softwarepakket. In Figuur 4.1 is een visualisatie van het model weergegeven met daarbij de betekenis van de symbolen in het figuur. De termen in de legenda komen in de komende paragrafen terug.



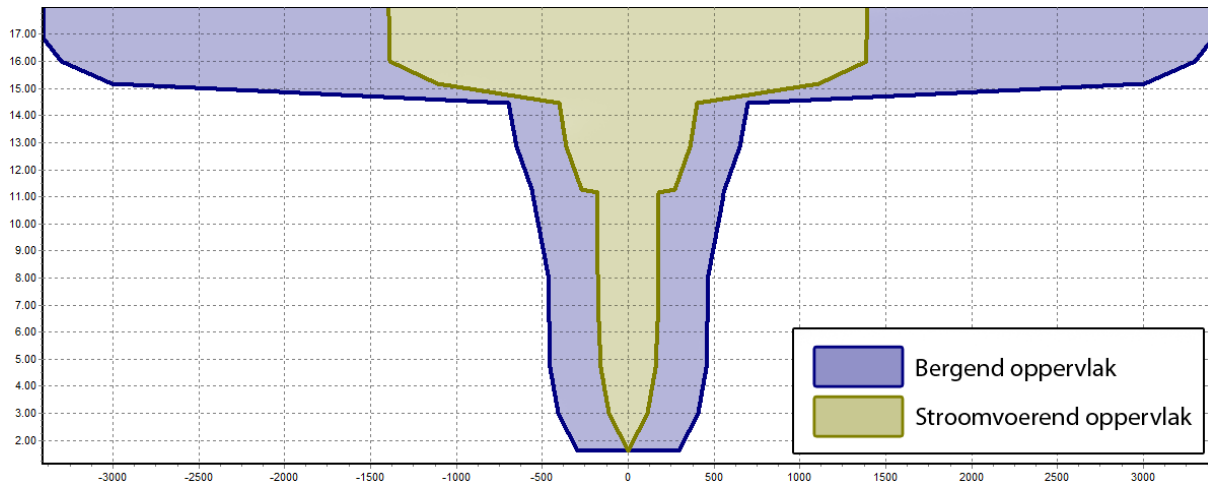
Figuur 4.1 – Visualisatie SOBEK (5)

4.1.1 Waterwegen

In het model wordt een waterweg ("Channel") als een lijn geschematiseerd. Op deze lijn worden punten geplaatst waarop het model de waterstand berekend, zogenaamde "Calculation Points". In de schematisatie die voor dit onderzoek wordt gebruikt is de afstand tussen deze berekeningspunten 500 meter. Tussen deze punten wordt het debiet weergegeven. Beide waarden worden berekend door het oplossen van de Saint-Venant vergelijkingen (zie paragraaf 4.2.1)

4.1.2 Dwarsdoorsneden

Van het gehele Nederlandse watersysteem zijn dwarsdoorsneden ("Cross Sections") opgenomen in het model. In Figuur 4.2 is één van deze doorsneden weergegeven. In het figuur is te zien dat in het model onderscheid wordt gemaakt in een bergend en een stroomvoerend oppervlak om de werkelijke doorsneden te schematiseren. In werkelijkheid tussen twee verschillende dwarsdoorsneden verloopt het geometrisch profiel lineair.



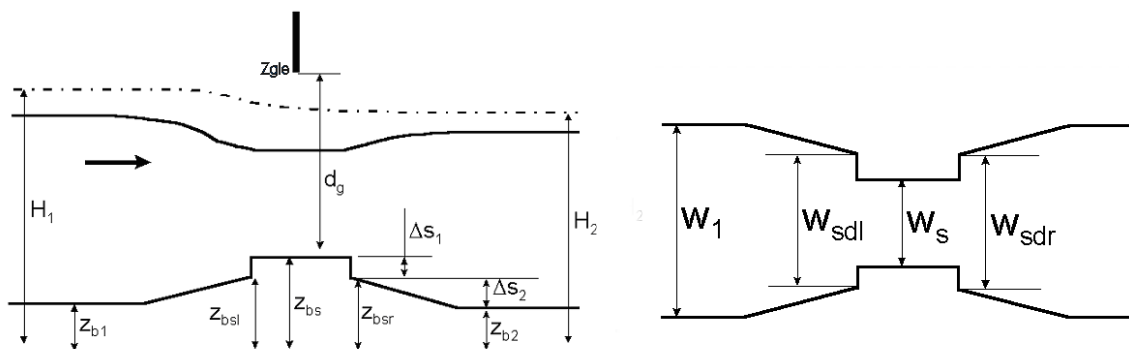
Figuur 4.2 – Voorbeeld "Cross Section" (5)

4.1.3 Randvoorwaarden

Aan de uiteinden van ieder netwerk dienen randvoorwaarden ("Boundary Conditions") opgelegd te worden. Voor elke randvoorwaarde kan een waterstand of een debiet ingevoerd worden welke zowel een constante waarde als een waarde variërend in de tijd kan aannemen. Naast dit is het mogelijk op de randen een relatie tussen het debiet Q en de waterstand h te definiëren.

4.1.4 Waterbouw constructies

In het model kunnen alle soorten waterbouwkundige constructies gemodelleerd worden. Het model kent een aantal standaard constructies waarvan de dimensies aangepast kunnen worden. Indien een constructie bestaat uit meerdere onderdelen kan een combinatie van constructies worden ingevoerd. (een zogenaamde "Compound Structure"). In het model zijn alle afmetingen van de huidige constructies opgenomen. In Figuur 4.3 is als voorbeeld een "General Structure" weergegeven met daarin aangegeven welke geometrische variabelen ingevoerd moeten worden.



Figuur 4.3 – Invoer variabelen voor een "General Structure" (6)

4.1.5 Controllers & Triggers

Dynamische waterbouwconstructies kunnen in het model virtueel geregeld worden. In het model kunnen meetpunten ("Measurement Points") toegevoegd worden welke aan een constructie gekoppeld kunnen worden. Bij elke constructie kunnen "Triggers" gedefinieerd worden. Als een zekere meetwaarde op een meetpunt over- of onderschreden wordt, wordt door de trigger een controller geactiveerd welke het regelwerk in een andere positie zet.

4.1.6 Wind

In het model kan een windkracht variërend in richting en tijd worden ingevoerd welke bij het berekenen van de debieten en waterstanden meegenomen wordt in de bewegingsvergelijking (zie paragraaf 4.2.1). Hiermee wordt windopzet in het model meegenomen.

4.1.7 Mogelijkheden voor verdere modellering van het systeem

Voor dit onderzoek dienen verschillende onderdelen in het model aangepast en/of uitgebreid te worden. Per scenario kunnen in de tijd variërende randvoorwaarden in het model toegevoegd worden. In het geval van een hoge rivierafvoer moet in dit onderzoek bijvoorbeeld een maatgevende hoogwaterafvoergolf van de Rijn gedefinieerd worden. Deze zal in het model ter plaatse van Lobith ingevoerd worden als een functie van de tijd. Verder zal ook op andere punten bepaald worden welke randvoorwaarden opgelegd worden per scenario.

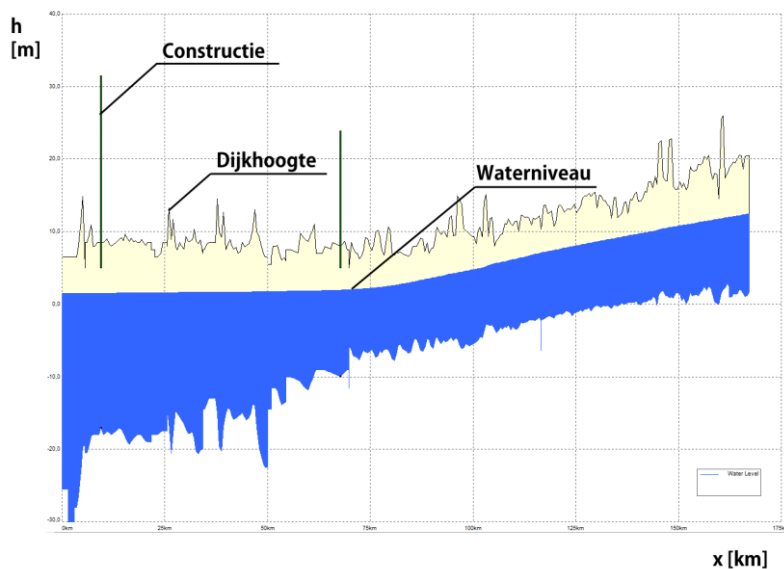
Om nieuwe maatregelen in te voeren in het model, kunnen verschillende onderdelen aangepast worden:

- Nieuwe constructies invoeren
- Huidige constructies aanpassen
- Dwarsdoorsneden van de waterloop aanpassen
- Triggers en Controllers wijzigen

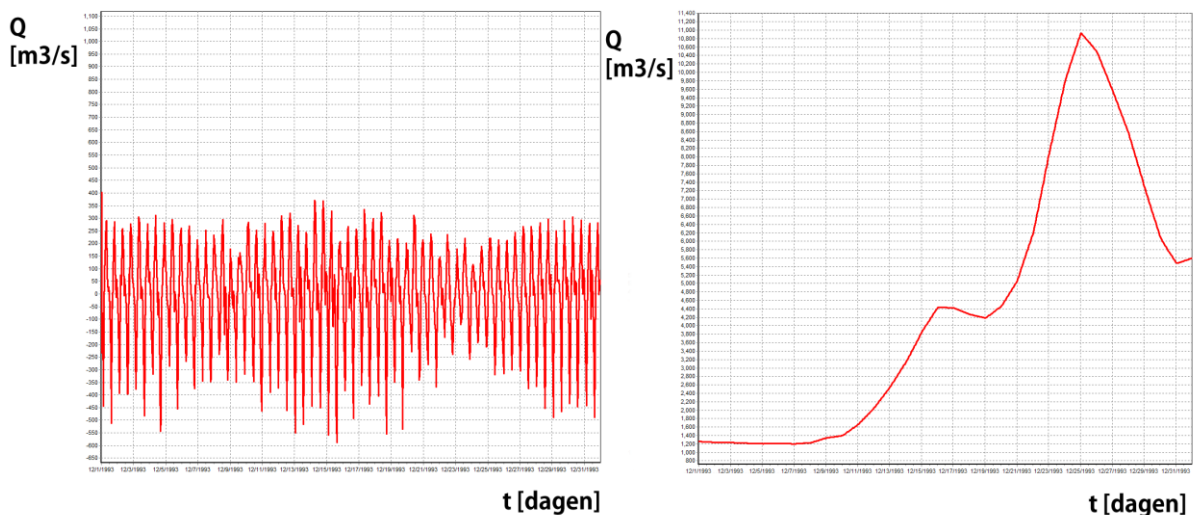
Maatregelen die in dit onderzoek geanalyseerd worden, kunnen worden gemodelleerd door één van bovenstaande aanpassingen toe te passen in SOBEK.

4.1.8 Resultaten

Als de gehele geometrie van het systeem geschematiseerd is, kan de stroming in het rivierenstelsel gesimuleerd worden. De resultaten hieruit kunnen vervolgens in grafieken en tabellen weergegeven worden. Op elk "Calculation Point" kan de variatie in waterstand worden weergegeven als functie van de tijd. Verder kan van elke waterloop een langsdoorsnede bekeken worden. Hierbij kan een animatie worden afgespeeld welke het waterstandsverloop in de tijd laat zien. Tevens kan op verschillende locaties een grafiek gegenereerd worden welke de debietvariatie in de tijd laat zien. In Figuur 4.4 en Figuur 4.5 zijn een aantal mogelijke resultaten in grafieken weergegeven.



Figuur 4.4 – Voorbeeld Waterstandsverloop op 1 tijdstip (5)



Figuur 4.5 – Voorbeelden variatie debiet in de tijd. Links: alleen invloed getij. Rechts: Alleen invloed rivierafvoer (5)

4.2 Theoretische achtergrond

Met behulp van SOBEK kunnen complexe watersystemen gemodelleerd worden. Binnen dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van de module "SOBEK-River" waarmee de vloeistofstroming, de morfologie (sedimenttransport) en de waterkwaliteit van een systeem beschreven worden. Zoals eerder vermeld wordt in dit onderzoek alleen gekeken naar het hydrodynamische deel van het model, oftewel het beschrijven van de waterstroming in het Nederlandse watersysteem. In deze paragraaf wordt de achtergrond van het model beschreven.

In "SOBEK-River" zijn zowel 1-dimensionale als 2-dimensionale simulaties van de stroming mogelijk. Het model dat in dit onderzoek geanalyseerd wordt, simuleert de hydrodynamica in 1D. Dit wil zeggen dat elke waterweg in het systeem gemodelleerd wordt als een lijn. Zoals in paragraaf 4.1 beschreven is, zijn er in het model "Calculation points" opgenomen waarop de waterstand berekend wordt door middel van het numeriek oplossen van de "Saint-Venant" vergelijkingen. Tussen de "Calculation points" worden vervolgens de debieten berekend.

4.2.1 Saint-Venant vergelijkingen

In Vergelijking 4.1 en Vergelijking 4.2 worden de Saint-Venant vergelijkingen (ook wel ondiepwatervergelijkingen genoemd) weergegeven. Deze leveren een gekoppeld stelsel voor twee onbekenden, het debiet en de waterstand, als functie van de plaats en de tijd. Met behulp van begin- en randvoorwaarden wordt dit stelsel numeriek opgelost. De bewegingsvergelijking volgt uit een impulsbalans en bevat vijf verschillende termen respectievelijk de lokale versnelling, de advectieve versnelling, de verhangkracht, de hydraulische weerstand en de windwrijving. (6)

Vergelijking 4.1 – Continuïteitsvergelijking

$$\frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat}$$

Vergelijking 4.2 – Bewegingsvergelijking

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_f} \right) + g A_f \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{g Q |Q|}{C^2 R A_f} - W_f \frac{\tau_{wi}}{\rho_w} = 0$$

A_f = Natte doorsnede [m^2]

q_{lat} = Zijdelings ("Lateral") debiet per lengte eenheid [m^3/s]

Q = Debiet [m^3/s]

t = Tijd [s]

x = Afstand [m]

g = Zwaartekrachtversnelling [m/s^2]

h = Waterniveau (t.o.v. referentie niveau) [m]

C = Chézy coëfficiënt [$m^{1/2}/s$]

R = Hydraulische straal [m]

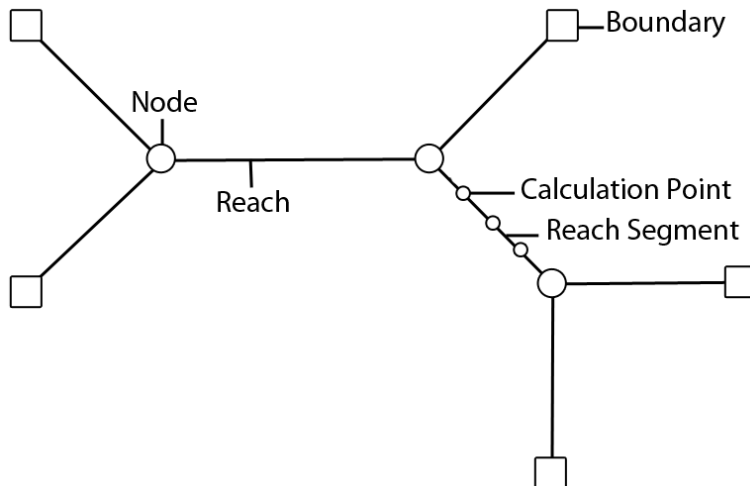
W_f = Stroomvoerende breedte [m]

τ_{wi} = Wind schuifspanning [N/m^2]

ρ_w = Dichtheid water [kg/m^3]

4.2.2 Berekening model

In het model wordt op elk uiteinde van een waterweg een randvoorwaarde gedefinieerd. Met behulp van deze randvoorwaarden worden door het numeriek oplossen van de ondiepwatervergelijkingen de waterstanden en de debieten in het systeem berekend. Hierbij wordt op alle "Calculation Points" een waterstand berekend. De debieten worden per "Reach Segment" berekend. In het model moet ook een tijdstap worden gedefinieerd. Voor elk tijdstip worden alle waterstanden en debieten in het systeem berekend. In Figuur 4.6 is een netwerk schematisch weergegeven. (6)



Figuur 4.6 – Netwerk model (6)

5 Eisen

Getracht zal worden de afvoer van de Rijn op een dusdanige wijze over de Rijntakken te verdelen dat voldaan wordt aan de eisen op het gebied van veiligheid, zoetwatervoorziening en scheepvaart. Daartoe dienen deze eisen eerst bepaald te worden.

5.1 Veiligheid

Langs de Waal, het Pannerdensch Kanaal en de IJssel is nog ruimte voor rivierverruiming en dijkverhogingen hetgeen impliceert dat er nog rek zit in de capaciteit van deze Rijntakken. De veiligheid tegen overstromingen bij een veranderende afvoerverdeling kan dan ook worden gewaarborgd. Langs de Nederrijn is na fase I Ruimte voor de Rivier echter geen ruimte meer voor rivierverruiming. Daarnaast is het ongewenst de dijken langs deze Rijntak te verhogen. Door het Ministerie van Verkeer en Waterstaat is daarbij vastgesteld dat bij de huidige geometrie en primaire waterkeringen maximaal $3.376 \text{ m}^3/\text{s}$ via de Nederrijn kan worden afgevoerd. De schade ten gevolge van een eventuele overstroming van de Nederrijn of verder benedenstrooms de Lek is heel groot. Het is dan ook gewenst het risico van overstromingen van de Nederrijn en de Lek te verkleinen door de Nederrijn en daarmee ook de Lek verder te ontzien. Er zal daartoe gestreefd worden naar een maximale afvoer van de Nederrijn van $2.600 \text{ m}^3/\text{s}$. (7)

5.2 Zoetwatervoorziening

Bij lage afvoeren van de Rijn dient de afvoerverdeling zodanig beïnvloed te worden dat aan de eisen op het gebied van zoetwatervoorziening voldaan wordt. Het benodigde debiet voor de doorspoeling van de Zuid-Hollandse polders en het peil van het IJsselmeer spelen daarin een belangrijke rol.

5.2.1 Zuid-Hollandse polders

Bij een afvoer van de Rijn te Lobith lager dan $1.100 \text{ m}^3/\text{s}$ dringt de zouttong in de Nieuwe Waterweg binnen tot voorbij de Hollandse IJssel. Dit heeft tot gevolg dat door een te hoog chloridegehalte het bij Gouda gelegen zoetwaterinlaatpunt voor de Zuid-Hollandse polders niet langer gebruikt kan worden. Met het ondertekenen van het waterakkoord Kleinschalige Wateraanvoervoorzieningen (KWA) heeft het Ministerie van Verkeer en Waterstaat zich in het geval van een afvoer van de Rijn te Lobith lager dan $1.100 \text{ m}^3/\text{s}$ verplicht tot het leveren van een debiet van $17,9 \text{ m}^3/\text{s}$ vanuit het Amsterdam-Rijnkanaal en de Lek. Dit water is in de Zuid-Hollandse polders benodigd voor de peilhandhaving ter voorkoming van zettingen, voor de landbouw en voor de doorspoeling ter voorkoming van vergaande verzilting. In de toekomst zal het benodigde debiet door onder andere een zeespiegelstijging toenemen. Als aanvulling op het KWA kan in extreem droge zomers dan gebruik worden gemaakt van de Tolhuissluisroute, waarmee water wordt aangevoerd vanuit het IJsselmeer. (8)

5.2.2 Amsterdam-Rijnkanaal

Ten behoeve van koelwater voor onder andere energiecentrales in Utrecht en Diemen en ter voorkoming van zoutindringing vanuit het Noordzeekanaal is in het Amsterdam-Rijnkanaal ten noorden van het stuwpand Hagestein een debiet van $10 \text{ m}^3/\text{s}$ benodigd. Daar het Amsterdam-Rijnkanaal geen noemenswaardige bron bevat, dient dit debiet vanuit het stuwpand Hagestein ingelaten te worden. (3)

5.2.3 Noord-Nederland en Noord-Holland

Ten behoeve van de zoetwatervoorziening van Noord-Nederland en Noord-Holland is een afvoer van de IJssel van 285 m³/s geëist. (9) Deze afvoer zorgt namelijk voor een redelijke vaardiepte op de IJssel; voldoende koelwater voor de centrale Herculio bij Zwolle en voldoende zoetwater ten behoeve van de om het IJsselmeer liggende polders. Bij lage afvoeren te Lobith zal niet zonder meer aan deze eis van 285 m³/s kunnen worden voldaan. Het Deltascenario 'STOOM' dat als uitgangspunt genomen is, voorspelt daarbij onder andere lagere afvoeren van de Rijn in de zomer; een grotere watervraag vanuit de polders liggende om het IJsselmeer en een zeespiegelstijging. (4) Een mogelijkheid om in de toekomst toch aan de zoetwatervraag van Noord-Nederland, Noord-Holland en indien nodig via de Tolhuissluisroute van Zuid-Holland te kunnen blijven voldoen en ondertussen onder vrij verval op de Waddenzee te kunnen blijven spuien, is het verhogen van het peil van het IJsselmeer met 1,5 m. Het peil van het Markermeer zal in dat geval om ecologische redenen niet worden verhoogd. (10)

5.3 Scheepvaart

De minimale waterdiepte in de vaargeul wordt gegeven bij Overeengekomen Lage Rivierstand (OLR). OLR betreft de bij Overeengekomen Lage Afvoer (OLA) optredende waterstand, waarbij OLA de gemiddelde dagafvoer met een onderschrijdingskans van 5% over een bepaalde periode is. OLA is vastgesteld op 1.020 m³/s bij Lobith. De afvoerverdeling over de Rijntakken bij OLA is weergegeven in Tabel 5.1. (11) Daarbij is ten behoeve van verversing altijd 25 m³/s gereserveerd voor de gestuwde Nederrijn.

Tabel 5.1 – Afvoerverdeling bij OLA

Splitsingspunt	Rijntak	Debiet (m ³ /s)
Pannerdensche Kop	Waal	823
	Pannerdensch Kanaal	197
IJsselkop	Nederrijn	25
	IJssel	172

De Waal is aangemerkt als hoofdtransportas en dient daartoe geschikt te zijn voor tweestrooksverkeer van scheepvaartklasse VIc (zesbaksduwstel). (12) De eis voor scheepvaartklasse VIc is een minimale waterdiepte van OLR -2,80 m en een minimale vaargeulbreedte van 170 m. OLR ligt bij Lobith op NAP +7,52 m. Bij een waterstand bij Lobith van NAP +9,24 m of hoger wordt de diepgang van de scheepvaart niet langer gehinderd. (13)

Het Pannerdensch kanaal, de Nederrijn en de IJssel zijn aangemerkt als hoofdvaarweg en dienen daartoe geschikt te zijn voor tweestrooksverkeer van scheepvaartklasse Va (groot Rijschip, éénbaksduwstel). (12) De eis voor deze scheepvaartklasse is een minimale waterdiepte van OLR -2,50 m (13) en een minimale vaargeulbreedte van 56 m (11) voor rechte gedeelten van de rivier.

6 Scenario's

Aan de hand van klimaatscenario's en de eisen, die zijn gedefinieerd in hoofdstuk 5, zullen er hydraulische scenario's worden uitgewerkt om het effect van de mogelijke maatregelen te kunnen bepalen.

6.1 Deltascenario

De vier deltasenario's zijn opgesteld om een beeld te brengen van mogelijke toekomsten op het gebied van water. Deze scenario's verschillen in de verwachte sociaaleconomische groei en de verwachte klimaatverandering. Hierbij wordt gekozen om de maatregelen te toetsen voor het "worst-case" scenario met maximale sociaaleconomische groei en een snelle klimaatverandering. Dit scenario, genaamd Stoom, staat voor een groei van de economie en een verdubbeling van de bevolking in het gebied Rijnmond-Drechtsteden gepaard gaande met een vergaande verstedelijking en een sterke klimaatverandering. De verwachte klimaatverandering houdt een forse zeespiegelstijging, meer neerslag in de winter en drogere zomers in. Gevolg hiervan is dat de extremen in hoge en lage rivierafvoeren zullen toenemen. De getalsmatige gevolgen van de klimaatverandering zijn samengevat in Tabel 6.1. (4)

Tabel 6.1 – Kengetallen deltasenario "Stoom" (4) en PKB besluit (14)

	2000	2050
Gem. afvoer Rijn in februari (m ³ /s)	2.900	3.400
Gem. afvoer Rijn in september (m ³ /s)	1.800	1.300
Gem. afvoer Maas in februari (m ³ /s)	480	530
Gem. afvoer Maas in september (m ³ /s)	89	48
Zeespiegelstijging (cm)	-	35
Piekafvoer Rijn 1/1250 jaar (m ³ /s) (14)	16.000	18.000 (jaar 2100)
Piekafvoer Maas 1/1250 jaar (m ³ /s) (14)	3.800	4.600 (jaar 2100)
Extreem hoge afvoer Rijn 1/100 jaar (m ³ /s)	12.000	14.000
Extreem hoge afvoer Maas 1/100 jaar (m ³ /s)	2.900	3.200
Extreem lage afvoer Rijn 1/10 jaar (m ³ /s)	630	520
Extreem lage afvoer Maas 1/10 jaar (m ³ /s)	18	10
Gemiddelde neerslaghoeveelheid winter		+14%
Gemiddelde neerslaghoeveelheid zomer		-19%

6.2 Hydraulische scenario's

Aan de hand van de klimaatscenario's uit paragraaf 6.1 zijn drie hydraulische scenario's opgesteld.

6.2.1 Piekafvoer

In het scenario Piekafvoer wordt uitgegaan van afvoeren op de Nederlandse rivieren die een overschrijvingskans hebben van 1/1250 per jaar. Dit resulteert in te hanteren afvoergolven op de Rijn en de Maas met een top van 18.000 m³/s respectievelijk 4.600 m³/s in het jaar 2100. Deze waarde Bij een dergelijke piekafvoer wordt aangenomen dat er geen storm op zee is, zodat de stormvloedkeringen open staan. Verder wordt aangenomen dat het IJssel- en Markermeer voldoende spuicapaciteit hebben, zodat de optredende peilen van deze meren niet getoetst hoeven te worden aan de bij de meren horende grenspeilen.

6.2.2 Hoge afvoer & storm

In het scenario Hoge afvoer & storm wordt uitgegaan van een extreem hoge afvoer van de Rijn en Maas, die een overschrijvingskans hebben van 1/100 per jaar voorkomt, en een 1-op-100 storm op zee, waardoor er een kritieke situatie ontstaat in de regio Rotterdam-Dordrecht. Dit resulteert in te hanteren afvoergolven op de Rijn en de Maas met een top van $14.000 \text{ m}^3/\text{s}$ respectievelijk $3.200 \text{ m}^3/\text{s}$ in het jaar 2050. Daarnaast zal er een storm op zee zijn met een stormopzetduur van 33 uur en een windsnelheid op het IJsselmeer en Markermeer van 22 m/s uit westnoordwestelijke richting. (15) Hierbij wordt aangenomen dat bij het begin van de storm de waterstand gelijk is aan de gemiddelde zeespiegel (NAP +0,35 cm inclusief zeespiegelstijging) en dat de aanwijzingen voor een storm van 33 in plaats van 29 correct zijn voor het jaar 2050 en dat deze windsnelheid voor heel Nederland geldt. Tijdens deze storm zullen de stormvloedkeringen dicht zijn en kan er vanwege de hoge waterstanden op zee niet worden gespuid. De rivieren in de regio Rotterdam-Dordrecht stromen dan vol wat samen met de hoge afvoer de kritieke situatie geeft. Gevolg hiervan is dat het overtollige water naar het Volkerak, het Zoommeer en de Oosterschelde stroomt dat als één kom met een oppervlak van circa 38.000 ha gaat fungeren (meren zijn met naam aangegeven in Figuur 6.1). Als daar het Grevelingenmeer nog aan toegevoegd wordt, zal dit oppervlak toenemen tot circa 48.000 ha . Hierbij dient rekening te worden gehouden dat de Oosterschelde en het Grevelingenmeer beide zout zijn (zie Figuur 6.1) en dat de Volkerak- en Krammersluizen een maximale spuicapaciteit van $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ hebben. Indien nodig kan uitbreiding van deze capaciteit onderzocht worden. (16) Verder wordt aangenomen dat het IJsselmeer aan het begin van de hoogwaterafvoer op streefpeil ligt. Tot slot dient er rekening te worden gehouden met een windopzet op het Ketelmeer dat bij de monding van de IJssel samen met de hoge afvoer voor een kritieke situatie zal zorgen.



Figuur 6.1 – Overzicht van de wateren en dammen van de Zeeuwse en Zuid-Hollandse delta (16)

6.2.3 Lage afvoer

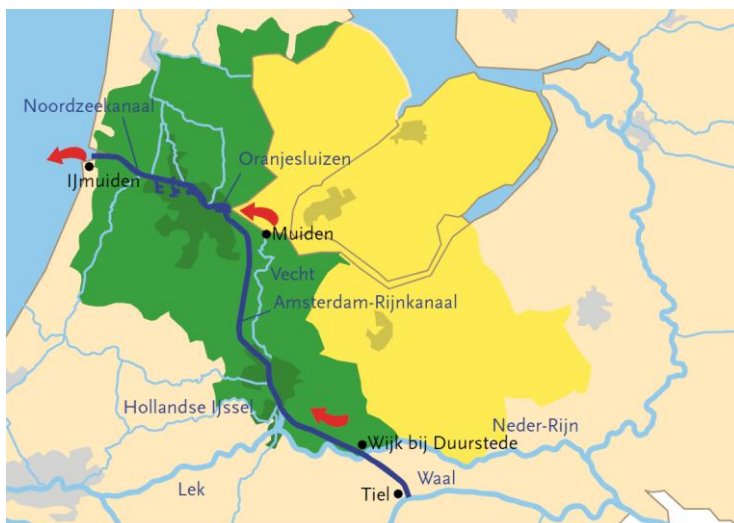
In de scenario's met een lage afvoer wordt uitgegaan van een extreem lage afvoer die gemiddeld eens in de tien jaar voorkomt. Dit resulteert in een te hanteren afvoergolf op de Rijn en de Maas met een dal van 520 m³/s respectievelijk 10 m³/s in het jaar 2050. Bij een dergelijke afvoer wordt aangenomen dat op zee sprake is van een gemiddelde waterstand en de stormvloedkeringen open zijn.

Kleinschalige wateraanvoervoorzieningen

Bij een lage afvoer van de Rijn is er een kans dat het inlaatpunt bij Gouda verzilt met als gevolg dat Delfland, Rijnland en Schieland geen zoet water meer krijgen. Zodra de afvoer van de Rijn lager is dan 1100 m³/s of het chloridegehalte in de Hollandsche IJssel bij de stormvloedkering te Krimpen aan den IJssel hoger is dan het chloridegehalte in de Rijn bij Lobith is, treedt het Kleinschalige wateraanvoervoorzieningen (KWA) in werking om deze waterschappen alsnog van zoet water te voorzien. (17)

In het waterakkoord KWA heeft het Rijk zich verplicht tot een levering van 13 m³/s uit het Amsterdam-Rijnkanaal (6 m³/s via het Noordergemaal en 7 m³/s via gemaal De Aanvoerder) en 4,9 m³/s uit de Lek. Het debiet over het Amsterdam-Rijnkanaal en de Lek wordt aangevoerd vanaf de Waal. (17) Verder is een eis voor het Amsterdam-Rijnkanaal dat er minimaal 10 m³/s ingelaten wordt ter voorkoming van indringing van zout water via het Noordzeekanaal wat het totaal benodigde debiet op het Amsterdam-Rijnkanaal 23 m³/s maakt. (3) De afvoer over het Amsterdam-Rijnkanaal is weergegeven in Figuur 6.2.

Indien deze aanvoeroute onvoldoende capaciteit oplevert, zal de Tolhuissluisroute in werking treden. Vanuit het IJmeer bij Amsterdam zal via onder andere de Amsterdamse grachten en de Tolhuissluis water richting Bodegraven worden gestuurd. (17)



Figuur 6.2 – Afvoer over het Amsterdam-Rijnkanaal (9)

Watervoorziening Noord-Nederland en Noord Holland

Voor de zoetwatervoorziening van Noord-Nederland is er 285 m³/s water over de IJssel nodig. Gevolg is dat er 210 m³/s overblijft voor de scheepvaart op de Waal. Dit is ver onder het benodigde debiet

voor de scheepvaart van $823 \text{ m}^3/\text{s}$, zoals genoemd in hoofdstuk 5. Als mogelijke oplossing wordt in hoofdstuk 5 aangedragen om het IJsselmeer 1,5 m op te zetten, zodat er minder water op de IJssel benodigd is en meer water over de Waal gestuurd kan worden in de droge periode. Dit resulteert in twee mogelijke scenario's met lage afvoer: Lage afvoer zonder opzet IJsselmeer en Lage afvoer met opzet IJsselmeer.

Lage afvoer zonder opzet IJsselmeer

In dit scenario wordt er niets veranderd aan de huidige eisen met betrekking tot de watervoorziening en scheepvaart. Doel is om aan zoveel mogelijk eisen te voldoen met als eerste prioriteit watervoorziening en rivier- en polderverversing en daarna scheepvaart.

Lage afvoer met opzet IJsselmeer

In het scenario Lage afvoer met opzet IJsselmeer wordt er voor gekozen om het IJsselmeer 1,5 m op te zetten in het voorjaar. Dit zal zijn na het hoogwaterseizoen en voor de daadwerkelijke droge afvoer in het najaar zijn, waarbij het hoogwaterseizoen eindigt op 1 april. Vanaf deze datum worden de spuien in de Afsluitdijk dichtgezet, zodat het IJsselmeer vol kan lopen. (18)

De opzet wordt gerekend vanaf het winterpeil van het IJsselmeer ($-0,4 \text{ m NAP}$) wat resulteert in een IJsselmeerpeil van $+1,1 \text{ m NAP}$. Dit is voldoende om heel Noord-Nederland en Noord-Holland van zoet water te voorzien. Deze opzet brengt echter ook nadelen met zich mee, zoals bijvoorbeeld dijkverhogingen langs het Ketel- en IJsselmeer en de aanpassing van dorpen en steden langs het IJsselmeer. (18)

Tijdens het opzetten van het IJsselmeer moet er wel rekening gehouden worden dat er minimaal $1710 \text{ m}^3/\text{s}$ nodig is voor het behouden van de scheepvaart op de Waal ($1400 \text{ m}^3/\text{s}$), verversing van de Nederrijn ($25 \text{ m}^3/\text{s}$) en de zoetwatervoorziening van Noord-Nederland en Noord-Holland over de IJssel ($285 \text{ m}^3/\text{s}$).

6.3 Huidige stand van regelwerken

In deze paragraaf worden de huidige standen van een aantal regelwerken in de Nederlandse rivieren bij de verschillende hydraulische scenario's uitgewerkt. In Figuur 6.1 is een overzicht weergegeven van alle dammen in de Zeeuwse en Zuid-Hollandse delta en is met een pijl aangegeven hoe het water kan worden geborgen bij het scenario "Hoge afvoer en storm". In Tabel 6.2 is weergegeven wat per scenario de standen van alle beweegbare regelwerken zijn.

Tabel 6.2 – Overzichtstabel huidige stand van beweegbare regelwerken

Naam	Piekafvoer	Hoge afvoer + Storm	Lage afvoer
Maeslantkering	Open	Dicht	Open
Hartelkering	Open	Dicht	Open
Haringvlietdam	Open	Dicht	Dicht
Volkerakdam	Open	Open	Dicht
Brouwersdam	Open	Dicht	Open
Philipsdam	Open	Open	Dicht
Oosterscheldekering	Open	Dicht	Open
Stuw bij Driel	Open	Open	Dicht
Stuw bij Amerongen	Open	Open	Dicht
Stuw bij Hagestein	Open	Open	Dicht
Hollandsche IJsselkering	Open	Dicht	Open

6.3.1 Maeslantkering

De Maeslantkering wordt gesloten zodra er een waterstand wordt verwacht van NAP +3,00 m bij Rotterdam of NAP +2,90 m bij Dordrecht. In alle anderen gevallen staat deze kering open. (15) (19)

6.3.2 Hartelkering

De Hartelkering wordt gesloten zodra er een waterstand wordt verwacht van NAP +3,00 m bij Rotterdam of NAP +2,90 m bij Dordrecht. In alle anderen gevallen staat deze kering open. De Hartelkering kan een waterhoogte keren van NAP +5,40 m + 0,20 m in verband met de toenmalige verwachte zeespiegelstijging maakt NAP +5,60 m. (15)(18)

6.3.3 Haringvlietdam

De Haringvlietdam bestaat uit een dam en een sluizencomplex, genaamd de Haringvlietsluizen.

Bij afvoeren te Lobith kleiner dan 1100 m³/s zijn de Haringvlietsluizen gesloten op de zout- en visriolen na. Tussen 1100 en 1700 m³/s bij eb en tussen 1500 m³/s en 1700 m³/s bij vloed (Kierbesluit (20)) staan de sluizen 25m² open. Tussen de 1700 en 9500 m³/s zal de kering langzaam opengaan. De Haringvlietsluizen staan helemaal open bij een afvoer groter dan 9500 m³/s bij Lobith. Bij storm worden de Haringvlietsluizen gesloten. (9) (16)

6.3.4 Volkerakdam

Tussen het Volkerak en de Oosterschelde is een sluizencomplex, genaamd Volkeraksluizen, en een spui gebouwd. Deze spui bestaat uit een viertal kokers van 30 m breed en een drempelhoogte van NAP -4,25 m. De maximale spuicapaciteit van de Volkeraksluizen is ongeveer 2500 m³/s. (16) De capaciteit van deze spui is te laag gebleken en er dienen dus maatregelen te worden getroffen om het Grevelingenmeer te gebruiken bij hoge afvoeren. (21)

6.3.5 Brouwersdam

De Brouwersdam zorgt voor een afsluiting van het Grevelingenmeer voor de Noordzee. De doorlaatsluis in de brouwersdam welke kan zorgen voor een getijverschil van 5 cm op het Grevelingenmeer met als functie om de natuur in het Grevelingenmeer te behouden. (22) (23) De sluis is circa 30 dagen per jaar gesloten ten behoeve van handhaving van het streefpeil. Dit betekent dat de Brouwersdam gesloten is bij storm. (18)(24)

6.3.6 Grevelingendam

De Grevelingendam bestaat uit een dam, schutsluis en spuisluis (Flakeese Spuisluis). (22) De spuisluis bestaat uit zes kokers die een verbinding vormen tussen het Grevelingenmeer en de Oosterschelde. Na 1987 is deze spuisluis echter buiten gebruik genomen. Er is onderzoek gedaan naar het opnieuw in gebruik nemen van deze Flakkeese Spuisluis, echter is dit vermoedelijk niet werkelijkheid geworden. (25) Er is geen verbinding tussen het Grevelingenmeer en het Volkerak. (26)

6.3.7 Philipsdam

Uitwisseling van water vindt alleen plaats via de Krammersluizen. (22) De maximale spuicapaciteit van de Krammersluizen is evenals de Volkeraksluizen ongeveer $2500 \text{ m}^3/\text{s}$. (16)

6.3.8 Oosterscheldekering

De Oosterscheldekering gaat dicht zodra er een zeewaterstand van NAP +3,00 m wordt verwacht. In de overige gevallen staat deze kering open. (27)

6.3.9 Oesterdam

De Oesterdam bestaat uit een dam en een kleine sluis. De sluis is voorzien van zoet/zout water scheidingssysteem. (28)

6.3.10 Bathse spuisluis

Het overtollige zoete water uit het Volkerak en het Markiezaatsmeer kan afgevoerd worden via de Bathse spuisluis. Het systeem heeft een capaciteit van $100 \text{ m}^3/\text{s}$ bij laagwater op de Westerschelde. (18)(22)

6.3.11 Stuw bij Driel

De stuw bij Driel beïnvloedt de afvoerverdeling ter plaatse van de IJsselkop. Bij een lage afvoer gaat de stuw bij Driel (gedeeltelijk) dicht, zodat er zo lang mogelijk $285 \text{ m}^3/\text{s}$ naar de IJssel gaat onder voorwaarde dat er altijd $25 \text{ m}^3/\text{s}$ overblijft voor de Nederrijn. Stijgt de afvoer van de Rijn boven de $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ dan wordt de stuw bij Driel geleidelijk getrokken. De afvoer van de Nederrijn neemt dan toe, terwijl de afvoer van de IJssel $285 \text{ m}^3/\text{s}$ blijft. Bij $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith staat de stuw helemaal open en is sprake van een onbeïnvloede afvoerverdeling ter plaatse van de IJsselkop. (9)

Het peil aan de bovenstroomse kant van de stuw voor een gestuwde situatie is circa NAP +8,00 m. (3)

6.3.12 Stuw bij Amerongen

De stuw bij Amerongen zorgt ervoor dat het stuwpand tussen Driel en Amerongen op NAP +6,00 m blijft. Ook deze stuw wordt bij een afvoer van $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith getrokken. (3) (9)

6.3.13 Stuw bij Hagestein

De stuw bij Hagestein zorgt ervoor dat het stuwpand tussen de Amerongen en Hagestein op NAP +3,00 m blijft. Ook deze stuw wordt bij een afvoer van 2400 m³/s te Lobith getrokken. (3) (9)

Ook het Betuwepand, onderdeel van het Amsterdam-Rijnkanaal tussen Wijk bij Duurstede en Tiel, is onderdeel van het stuwpand Hagestein. Aan het begin van dit pand staat de Prins Bernhardsluis welke dus mede het niveau bepaalt. Bij lage afvoeren is de waterstand bij Tiel en bij de stuw gelijk, waardoor de Prins Bernhardsluis open staat. De waterstand is dan kleiner dan of gelijk aan NAP +3 m. Bij een hogere waterstand wordt er wel gesloten. (3) Het verval over de Prins Bernhardsluis is dan minstens 0,5 m in verband met het klappen van de deuren door de tijdelijke waterstandsverlaging van scheepvaart op de Waal. (18)

6.3.14 Hollandsche IJsselkering

Bij een verwacht peil van NAP + 2,00 m te Hoek van Holland zal de stormvloedkering bij Krimpen aan den IJssel sluiten. Dit komt overeen met een peil van NAP +2,20 m à 2,25 m bij Krimpen aan den IJssel. (29) Naast de Hollandsche IJsselkering ligt de Algerasluis, zodat de scheepvaart kan blijven varen tijdens stormvloed of werkzaamheden aan de kering. (22)

6.3.15 Hondsbroeksche Pleij

Vlak na het splitsingspunt van het Pannerdensch kanaal in de Nederrijn en de IJssel is in de IJssel de bandijk 150 à 250 m teruggedraaid. In dit ontstaande buitendijkse gebied is vervolgens een regelwerk gebouwd. Deze constructie is opgebouwd 30 openingen van ongeveer 5 m breed waarin betonnen schotbalken gehesen kunnen worden. Op dit moment is de Hondsbroeksche Pleij tot een debiet van 16.000 m³/s is gesloten. (7)

In geval van het scenario Piekafvoer met een inrichting van de Nederrijn van 16.000 m³/s en een inrichting van de IJssel van 18.000 m³/s betekent dit dat het regelbereik van de Hondsbroeksche Pleij 217 m³/s is. De afvoer door het regelwerk zelf is dan 694 m³/s. Hieruit kan worden afgeleid dat de afvoer door het zomerbed afneemt. (7)

6.4 Randvoorwaarden

Voor elk hydraulisch scenario zullen in het model randvoorwaarden ingevoerd worden. De komende paragrafen zullen toelichten hoe deze randvoorwaarden gedefinieerd zijn en welke aannamen hiervoor zijn gemaakt.

6.4.1 Hoogwatergolf 1:1250

Om de randvoorwaarde bij een hoogwater voor de Rijn en de Maas te bepalen wordt gebruik gemaakt van de maatgevende afvoergolf, welke gebaseerd is op vele historische afvoergolven. (1) Deze golf kan worden opgeschaald naar de maatgevende afvoergolf voor 2050 om te voldoen aan de huidige eisen, door de verhouding tussen de maatgevende afvoerpiek en de historische afvoerpiek te bepalen. De komende paragrafen zullen de werkwijze beschrijven hoe de maatgevende afvoergolven voor de Rijn en de Maas zijn bepaald.

Bepaling afvoergolf

De gegevens van de maatgevende afvoergolf zijn niet compleet. De laagste waarden van de afvoergolf zijn namelijk ongelijk aan de gemiddelde afvoer van die maand. Hierom moet er een benadering gevonden worden die een schatting zal geven voor de ontbrekende waarden. Volgens de theorie wordt de maatgevende afvoergolf het best benaderd door een Rayleigh verdeling. (1) Een tweede mogelijkheid is om de waarden te fitten aan een Gumbel verdeling. (1) Maar omdat de volledige gegevens van de afvoergolf niet bekend zijn, is het niet mogelijk geweest om deze te bepalen. Hierom is ervoor gekozen de ontbrekende uiteinden van de golf te benaderen met een lineair verband aan het begin en een exponentieel verband aan het eind. Deze is bijvoorbeeld te zien in Figuur 6.3.

Het lineaire verband

Het lineaire verband geeft een kleine overschatting en een verkorting van de golf. Beide rivieren die in het onderzoek worden meegenomen, zijn regenrivieren waardoor wordt verwacht dat het werkelijke verband hol zal zijn en daardoor ook iets langer. Wegens gebrek aan gegevens is de enige andere mogelijkheid, een benadering maken met behulp van een exponentiële verdeling. Het probleem van deze verdeling is dat deze de afvoergolf onrealistisch lang maakt.

Het exponentiële verband

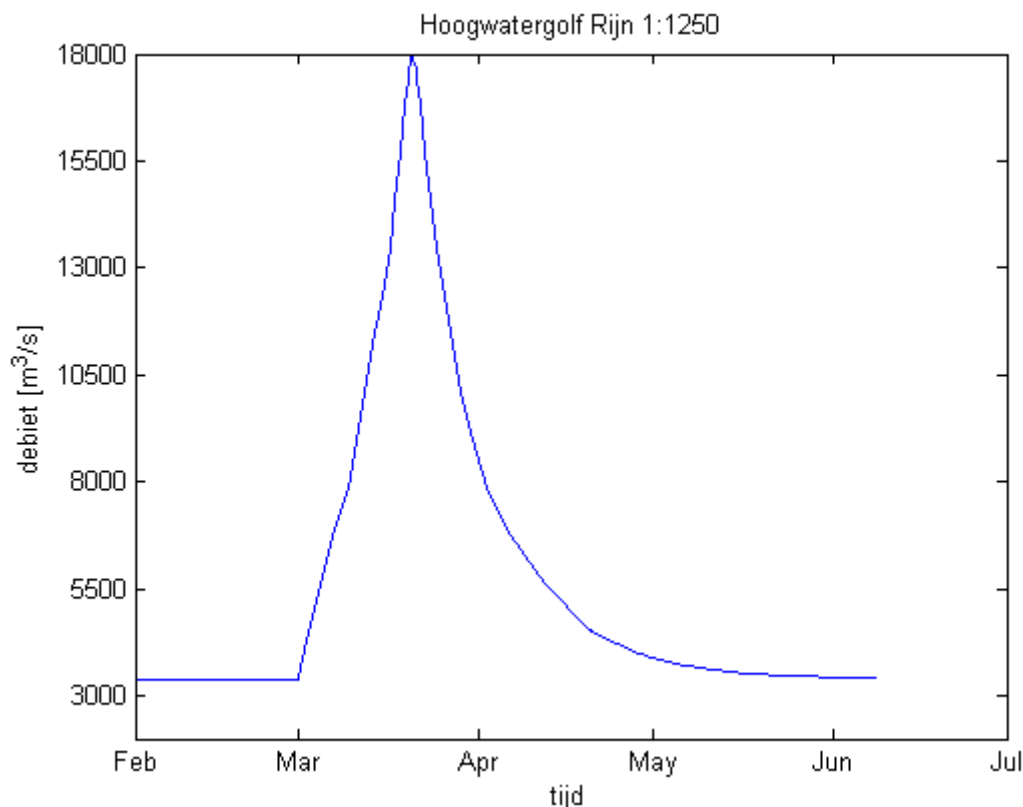
Het exponentiële verband aan het eind van de afvoergolf is een redelijk goede benadering. Beide rivieren zijn regenrivieren en worden daardoor door het grondwater gevoed. Hierdoor blijven de effecten van de hoogwatergolf voor langere tijd zichtbaar in de grootte van de afvoer. De vorm van het einde van de hoogwatergolf wordt dus voornamelijk veroorzaakt door de berging van het regenwater in de grond.

Hoogwatergolf

De gemiddelde afvoer in februari is bekend en deze waterstand wordt dan ook als uitgangspunt van de hoogwatergolf genomen. Vanwege de benodigde insteltijd van het model is de afvoer een maand lang constant gehouden, namelijk de maand februari, hierna zal de golf Lobith bereiken. De hoogwaterafvoergolf begint dus op de fictieve datum van 1 maart. Deze datum is een willekeurig gekozen datum, maar deze ligt wel in het verwachte seizoen van hoogwatergolven.

Rijn

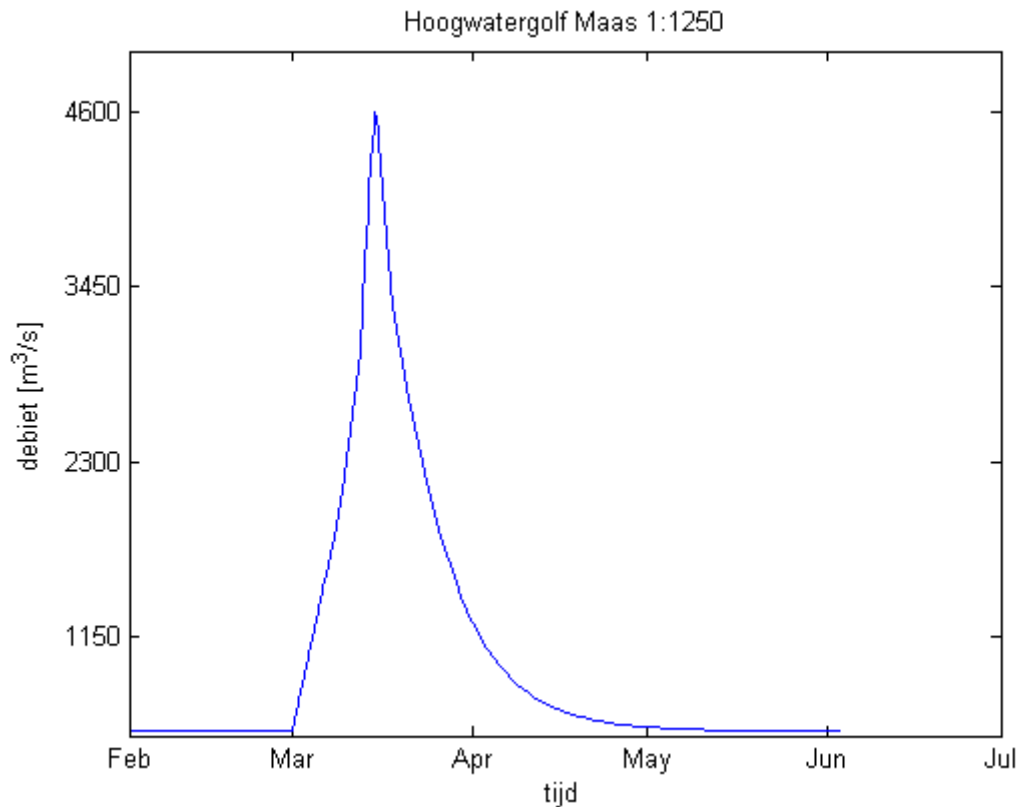
De maatgevende afvoergolf op de Rijn in het huidige beleid is $16.000\text{m}^3/\text{s}$ waaruit een afvoergolf volgt van ongeveer 40 dagen. (1) Deze golf kan worden opgeschaald naar de toekomstige afvoergolf, namelijk een golf met een piekafvoer van $18.000\text{m}^3/\text{s}$. (2) Deze afvoergolf is te zien in Figuur 6.3. De afvoergolf is als volgt opgesteld. De watergolf begint in februari met een gemiddeld peil van $3.400\text{m}^3/\text{s}$. (3) Hierdoor heeft het model de mogelijkheid om zich in te stellen bij de gemiddelde afvoer. De hoogwaterwatergolf start op 1 maart en duurt ongeveer 50 dagen. Er zijn geen gegevens beschikbaar tussen de $4.000\text{m}^3/\text{s}$ en de $3.400\text{m}^3/\text{s}$. Daarom zijn de waarden benaderd door middel van de exponentiële functie en zullen deze de evenwichtsafvoer opnieuw benaderen.



Figuur 6.3 – De maatgevende afvoergolf van de Rijn met een kans van 1:1250

Maas

De maatgevende afvoergolf voor de Maas is op dezelfde manier bepaald als de afvoergolf van de Rijn. Hierbij hoort een piekafvoer van $4.600\text{m}^3/\text{s}$ en een gemiddelde afvoer van $530\text{m}^3/\text{s}$. (4) Deze afvoergolf is te zien in Figuur 6.4. Er zijn geen gegevens beschikbaar tussen de $1.250\text{m}^3/\text{s}$ en de $530\text{m}^3/\text{s}$. Ook hier zijn deze bepaald door middel van een exponentiële verdeling en een lineaire verdeling. Om een zo'n extreem mogelijk scenario te maken is de aanname gemaakt dat de maximum afvoer voor beide rivieren te gelijk vallen.



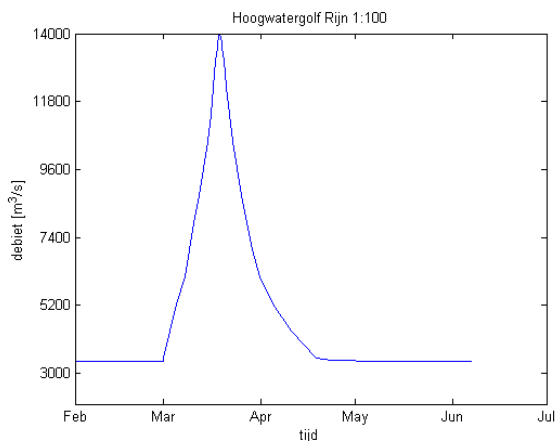
Figuur 6.4 – De maatgevende afvoergolf van de Maas met een kans van 1:1250

Moment van piekafvoer

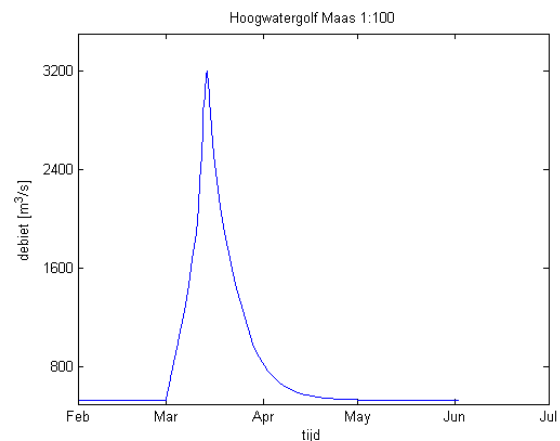
De Maas is een regenrivier en de Rijn is een gemengde rivier. Beide afvoeren zijn dus afhankelijk van de regenval in de aanliggende gebieden. Hierdoor is de kans dat beide rivieren tegelijkertijd een hoogwatergolf hebben relatief groot. Daarom worden de hoogwaterafvoeren van beide rivieren tegelijk meegenomen. Aangezien het stroomgebied van de Maas dicht bij Nederland ligt dan het stroomgebied van de Rijn, is het te verwachten dat de piek van de afvoergolf van de Rijn Nederland later bereikt dan de piek van de afvoergolf van de Maas. In dit onderzoek wordt uitgegaan dat beide pieken te gelijk vallen om zo een extreem scenario na te bootsen.

6.4.2 Hoogwaterafvoergolf 1:100

De afvoergolven voor de situatie van 1:100 zijn op dezelfde manier bepaald als beschreven in hoofdstuk 6.4.1. Voor de Rijn betekent de 1:100 situatie een piekafvoer van $14.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en voor de Maas betekent dit een piekafvoer van $3.200 \text{ m}^3/\text{s}$. (3) De afvoergolven zijn te zien in Figuur 6.5 en Figuur 6.6.



Figuur 6.5 – De maatgevende afvoergolf van de Rijn met een kans van 1:100

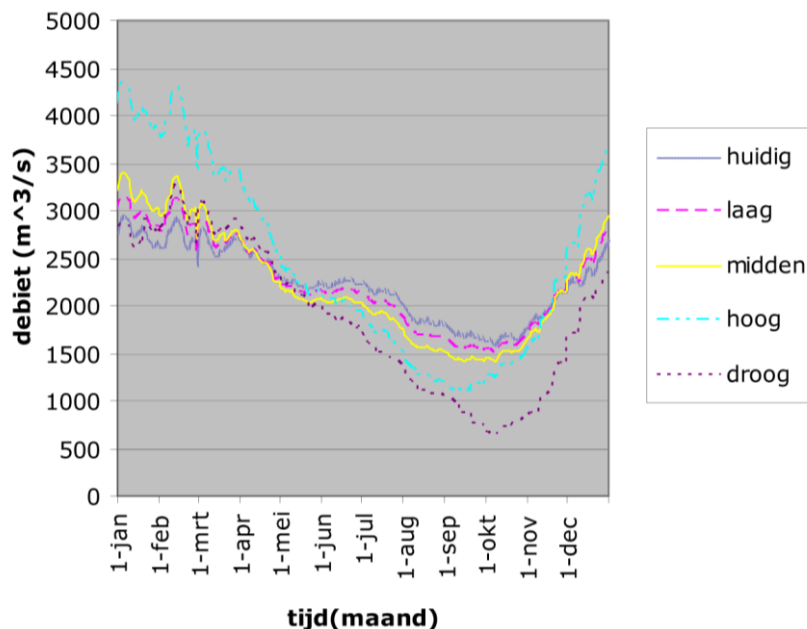


Figuur 6.6 – De maatgevende afvoergolf van de Maas met een kans van 1:100

6.4.3 Laagwaterafvoergolf 1:10

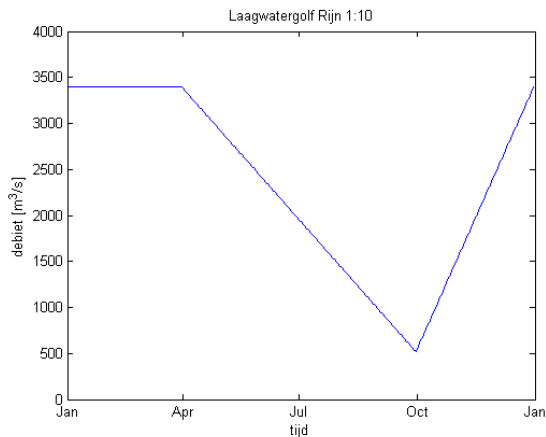
Informatie over laagwater is nauwelijks beschikbaar. In Figuur 6.7 is te zien dat de laagste afvoer (droog) over een groot deel van het jaar effect heeft. Voor dit model wordt deze grafiek geschematiseerd als drie lijnen. Een horizontale lijn die de gemiddelde afvoer aangeeft van januari tot april, een lijn tussen de gemiddelde afvoer en de laagste afvoer waarbij het laagste punt ligt op 1 oktober en een lijn die vanuit de laagste afvoer oploopt naar de gemiddelde afvoer op 1 januari. Voor deze lijnen is gekozen omdat hiermee de vorm van de afvoergolf in de droge situatie uit Figuur 6.7 het beste benaderd wordt.

Gemiddelde debiet Lobith (1901-2004)

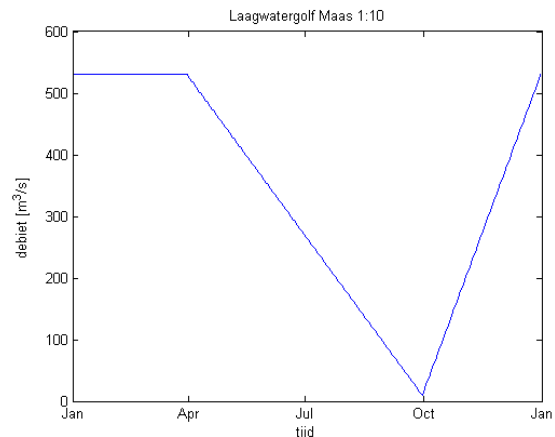


Figuur 6.7 – Gemiddelde afvoerterlooppunten Lobith (4)

Evenals bij het bepalen van de hoogwatergolf wordt de laagwatergolf geschaald voor de situatie in 2050 waarvoor de minimale en de gemiddelde afvoer bekend zijn. De Rijn heeft een minimale afvoer van $520\text{m}^3/\text{s}$ en een gemiddelde afvoer van $3400\text{m}^3/\text{s}$ in februari.(3) Hieruit volgt de in Figuur 6.8 weergegeven afvoergolf. Voor de Maas geldt hetzelfde, maar dan met een minimale afvoer van $10\text{m}^3/\text{s}$ en een gemiddelde afvoer van $530\text{m}^3/\text{s}$ in februari, zie Figuur 6.9. (3)



Figuur 6.8 – De maatgevende afvoergolf van de Rijn met een kans van 1:10



Figuur 6.9 – De maatgevende afvoergolf van de Maas met een kans van 1:10

Het lineaire verloop van deze laagwatergolf is niet realistisch. De verwachting is dat de grafiek in werkelijkheid holler is. Dit komt doordat de afvoer afhankelijk is van de grondwaterberging. Naarmate de afvoer lager wordt zal het grondwater ook minder water aan de rivier afstaan. Hierdoor zal de grafiek in eerste instantie steiler zijn en daarna afvlakken. Wanneer de afvoer weer begint te stijgen, dus na 1 oktober, zal in eerste instantie alleen de snelle afvoer van het regenwater worden afgestaan aan de rivier en pas wanneer de grondwaterberging voldoende is gevuld, zal het grondwater de rivier aanvullen. Dit betekent dat de lijn vlak begint en steil eindigt. Echter, gezien de gebrekkige hoeveelheid data om de werkelijke afvoergolf te bepalen, zal deze laagwatergolf in het model worden gebruikt.

6.4.4 Zeewaterstand storm 1:100

Bij een storm met een kans van optreden van 1:100 worden alle stormvloedkeringen aan de zeezijde gesloten. Hierdoor kan er gedurende een dergelijke storm geen water in of uit de Nederlandse rivierendelta stromen. In dit onderzoek wordt aangenomen dat de keringen gedurende deze storm niet zullen bezwijken. Als men er verder vanuit gaat dat de keringen voor aanvang van de storm gesloten worden, is het overbodig om een randvoorwaarde vanuit zee te definiëren als functie van de tijd. In plaats hiervan dienen de keringen langs de kust in het model voor een bepaalde tijdsduur gesloten te worden om het storm-scenario te simuleren.

Storm voorspelling

Om te bepalen hoe ver voor een stormpiek de Deltawerken gesloten kunnen worden, moet gekeken worden op welk termijn en met welke nauwkeurigheid een storm te voorspellen is. Een storm is tegenwoordig door het KNMI een aantal dagen van tevoren te voorspellen met behulp van weerkaarten. In het geval dat lijnen van gelijke luchtdruk (isobaren) dichterbij elkaar komen te

liggen, duidt dit op luchtdrukverschillen wat kan duiden op het ontstaan van een stormdepressie. De betrouwbaarheid van deze stormvoorspellingen voor de volgende dag is 95%. (30)

Gezien de voorspelbaarheid van een storm, wordt als uitgangspunt genomen dat een 1 op 100 storm voldoende ver van te voren kan worden voorspeld zodat de keringen voor aanvang van een storm gesloten kunnen worden. Dit betekent dat de keringen sluiten voordat de waterstand op zee begint te stijgen ten gevolge van de storm. Met dit gegeven is het dus inderdaad niet nodig om het stormwaterstandsverloop als functie van de tijd te definiëren.

Invloed getij

Het heeft de voorkeur om de keringen in het geval van een voorspelde storm zo kort mogelijk en bij een lage waterstand op zee te sluiten. In dit geval zit er een minimale hoeveelheid water in de Nederlandse rivierendelta en wordt dus het bergend vermogen optimaal benut om het water vanaf de rivieren op te slaan gedurende de storm.

Echter, als het moment van laagwater en storm ongunstig samenvallen, is het mogelijk dat het optimale moment van sluiting niet samenvalt met laagwater. Wanneer de keringen alsnog worden gesloten op laagwater, kan het zijn dat het bekken eerder afgesloten is dan strikt noodzakelijk en moet er dus meer rivierwater geborgen worden.

Per stormsituatie is het optimale moment van sluiting van de keringen anders. Daarom wordt de aanname gemaakt dat de kering in het model gesloten wordt op gemiddeld zeeniveau. Hierdoor wordt de getijinvloed voor en tijdens de storm niet meegenomen in het model. In SOBEK wordt daarom zowel voor als na de storm een constante zeewaterstand aangenomen.

Gemiddelde zeewaterstand

Zoals eerder is aangenomen, wordt de getijvariatie niet meegenomen in het model. Wel dient een gemiddelde zeewaterstand in 2050 gedefinieerd te worden. Momenteel ligt het gemiddeld zeeniveau in Nederland ongeveer op 0 meter NAP. (31). Volgens de verwachting van het klimaatscenario "Stoom", zal de zeewaterspiegel in 2050 35 centimeter gestegen zijn. (4) Als rekening gehouden wordt met deze gemiddelde zeespiegelstijging voor 2050 (4), wordt een gemiddelde zeewaterstand van +0,35 meter NAP gebruikt in het model.

Stormduur

Voor de stormduur van een 1 op 100 storm wordt in dit onderzoek een waarde van 33 uur gehanteerd. Tijdens deze 33 uur wordt de gemiddelde zeewaterstand van +0,35 meter NAP overschreden. Bij het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden voor de primaire keringen in 2006 is een stormduur van 29 uur gebruikt. (15) Gezien er aanwijzingen zijn dat deze duur groter moet zijn (15), wordt voor de situatie in 2050 een stormduur van 33 uur aangenomen.

6.4.5 Zeewaterstand Piekafoer & lage afvoer

Bij het scenario waarbij de Maas en de Rijn een piekafoer leveren zal veel water vanaf de Maas, Lek en Waal via het Haringvliet en de nieuwe Maas afgevoerd worden naar zee. Hierbij zal de rivierwaterstand in het oosten van het land een maximum bereiken, wat hier een maatgevende situatie oplevert. Dit scenario zal geen maatgevende situatie opleveren in het westen van het land waar de hoogwatergolf zal afvlakken door de breder wordende rivierendelta. Nabij de kust zal de

invloed van het getij een grote invloed hebben en is de invloed van de hoogwatergolf aanzienlijk gedempt. Gezien het getij geen invloed heeft op de maatgevende situatie in het oosten en tevens geen maatgevende waterstanden geeft in het westen, wordt deze niet als randvoorwaarde meegenomen bij het modelleren van het piekafvoer scenario. Dit heeft als bijkomend voordeel dat de getijinvloed de vorm van de hoogwatergolf in het westen van het land niet zal verstoren waardoor de hoogwatergolf beter geanalyseerd kan worden.

Aangezien in dit onderzoek voornamelijk gekeken zal worden naar de afvoerverdeling ter plaatse van de splitsingspunten van de Rijn in het oosten, zal bij lage afvoer in dit onderzoek tevens de getijinvloed niet meegenomen worden.

7 Gewenste afvoerdelingen

Op basis van de in hoofdstuk 5 vastgestelde eisen op het gebied van veiligheid, zoetwatervoorziening en scheepvaart worden voor de verschillende hydraulische scenario's per Rijntak de gewenste afvoeren bepaald. Uit deze gewenste afvoeren volgen gewenste in te stellen afvoeren en uit een vergelijking van deze gewenste in te stellen afvoeren met de door Rijkswaterstaat bepaalde afvoerdelingen is de gewenste verandering in deze afvoerdelingen te bepalen.

7.1 Scenario Piekafvoer

7.1.1 Gewenste maximale afvoeren

In hoofdstuk 5 is gesteld dat het ten behoeve van het verkleinen van het risico van overstromingen langs de Nederrijn en de Lek gewenst is de Nederrijn bij hoge afvoeren van de Rijn te ontzien en dat daartoe gestreefd zal worden naar een maximale afvoer van de Nederrijn van 2.600 m³/s. Voor de Waal en de IJssel is de gewenste maximale afvoer gelijk aan de capaciteit van de desbetreffende Rijntak. Aangenomen wordt dat door rivierverruimingen en dijkverhogingen de capaciteiten van de Waal en de IJssel in 2050 ongeveer gelijk zijn aan de afvoeren horende bij de door Rijkswaterstaat bepaalde afvoerdeling bij een afvoer bij Lobith van 18.000 m³/s. De capaciteiten van de Waal en de IJssel worden daarmee aangenomen op respectievelijk 12.000 m³/s en 2.900 m³/s. Een overzicht van de gewenste maximale afvoeren per Rijntak bij het scenario Piekafvoer is weergegeven in Tabel 7.1.

Tabel 7.1 – Gewenste maximale afvoeren bij scenario Piekafvoer

Rijntak	Gewenste maximale afvoer (m ³ /s)	Gebaseerd op:
Waal	12.000	Capaciteit
Nederrijn	2.600	Verkleinen risico van overstromingen
IJssel	2.900	Capaciteit
Rijn	17.500	

7.1.2 Gewenste in te stellen afvoeren

Uit Tabel 7.1 blijkt dat de som van de gewenste maximale afvoeren per Rijntak 500 m³/s kleiner is dan de afvoer bij Lobith van 18.000 m³/s. Aangenomen is dat in de capaciteit van zowel de Waal als de IJssel nog rek zit. Daar de IJssel op het IJsselmeer uitstroomt en het IJsselmeer een beperkte berging en spuicapaciteit heeft, zal de overige 500 m³/s via de Waal afgevoerd worden. Daartoe zijn dus wel aanvullende rivierverruimingen en/of dijkverhogingen langs de Waal benodigd. Tabel 7.2 geeft de gewenste in te stellen afvoeren bij het scenario Piekafvoer.

Tabel 7.2 – Gewenste in te stellen afvoeren bij scenario Piekafvoer

Rijntak	Gewenste maximale afvoer (m ³ /s)	Gewenste in te stellen afvoer (m ³ /s)
Waal	12.000	12.500
Nederrijn	2.600	2.600
IJssel	2.900	2.900
Rijn	17.500	18.000

7.1.3 Gewenste veranderingen in afvoerverdeling

Voor het bepalen van de gewenste veranderingen in de afvoerverdeling wordt uitgegaan van de door Rijkswaterstaat (RWS) bepaalde afvoerverdeling. Deze afvoerverdeling is gebaseerd op de riviergeometrieën na uitvoering van de Ruimte voor de Rivierprojecten. Het effect van het reeds uitgevoerde Ruimte voor de Rivier project op de Hondsbroeksche Pleij (HP) en het effect van het geplande Ruimte voor de Rivier project bij de Pannerdensche Kop (PK) is niet meegenomen in deze afvoerverdeling. Het regelwerk op de Hondsbroeksche Pleij heeft alleen bij het scenario Piekafvoer invloed op de verdeling van de afvoer van de Rijn over de verschillende Rijntakken daar dit regelwerk pas vanaf een afvoer bij Lobith van 16.000 m³/s wordt ingezet. Het regelwerk op de Pannerdensche Kop heeft bij zowel het scenario Piekafvoer als het scenario Hoge afvoer & storm invloed op de afvoerverdeling daar dit regelwerk vanaf een afvoer bij Lobith van 8.500 m³/s wordt ingezet. Het geplande regelwerk bij de Pannerdensche Kop heeft daarbij invloed op de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop. Deze invloed betreft een toename van de afvoer van de Waal en een afname van de afvoer van het Pannerdensch kanaal van 460 m³/s. (7) Tabel 7.3 geeft de met behulp van maatregelen gewenste in te stellen verandering in de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop. Uit deze tabel kan afgelezen worden dat het gewenst is bij de Pannerdensche Kop ongeveer 280 m³/s meer over de Waal en minder over het Pannerdensch Kanaal te sturen.

Tabel 7.3 – Gewenste verandering in afvoerverdeling bij Pannerdensche Kop bij scenario Piekafvoer

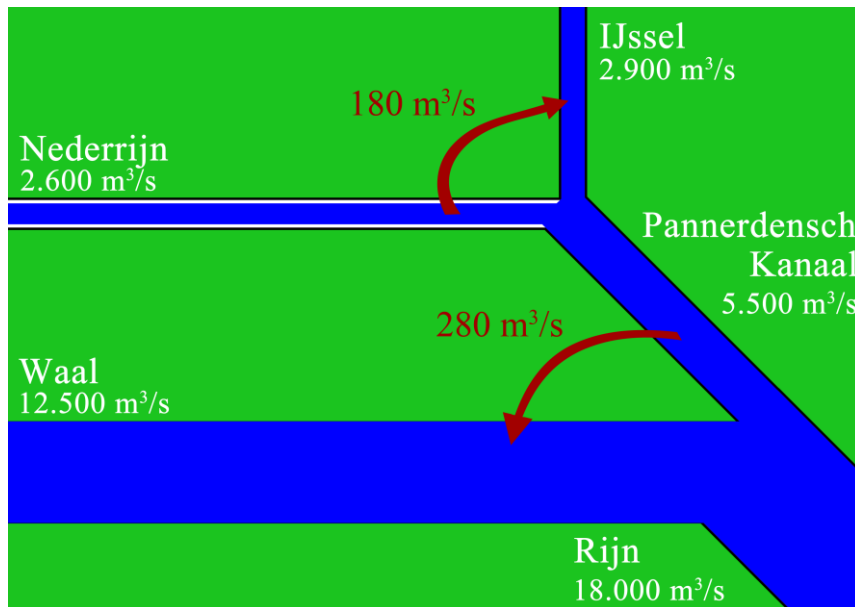
Splitsingspunt	Rijntak	Afvoer RWS (m ³ /s)	Afvoer na uitvoer regelwerk PK (m ³ /s)	Gewenste in te stellen afvoer (m ³ /s)	Gewenste verandering (m ³ /s)
Pannerdensche Kop	Waal	11.758	12.218	12.500	+282
	Pannerdensch Kanaal	6.242	5.782	5.500	-282

Het gebouwde regelwerk op de Hondsbroeksche Pleij heeft invloed op de afvoerverdeling bij de IJsselkop. Deze invloed betreft een toename van de afvoer van de IJssel en een afname van de afvoer van de Nederrijn van 217 m³/s. (7) Verder zal het met behulp van maatregelen instellen van de gewenste verandering in de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop gewijzigde afvoeren van de Nederrijn en de IJssel met zich meebrengen. Aangenomen wordt dat de procentuele afvoerverdeling bij de IJsselkop niet verandert door de veranderde afvoer van het Pannerdensch Kanaal. Tabel 7.4 geeft de met behulp van maatregelen gewenste in te stellen verandering in de afvoerverdeling bij de IJsselkop. Uit deze tabel kan afgelezen worden dat het gewenst is bij de IJsselkop ongeveer 180 m³/s meer over de IJssel en minder over de Nederrijn te sturen.

Tabel 7.4 – Gewenste verandering in afvoerverdeling bij IJsselkop bij scenario Piekafvoer

Splitsingspunt	Rijntak	Afvoer RWS (m ³ /s)	Afvoer na uitvoer regelwerk HP (m ³ /s)	Afvoer bij gewenste verdeling PK (m ³ /s)	Gewenste in te stellen afvoer (m ³ /s)	Gewenste verandering (m ³ /s)
IJsselkop	Nederrijn	3.376	3.159	2.783	2.600	-183
	IJssel	2.866	3.083	2.717	2.900	+183

Figuur 7.1 geeft een schematische weergave van de gewenste in te stellen afvoeren per Rijntak en de gewenste veranderingen in de afvoerverdelingen bij de Pannerdensch Kop en de IJsselkop bij het scenario Piekafvoer. Daarin stellen de zwarte lijnen een schematisatie van de capaciteit van de verschillende Rijntakken voor en geeft de blauwe invulling tussen deze lijnen weer welk deel van de capaciteit van de desbetreffende Rijntak gebruikt wordt.



Figuur 7.1 – Gewenste afvoeren en gewenste veranderingen in afvoerverdeling bij scenario Piekafvoer

7.2 Scenario Hoge afvoer & storm

7.2.1 Gewenste maximale afvoeren

Bij het scenario Hoge afvoer & storm zijn de stormvloedkeringen gesloten. Dit zorgt in combinatie met de hoge afvoeren van de Rijntakken voor een kritieke situatie rond Rotterdam en Dordrecht. Omdat het overgrote deel van het water dat over de Nederrijn afstroomt via de Lek in deze regio terecht komt, dient om overstromingen te voorkomen de Nederrijn ontzien te worden. Aangenomen wordt dat een afvoer over de Nederrijn gelijk aan 60% van de capaciteit van deze Rijntak het risico op overstromingen voldoende reduceert. Dit komt overeen met een afvoer van de Nederrijn van 2.000 m³/s. Verder zorgt bij het scenario Hoge afvoer & storm de combinatie windopzet op het Ketelmeer als gevolg van de met de storm gepaard gaande hoge windsnelheden en hoge afvoeren van de Rijntakken voor een kritieke situatie in de IJsselmonding. Om overstromingen te voorkomen dient de IJssel dan ook ontzien te worden. Aangenomen wordt dat een afvoer over de IJssel gelijk aan 50% procent van de capaciteit van deze Rijntak het risico op overstromingen voldoende reduceert. Dit komt overeen met een afvoer van de IJssel van 1.500 m³/s. Voor de Waal is de gewenste maximale afvoer opnieuw gelijk aan de capaciteit van deze Rijntak. Een overzicht van de gewenste maximale afvoeren per Rijntak bij het scenario Hoge afvoer & storm is weergegeven in Tabel 7.5.

Tabel 7.5 – Gewenste maximale afvoeren bij scenario Hoge afvoer & storm

Rijntak	Gewenste maximale afvoer (m ³ /s)	Gebaseerd op:
Waal	12.000	Capaciteit
Nederrijn	2.000	Kritieke situatie rond Rotterdam en Dordrecht
IJssel	1.500	Kritieke situatie in IJsselmonding
Rijn	15.500	

7.2.2 Gewenste in te stellen afvoeren

Uit Tabel 7.5 blijkt dat de som van de gewenste afvoeren per Rijntak groter is dan de afvoer bij Lobith van 14.000 m³/s. Dit betekent dat bij dit scenario niet de volledige capaciteit van de Waal aangesproken hoeft te worden. Aangenomen wordt dat het water dat via de Waal afstroomt met behulp van de nog uit te voeren Merwedekering en Drechtkering via de Nieuwe-Merwede naar de Zuid-Westelijke delta stroomt waar het tijdelijk geborgen zal worden. Een kering in het Spui dient daarbij te hoge snelheden en erosie in het Spui te voorkomen. Voor de berging van het water zal in eerste instantie gebruik worden gemaakt van het Haringvliet, het Volkerak en het benedenrivierengebied. Indien de totale capaciteit van deze gebieden niet toereikend is, zal gebruik worden gemaakt van de Oosterschelde en eventueel het Grevelingenmeer. (32) Tabel 7.6 geeft de gewenste in te stellen afvoeren bij het scenario Hoge afvoer & storm.

Tabel 7.6 – Gewenste in te stellen afvoeren bij scenario Hoge afvoer & storm

Rijntak	Gewenste maximale afvoer (m ³ /s)	Gewenste in te stellen afvoer (m ³ /s)
Waal	12.000	10.500
Nederrijn	2.000	2.000
IJssel	1.500	1.500
Rijn	15.500	14.000

7.2.3 Gewenste veranderingen in afvoerverdeling

Voor de door Rijkswaterstaat bepaalde afvoerverdeling bij een afvoer bij Lobith van 14.000 m³/s wordt aangenomen dat de procentuele afvoerverdeling bij deze afvoer overeenkomt met de procentuele afvoerverdeling bij een afvoer bij Lobith van 13.000 m³/s. Het geplande regelwerk bij de Pannerdensche Kop heeft bij dit scenario invloed op de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop. Deze invloed betreft een toename van de afvoer van de Waal en een afname van de afvoer van het Pannerdensch kanaal van 450 m³/s. (7) Tabel 7.7 geeft de met behulp van maatregelen gewenste in te stellen verandering in de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop. Uit deze tabel kan afgelezen worden dat het gewenst is bij de Pannerdensche Kop ongeveer 1.130 m³/s meer over de Waal en minder over het Pannerdensch Kanaal te sturen.

Tabel 7.7 – Gewenste verandering in afvoerdeling bij Pannerdensch Kop bij scenario Hoge afvoer & storm

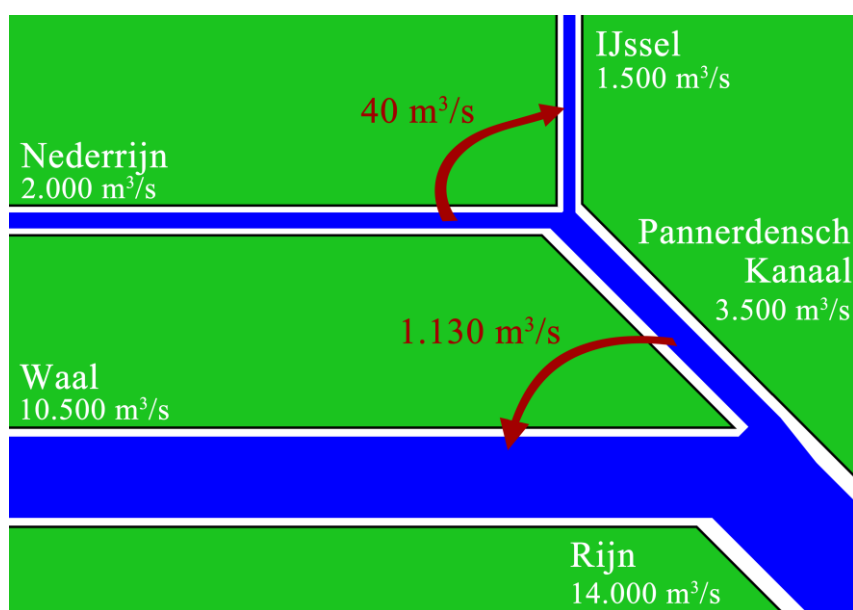
Splitsingspunt	Rijntak	Afvoer RWS (m ³ /s)	Afvoer na uitvoer regelwerk PK (m ³ /s)	Gewenste in te stellen afvoer (m ³ /s)	Gewenste verandering (m ³ /s)
Pannerdensch Kop	Waal	8.922	9.372	10.500	+1.128
	Pannerdensch Kanaal	5.078	4.628	3.500	-1.128

Het met behulp van maatregelen instellen van de gewenste verandering in de afvoerdeling bij de Pannerdensch Kop brengt gewijzigde afvoeren van de Nederrijn en de IJssel met zich mee. Aangenomen wordt dat de procentuele afvoerdeling bij de IJsselpop niet verandert door de veranderde afvoer van het Pannerdensch Kanaal. Tabel 7.8 geeft de met behulp van maatregelen gewenste in te stellen verandering in de afvoerdeling bij de IJsselpop. Uit deze tabel kan afgelezen worden dat het gewenst is bij de IJsselpop ongeveer 40 m³/s meer over de IJssel en minder over de Nederrijn te sturen.

Tabel 7.8 – Gewenste verandering in afvoerdeling bij IJsselpop bij scenario Hoge afvoer & storm

Splitsingspunt	Rijntak	Afvoer RWS (m ³ /s)	Afvoer bij gewenste verdeling PK (m ³ /s)	Gewenste in te stellen afvoer (m ³ /s)	Gewenste verandering (m ³ /s)
IJsselpop	Nederrijn	2.958	2.039	2.000	-39
	IJssel	2.120	1.461	1.500	+39

Figuur 7.2 geeft een schematische weergave van de gewenste in te stellen afvoeren per Rijntak en de gewenste veranderingen van de afvoerdelingen bij de Pannerdensch Kop en de IJsselpop bij het scenario Hoge afvoer & storm.



Figuur 7.2 – Gewenste afvoeren en gewenste veranderingen in afvoerdeling bij scenario Hoge afvoer & storm

7.3 Scenario Lage afvoer met opzet IJsselmeerpeil

Een mogelijkheid om in de toekomst aan de zoetwatervraag van Noord-Nederland, Noord-Holland en indien nodig via de Tolhuissluisroute van Zuid-Holland te kunnen blijven voldoen en ondertussen onder vrij verval op de Waddenzee te kunnen blijven spuien, is het in het voorjaar verhogen van het peil van het IJsselmeer met 1,5 m. Indien van deze opzet uitgegaan wordt, verschilt de gewenste verandering in de afvoerverdeling in het voorjaar van de gewenste verandering in de afvoerverdeling in het najaar. De gewenste verandering in de afvoerverdeling zal dan ook voor beide situaties afzonderlijk bepaald worden.

7.3.1 Voorjaar

Gewenste minimale afvoeren

De gewenste minimale afvoer van de Waal is gelijk aan de minimale afvoer waarbij de diepgang van de scheepvaart niet gehinderd wordt. In hoofdstuk 5 is gesteld dat deze diepgang niet gehinderd wordt bij een waterstand bij Lobith van NAP +9,24m of hoger hetgeen overeenkomt met een minimale afvoer van de Waal van 1.400 m³/s. (7) (33) Verder is op de Nederrijn ten behoeve van verversing 25 m³/s gewenst. Daarnaast is in hoofdstuk 5 gesteld dat de vereiste afvoer van de IJssel ten behoeve van zoetwatervoorziening gelijk is aan 285 m³/s. Vanwege de gewenste verhoging van het IJsselmeerpeil dient deze waarde dus verhoogd te worden. Het opzetten van het peil van het IJsselmeer zal daarbij in het voorjaar plaatsvinden daar de afvoer bij Lobith in het voorjaar groter is dan de som van de hierboven genoemde gewenste minimale afvoeren van de Waal, de Nederrijn en de IJssel. In verband met eisen op het gebied van veiligheid kan het peil echter pas vanaf 1 april opgezet worden. (34) In de periode van 1 april tot 21 juni varieert de afvoer van de IJssel volgens de door Rijkswaterstaat bepaalde afvoerverdeling van 474 m³/s tot 307 m³/s. Daarvan is een debiet van 285 m³/s benodigd voor de zoetwatervoorziening van Noord-Nederland en Noord-Holland. Het overige deel kan gebruikt worden voor de opzet van het IJsselmeerpeil. Dit water genereert daarbij een opzet van het peil van het IJsselmeerpeil van ongeveer 0,6 m. Voor het overige deel van de gewenste opzet van het IJsselmeerpeil is het benodigd met behulp van maatregelen meer water over de IJssel af te voeren. Aannemende dat de oppervlakte van het IJsselmeer ongeveer gelijk is aan 1.200 km² (3) kan de voor de resterende peilverhoging benodigde extra afvoer van de IJssel worden bepaald met behulp van de bij het scenario Lage afvoer met opzet IJsselmeerpeil opgestelde afvoergolf van de Rijn. Uit de berekening in Bijlage A volgt dat ten behoeve van de verhoging van het IJsselmeerpeil op 1 april 184 m³/s en op 20 juni nog 119 m³/s extra via de IJssel afgevoerd dient te worden. Daarmee komt de gewenste minimale afvoer van de IJssel op 1 april op ongeveer 660 m³/s en op 20 juni op 430 m³/s. Een overzicht van de gewenste minimale afvoeren per Rijntak in het voorjaar bij het scenario Lage afvoer met opzet van het IJsselmeerpeil is weergegeven in Tabel 7.9.

Tabel 7.9 – Gewenste minimale afvoeren in voorjaar bij scenario Lage afvoer met opzet IJsselmeerpeil

Rijntak	Afvoer RWS in voorjaar (m ³ /s)		Gewenste minimale afvoer (m ³ /s)		Gebaseerd op:
	1 april	20 juni	1 april	20 juni	
Waal	2.308	1.482	1.400	1.400	Scheepvaart
Nederrijn	618	336	25	25	Verversing
IJssel	474	307	660	430	Zoetwatervoorziening en opzet IJsselmeerpeil
Rijn	3.400	2.125	2.085	1.855	

Gewenste in te stellen afvoeren

Uit Tabel 7.9 blijkt dat de som van de gewenste afvoeren per Rijntak kleiner is dan de afvoer bij Lobith. Dit betekent dat met behulp van maatregelen aan alle gewenste minimale afvoeren voldaan kan worden. Uit Tabel 7.9 blijkt bovendien dat de door Rijkswaterstaat bepaalde afvoer van de Nederrijn veel groter is dan de gewenste minimale afvoer. De voor de verhoging van het peil van het IJsselmeer benodigde extra afvoer van de IJssel kan dan ook afkomstig zijn van de Nederrijn. Tabel 7.10 geeft de gewenste in te stellen afvoeren bij het scenario Hoge afvoer & storm.

Tabel 7.10 – Gewenste in te stellen afvoeren in voorjaar bij scenario Lage afvoer met opzet IJsselmeerpeil

Rijntak	Gewenste minimale afvoer (m ³ /s)		Gewenste in te stellen afvoer (m ³ /s)	
	1 april	20 juni	1 april	20 juni
Waal	1.400	1.400	2.308	1.482
Nederrijn	25	25	432	213
IJssel	660	430	660	430
Rijn	2.085	1.855	3.400	2.125

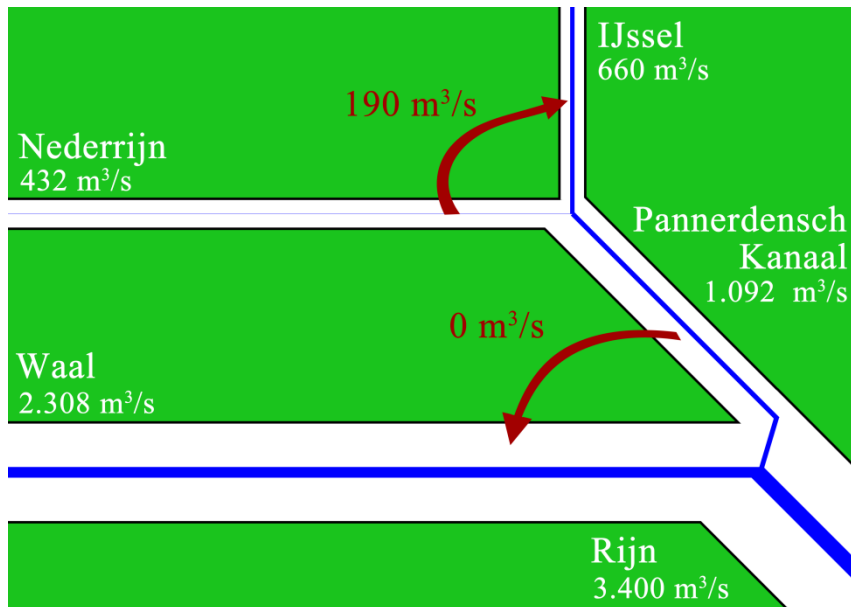
Gewenste veranderingen in afvoerverdeling

Voor de extra afvoer van de IJssel ten behoeve van de opzet van het IJsselmeerpeil zal dus gebruik worden gemaakt van water dat zonder maatregelen via de Nederrijn afstroomt. Daardoor is er geen verandering in de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop gewenst. Tabel 7.11 geeft de met behulp van maatregelen gewenste in te stellen verandering in de afvoerverdeling bij de IJsselkop. Uit deze tabel kan afgelezen worden dat het dus gewenst is bij de IJsselkop op 1 april ongeveer 190 m³/s en op 20 juni nog ongeveer 120 m³/s meer over de IJssel en minder over de Nederrijn te sturen.

Tabel 7.11 – Gewenste verandering in afvoerverdeling bij IJsselkop in voorjaar bij scenario Lage afvoer met opzet IJsselmeerpeil

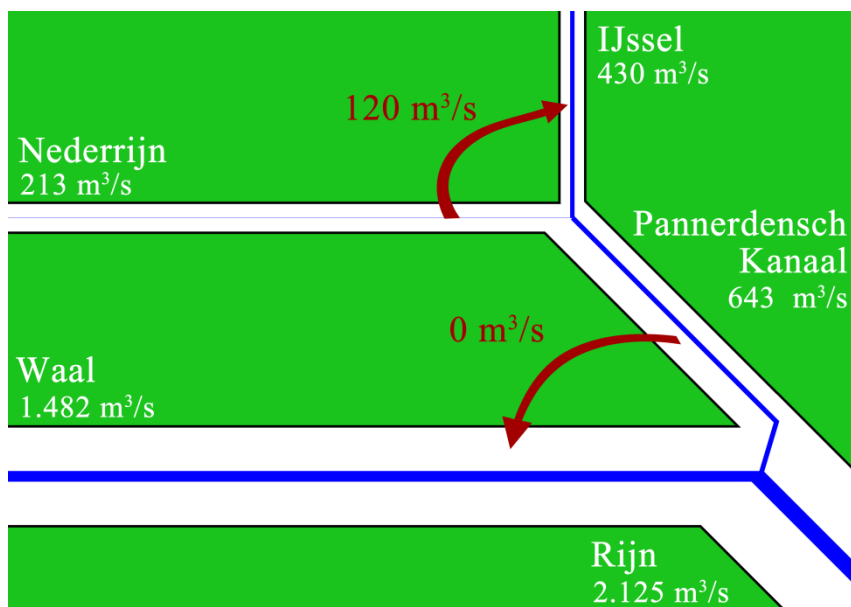
Splittings-punt	Rijntak	Afvoer RWS (m ³ /s)		Gewenste in te stellen afvoer (m ³ /s)		Gewenste verandering (m ³ /s)	
		1 april	20 juni	1 april	20 juni	1 april	20 juni
IJsselkop	Nederrijn	618	336	432	213	-186	-123
	IJssel	474	307	660	430	+186	+123

Figuur 7.3 geeft een schematische weergave van de gewenste in te stellen afvoeren per Rijntak en de gewenste veranderingen van de afvoerverdelingen bij de Pannerdensch Kop en de IJsselkop op 1 april bij het scenario Lage afvoer met opzet van het IJsselmeerpeil.



Figuur 7.3 – Gewenste afvoeren en gewenste veranderingen in afvoerverdeling op 1 april bij scenario Lage afvoer met opzet IJsselmeerpeil

Figuur 7.4 geeft een schematische weergave van de gewenste in te stellen afvoeren per Rijntak en de gewenste veranderingen van de afvoerverdelingen bij de Pannerdensch Kop en de IJsselkop op 20 juni bij het scenario Lage afvoer met opzet van het IJsselmeerpeil.

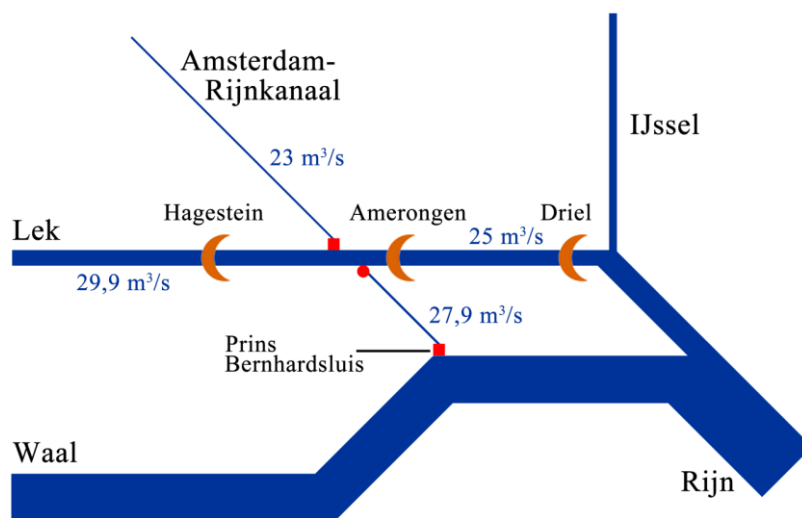


Figuur 7.4 – Gewenste afvoeren en gewenste veranderingen in afvoerverdeling op 20 juni bij scenario Lage afvoer met opzet IJsselmeerpeil

7.3.2 Najaar

Gewenste minimale afvoeren

In het najaar, als de afvoer bij Lobith haar minimum van $520 \text{ m}^3/\text{s}$ bereikt, kan voor de zoetwatervoorziening van de om het IJsselmeer liggende polders gebruik worden gemaakt van de op het IJsselmeer opgebouwde buffer, zodat in deze situatie de gewenste afvoer van de IJssel gelijk is aan de eis op het gebied van scheepvaart. In hoofdstuk 5 is gesteld dat ten behoeve van scheepvaart zonder aanvullende maatregelen een minimale afvoer van de IJssel van $172 \text{ m}^3/\text{s}$ vereist is. Daarnaast is op de Nederrijn ten behoeve van verversing $25 \text{ m}^3/\text{s}$ gewenst. Verder is in hoofdstuk 5 gesteld dat ten behoeve van scheepvaart zonder aanvullende maatregelen een minimale afvoer van de Waal van $823 \text{ m}^3/\text{s}$ vereist is. Daar de bij Tiel in het Amsterdam-Rijnkanaal gelegen Prins Bernhardsluizen in het najaar open staan, dient naast deze minimale afvoer ten behoeve van scheepvaart voor de aanvoer van water voor het KWA en het in het Amsterdam-Rijnkanaal benodigde debiet nog eens $27,9 \text{ m}^3/\text{s}$ over de Waal afgevoerd te worden. Daarmee komt de gewenste afvoer van de Waal op $851 \text{ m}^3/\text{s}$. Figuur 7.5 geeft de afvoeren ten behoeve van het KWA, het benodigd debiet op het Amsterdam-Rijnkanaal en de verversing van de Nederrijn en de Lek.



Figuur 7.5 – Afvoeren ten behoeve van KWA, benodigd debiet Amsterdam-Rijnkanaal en verversing Nederrijn en Lek

Een overzicht van de gewenste minimale afvoeren per Rijntak in het najaar bij het scenario Lage afvoer met opzet van het IJsselmeerpeil is weergegeven in Tabel 7.11.

Tabel 7.12 – Gewenste minimale afvoeren in najaar bij scenario Lage afvoer met opzet IJsselmeerpeil

Rijntak	Gewenste minimale afvoer (m^3/s)	Gebaseerd op:
Waal	851	Scheepvaart en aanvoer voor het KWA en het Amsterdam-Rijnkanaal
Nederrijn	25	Verversing
IJssel	172	Scheepvaart
Rijn	1.048	

Gewenste in te stellen afvoeren

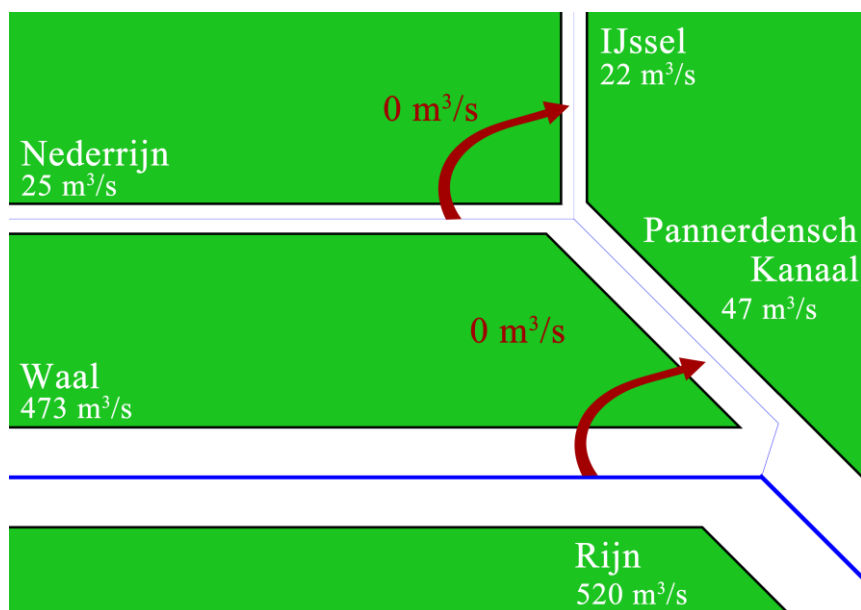
Uit Tabel 7.12 blijkt dat de som van de gewenste afvoeren per Rijntak groter is dan de afvoer bij Lobith van 520 m³/s. De door de Tweede Kamer vastgestelde verdringsreeks kent een hogere prioriteit toe aan veiligheid, voorkoming van onomkeerbare schade en nutsvoorzieningen dan aan scheepvaart. (35) Er zal dan ook ten behoeve van de aanvoer van water voor het KWA en het in het Amsterdam-Rijnkanaal benodigde debiet 27,9 m³/s voor de Waal en ten behoeve van verversing 25 m³/s voor de Nederrijn gereserveerd worden. Gezien de door Rijkswaterstaat bepaalde afvoerverdeling bij een afvoer bij Lobith van 520 m³/s aan deze beide eisen voldoet, zal voor het najaar de gewenste in te stellen afvoerverdeling gelijk gesteld worden aan de door Rijkswaterstaat bepaalde afvoerverdeling. Voor de door Rijkswaterstaat bepaalde afvoerverdeling bij een afvoer bij Lobith van 520 m³/s wordt, onder aanname van een afvoer van de Nederrijn van 25 m³/s, aangenomen dat de procentuele afvoerverdeling bij deze afvoer overeenkomt met de procentuele afvoerverdeling bij een afvoer bij Lobith van 600 m³/s. (7) Omdat de door Rijkswaterstaat bepaalde afvoerverdeling niet voldoet aan de gewenste minimale afvoeren van de Waal en de IJssel ten behoeve van scheepvaart dienen aanvullende maatregelen in de Waal en de IJssel de bevaarbaarheid van beide Rijntakken zoveel als mogelijk te garanderen. Tabel 7.13 geeft de gewenste in te stellen afvoeren in het najaar bij het scenario Lage afvoer met opzet van het IJsselmeerpeil.

Tabel 7.13 – Gewenste in te stellen afvoeren in najaar bij scenario Lage afvoer met opzet IJsselmeerpeil

Rijntak	Gewenste maximale afvoer (m ³ /s)	Gewenste in te stellen afvoer (m ³ /s)
Waal	851	473
Nederrijn	25	25
IJssel	172	22
Rijn	1.048	520

Gewenste veranderingen in afvoerverdeling

Voor het najaar is de gewenste in te stellen afvoerverdeling gelijk gesteld aan de door Rijkswaterstaat bepaalde afvoerverdeling, zodat er in het najaar geen veranderingen in de afvoerverdeling gewenst zijn. Figuur 7.6 geeft een schematische weergave van de gewenste in te stellen afvoeren per Rijntak en de gewenste veranderingen van de afvoerverdelingen bij de Pannerdensche Kop en de IJsselkop in het najaar bij het scenario Lage afvoer met opzet van het IJsselmeerpeil.



Figuur 7.6 – Gewenste afvoeren en gewenste veranderingen in afvoerverdeling in najaar bij scenario Lage afvoer met opzet IJsselmeerpeil

7.4 Scenario Lage afvoer zonder opzet IJsselmeerpeil

7.4.1 Gewenste minimale afvoeren

Indien niet van een opzet van het IJsselmeerpeil uitgegaan wordt, is de gewenste afvoer van de IJssel gelijk aan 285 m³/s. Deze afvoer zorgt namelijk voor een redelijke vaardiepte op de IJssel; voldoende koelwater voor de centrale Harculo bij Zwolle en voldoende zoetwater ten behoeve van de om het IJsselmeer liggende polders. Evenals in het najaar bij het scenario Lage afvoer met opzet van het IJsselmeerpeil is bij het scenario Lage afvoer zonder opzet van het IJsselmeerpeil ten behoeve van scheepvaart en aanvoer van water voor het KWA en het in het Amsterdam-Rijnkanaal benodigde debiet de gewenste afvoer van de Waal 851 m³/s. Daarnaast is op de Nederrijn ten behoeve van verversing 25 m³/s gewenst. Een overzicht van de gewenste minimale afvoeren per Rijntak bij het scenario Lage afvoer zonder opzet van het IJsselmeerpeil is weergegeven in Tabel 7.14.

Tabel 7.14 – Gewenste minimale afvoeren bij scenario Lage afvoer zonder opzet IJsselmeerpeil

Rijntak	Gewenste minimale afvoer (m ³ /s)	Gebaseerd op:
Waal	851	Scheepvaart en aanvoer voor het KWA en het Amsterdam-Rijnkanaal
Nederrijn	25	Verversing
IJssel	285	Zoetwatervoorziening
Rijn	1.161	

7.4.2 Gewenste in te stellen afvoeren

Uit Tabel 7.14 blijkt dat de som van de gewenste afvoeren per Rijntak groter is dan de afvoer bij Lobith van 520 m³/s. Ten behoeve van de aanvoer van water voor het KWA en het in het Amsterdam-Rijnkanaal benodigde debiet wordt opnieuw 27,9 m³/s gereserveerd voor de Waal.

Daarnaast wordt ten behoeve van verversing $25 \text{ m}^3/\text{s}$ gereserveerd voor de Nederrijn en wordt ten behoeve van de zoetwatervoorziening van de om het IJsselmeer liggende polders $285 \text{ m}^3/\text{s}$ gereserveerd voor de IJssel. Omdat voor de IJssel met een afvoer van $285 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt voldaan aan de eisen op het gebied van scheepvaart kan het resterende deel van de afvoer bij Lobith van $520 \text{ m}^3/\text{s}$ ten behoeve van scheepvaart via de Waal afgevoerd worden. Dit geeft de in Tabel 7.15 weergegeven gewenste in te stellen afvoeren bij het scenario Lage afvoer zonder opzet van het IJsselmeerpeil. Omdat deze gewenste in te stellen afvoerverdeling niet voldoet aan de gewenste minimale afvoeren van de Waal dienen aanvullende maatregelen in de Waal de bevaarbaarheid van deze Rijntak zoveel als mogelijk te garanderen.

Tabel 7.15 – Gewenste in te stellen afvoeren bij scenario Lage afvoer zonder opzet IJsselmeerpeil

Rijntak	Gewenste maximale afvoer (m^3/s)	Gewenste in te stellen afvoer (m^3/s)
Waal	851	210
Nederrijn	25	25
IJssel	285	285
Rijn	1.161	520

7.5 Gewenste veranderingen in afvoerverdeling

Voor de door Rijkswaterstaat bepaalde afvoerverdeling bij een afvoer bij Lobith van $520 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt, onder aanname van een afvoer van de Nederrijn van $25 \text{ m}^3/\text{s}$, aangenomen dat de procentuele afvoerverdeling bij deze afvoer overeenkomt met de procentuele afvoerverdeling bij een afvoer bij Lobith van $600 \text{ m}^3/\text{s}$. (7) Tabel 7.16 geeft de met behulp van maatregelen gewenste in te stellen verandering in de afvoerverdeling bij de Pannerdensch Kop. Uit deze tabel kan afgelezen worden dat het gewenst is bij de Pannerdensch Kop ongeveer $260 \text{ m}^3/\text{s}$ meer over het Pannerdensch Kanaal en minder over de Waal te sturen.

Tabel 7.16 – Gewenste verandering in afvoerverdeling bij Pannerdensch Kop bij scenario Lage afvoer zonder opzet IJsselmeerpeil

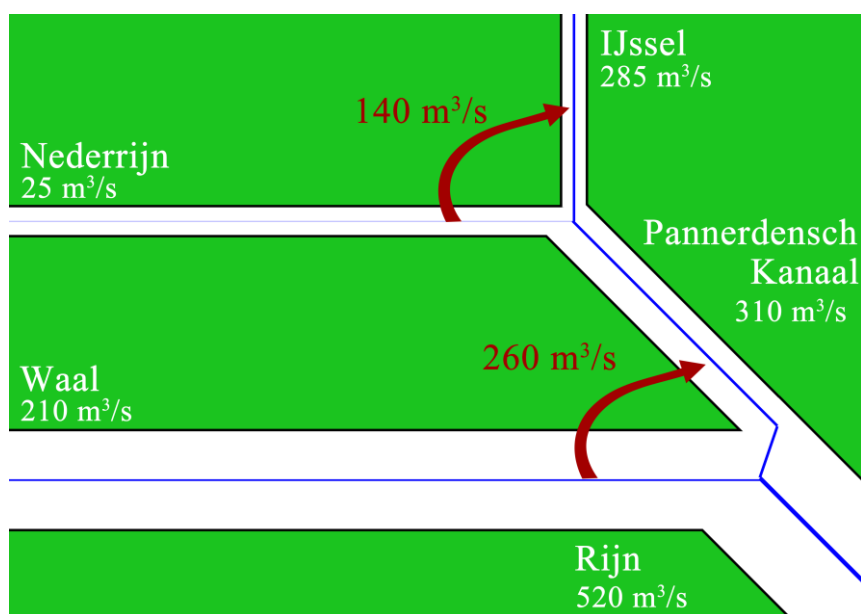
Splitsingspunt	Rijntak	Afvoer RWS (m^3/s)	Gewenste in te stellen afvoer (m^3/s)	Gewenste verandering (m^3/s)
Pannerdensch Kop	Waal	473	210	-263
	Pannerdensch Kanaal	47	310	+263

Het met behulp van maatregelen instellen van de gewenste verandering in de afvoerverdeling bij de Pannerdensch Kop brengt gewijzigde afvoeren van de Nederrijn en de IJssel met zich mee. Aangenomen wordt dat de procentuele afvoerverdeling bij de IJsselkop niet verandert door de veranderde afvoer van het Pannerdensch Kanaal. Tabel 7.17 geeft de met behulp van maatregelen gewenste in te stellen verandering in de afvoerverdeling bij de IJsselkop. Uit deze tabel kan afgelezen worden dat het gewenst is bij de IJsselkop ongeveer $140 \text{ m}^3/\text{s}$ meer over de IJssel en minder over de Nederrijn te sturen.

Tabel 7.17 – Gewenste verandering in afvoer verdeling bij IJsselkop bij scenario Lage afvoer zonder opzet IJsselmeerpeil

Splitsingspunt	Rijntak	Afvoer RWS (m ³ /s)	Afvoer bij gewenste verdeling PK (m ³ /s)	Gewenste in te stellen afvoer (m ³ /s)	Gewenste verandering (m ³ /s)
IJsselkop	Nederrijn	25	165	25	-140
	IJssel	22	145	285	+140

Figuur 7.7 geeft een schematische weergave van de gewenste in te stellen afvoeren per Rijntak en de gewenste veranderingen van de afvoer verdelingen bij de Pannerdensch Kop en de IJsselkop bij het scenario Lage afvoer zonder opzet van het IJsselmeerpeil.



Figuur 7.7 – Gewenste afvoeren en gewenste veranderingen in afvoer verdeling bij scenario Lage afvoer zonder opzet IJsselmeerpeil

8 Maatregelen

Om de in het voorgaande hoofdstuk beschreven veranderingen in de afvoerverdelingen bij de verschillende hydraulische scenario's te bewerkstelligen, dienen maatregelen te worden toegepast. Daarbij zullen de in het najaar bij het scenario Lage afvoer met opzet van het IJsselmeerpeil en de bij het scenario Lage afvoer zonder opzet van het IJsselmeerpeil benodigde aanvullende maatregelen ten behoeve van eisen op het gebied van scheepvaart buiten beschouwing worden gelaten. Voor de maatregelen ten behoeve van de veranderingen van de afvoerverdelingen kan van zowel statische als dynamische maatregelen gebruik worden gemaakt. Omdat de afvoerverdeling alleen bij splitsingspunten beïnvloed kan worden, betreft de locatie van de maatregelen de splitsingspunten Pannerdensch Kop en IJsselkop.

8.1 Mogelijke maatregelen

Tabel 8.1 vermeldt maatregelen die de afvoer van de Waal vergroten en de afvoer van het Pannerdensch Kanaal verkleinen. Tabel 8.2 geeft maatregelen die de afvoer van de IJssel vergroten en de afvoer van de Nederrijn verkleinen. In Tabel 8.3 staan maatregelen die de afvoer van het Pannerdensch Kanaal vergroten en de afvoer van de Waal verkleinen. Deze tabellen geven naast de werking van de verschillende maatregelen het effect van de maatregelen bij hoge en bij lage afvoeren.

Tabel 8.1 – Maatregelen die de afvoer over de Waal vergroten

Maatregel	Rijntak	Werking	Hoge afvoeren	Lage afvoeren	Opmerking
Kribben verlagen	Waal	Toename stroomvoerend oppervlak	Waal: toename afvoer Pannerdensch Kanaal (PK): afname afvoer	-	
Uiterwaard verlagen	Waal	Toename stroomvoerend oppervlak bij hoge afvoeren	Waal: toename afvoer PK: afname afvoer	-	
Langsdammen in combinatie met drempel in doorgang naar oevergeul	Waal	Toename stroomvoerend oppervlak bij hoge afvoeren	Waal: toename afvoer PK: afname afvoer	-	De langsdammen vervangen de in de binnenbocht en op rechte stukken aanwezige kribben.
Hoogwatergeul met regelwerk	Waal	Beïnvloeding stroomvoerend oppervlak bij hoge afvoeren	Waal: toename afvoer PK: afname afvoer	-	Een hoogwatergeul ter plaatse van de Pannerdensch Kop.
Dynamische kribben	Waal	Beïnvloeding stroomvoerend oppervlak bij hoge afvoeren	Waal: toename afvoer PK: afname afvoer	-	Bij hoge afvoeren de hoogte en lengte van de kribben verkleinen ten opzichte van de geometrie van de aanwezige kribben.
Kribben verhogen	Pannerdensch Kanaal	Afname stroomvoerend oppervlak bij hoge afvoeren	Waal: toename afvoer PK: afname afvoer	-	
Zomerbed verhogen	Pannerdensch Kanaal	Afname stroomvoerend oppervlak	Waal: toename afvoer PK: afname afvoer	Waal: toename afvoer PK: afname afvoer	

Maatregel	Rijntak	Werking	Hoge afvoeren	Lage afvoeren	Opmerking
Hoogwatervrije leidammen in uiterwaarden	Pannerdensch Kanaal	Afname stroomvoerend oppervlak bij hoge afvoeren	Waal: toename afvoer PK: afname afvoer	-	
Dynamische kribben	Pannerdensch Kanaal	Beïnvloeding stroomvoerend oppervlak bij hoge afvoeren	Waal: toename afvoer PK: afname afvoer	-	Bij hoge afvoeren de hoogte en lengte van de kribben vergroten ten opzichte van de geometrie van de aanwezige kribben.
Regelwerk in winterbed	Pannerdensch Kanaal	Beïnvloeding stroomvoerend oppervlak bij hoge afvoeren	Waal: toename afvoer PK: afname afvoer	-	Indien het regelwerk niet genoeg regelbereik heeft, kan het uitgebreid worden naar het zomerbed. Bijvoorbeeld een regelwerk zoals het regelwerk op de Hondsbroeksche Pleij of een opblaasbare dam.

Tabel 8.2 – Maatregelen die de afvoer over de IJssel vergroten

Maatregel	Rijntak	Werking	Hoge afvoeren	Lage afvoeren	Opmerking
Dynamische kribben	Nederrijn	Beïnvloeding stroomvoerend oppervlak	Nederrijn (NR): afname afvoer IJssel: toename afvoer	NR: afname afvoer en toename waterdiepte IJssel: toename afvoer	Hoogte en lengte van de kribben vergroten bij hoge afvoeren en lengte van de kribben vergroten bij lage afvoeren ten opzichte van de geometrie van de aanwezige kribben.

Maatregel	Rijntak	Werking	Hoge afvoeren	Lage afvoeren	Opmerking
Domein stuw Driel vergroten	Nederrijn	Beïnvloeding stroomvoerend oppervlak bij lage afvoeren		NR: afname afvoer IJssel: toename afvoer	Stuw ook sluiten in het voorjaar bij het scenario Lage afvoer met opzet van het IJsselmeerpeil.
Zomerbed verlagen	IJssel	Toename stroomvoerend oppervlak	NR: afname afvoer IJssel: toename afvoer	NR: afname afvoer IJssel: toename afvoer	
Domein regelwerk Hondsbroeksche Pleij vergroten	IJssel	Beïnvloeding stroomvoerend oppervlak	NR: afname afvoer IJssel: toename afvoer	NR: indien bodemhoogte wordt verlaagd afname afvoer IJssel: indien bodemhoogte wordt verlaagd toename afvoer	Regelwerk is op dit moment tot een afvoer bij Lobith van 16.000 m ³ /s volledig gesloten. Indien de bodemhoogte van de hoogwatergeul wordt verlaagd, kan het domein van dit regelwerk zelfs naar lage afvoeren worden uitgebreid.

Tabel 8.3 – Maatregelen die de afvoer over het Pannerdensch Kanaal vergroten

Maatregel	Rijntak	Werking	Hoge afvoeren	Lage afvoeren	Opmerking
Kribben verlengen	Waal	Afname stroomvoerend oppervlak	Waal: afname afvoer PK: toename afvoer	Waal: afname afvoer PK: toename afvoer	
Zomerbed verhogen	Waal	Afname stroomvoerend oppervlak	Waal: afname afvoer PK: toename afvoer	Waal: afname afvoer PK: toename afvoer	
Regelwerk in zomerbed	Waal	Beïnvloeding stroomvoerend oppervlak bij lage afvoeren	-	Waal: afname afvoer PK: toename afvoer	Bijvoorbeeld een stuw. Regelwerk bij hoge afvoeren volledig openen.

Maatregel	Rijntak	Werking	Hoge afvoeren	Lage afvoeren	Opmerking
Dynamische kribben	Waal	Beïnvloeding stroomvoerend oppervlak bij lage afvoeren	-	Waal: afname afvoer PK: toename afvoer	Bij lage afvoeren de lengte van de kribben vergroten ten opzichte van de geometrie van de aanwezige kribben.
Kribben verwijderen	Pannerdensch Kanaal	Toename stroomvoerend oppervlak	Waal: afname afvoer PK: toename afvoer	Waal: afname afvoer PK: toename afvoer	
Zomerbed verlagen	Pannerdensch Kanaal	Toename stroomvoerend oppervlak	Waal: afname afvoer PK: toename afvoer	Waal: afname afvoer PK: toename afvoer	
Nevengeul met regelwerk	Pannerdensch Kanaal	Beïnvloeding stroomvoerend oppervlak bij lage afvoeren	-	Waal: afname afvoer PK: toename afvoer	Nevengeul ter plaatse van IJsselkop. Regelwerk bij hoge afvoeren volledig sluiten.
Dynamische kribben	Pannerdensch Kanaal	Beïnvloeding stroomvoerend oppervlak bij lage afvoeren	Waal: afname afvoer PK: toename afvoer	Waal: afname afvoer PK: toename afvoer en toename waterdiepte	Bij lage afvoeren de lengte van de kribben verkleinen ten opzichte van de geometrie van de aanwezige kribben.

8.2 Effectieve en haalbare maatregelen

Een keuze tussen de mogelijke maatregelen wordt gemaakt op basis van het effect van de verschillende maatregelen op de afvoerverdelingen bij de gedefinieerde hydraulische scenario's en de haalbaarheid van de maatregelen. Allereerst gaat de voorkeur uit naar dynamische maatregelen omdat deze beter passen bij de over het jaar dynamisch verlopende afvoer van de Rijn. Verder worden bij hoge afvoeren alleen maatregelen met een zuigende werking toegepast daar maatregelen met een stuwende werking bij hoge afvoeren problemen op kunnen leveren met de veiligheid tegen overstromingen. Bij lage afvoeren daarentegen zijn maatregelen met een zuigende werking niet gewenst daar deze maatregelen de waterdiepte bovenstrooms van de desbetreffende maatregel verkleinen en daarmee een negatieve invloed hebben op de bevaarbaarheid van de rivier als geheel. Het verlagen van kribben in de Waal en het verwijderen van kribben in het Pannerdensch Kanaal zullen niet verder uitgewerkt worden omdat de dynamische kribben de kribben in de Waal en het Pannerdensch Kanaal vervangen en de voorkeur uitgaat naar dynamische maatregelen. Verder worden het verlagen van de uiterwaard van de Waal en het verlagen van het zomerbed van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel niet als effectief gezien daar dit maatregelen betreft die de natuur door middel van sedimenttransport zal proberen terug te draaien. Tabel 8.4 geeft een overzicht van de op deze manier verkregen selectie van maatregelen.

Tabel 8.4 – Effectieve en haalbare maatregelen

	Maatregel	Rijntak(ken)
Statische maatregelen	Langsdammen in combinatie met drempel in doorgang naar oevergeul	Waal
Dynamische maatregelen	Dynamische kribben	Waal, Pannerdensch kanaal en Nederrijn
	Regelwerk in zomerbed	Waal
	Hoogwatergeul met regelwerk	Waal
	Regelwerk in zomerbed	Pannerdensch Kanaal
	Domein stuw Driel vergroten	Nederrijn
	Domein regelwerk Hondsbroeksche Pleij vergroten	IJssel

Het idee van dynamische kribben bevindt zich nog in de ontwerpfase, dus de haalbaarheid van deze maatregel is nog niet gegarandeerd. Daar deze maatregel een gunstige invloed heeft op de afvoerverdeling bij alle gedefinieerde scenario's zal deze maatregel desondanks wel verder uitgewerkt worden. De dynamische kribben zullen de aanwezige kribben vervangen. De langsdammen zullen de eventueel in de binnenbocht en op rechte stukken aanwezige kribben vervangen, zie Figuur 8.1. In de buitenbocht zullen de aanwezige kribben vanwege hun bijdrage aan de oeverbescherming behouden worden. De voor een effectieve beïnvloeding van de afvoerverdelingen benodigde afstanden waarover de dynamische kribben en langsdammen toegepast dienen te worden, zullen met behulp van SOBEK worden bepaald.



Figuur 8.1 – Langsdam (36)

Literatuurlijst

1. Ruimte voor de rivier. *Ruimte voor de rivier*. www.ruimtevoorderivier.nl. Geraadpleegd 25 april 2012.
2. Beersma, J.J., Buishand, T.A., Goederen, S. de, Jacobs, P.(2005). *Zout, Zouter, Zoutst*. De Bilt: KNMI.
3. Mazijk (TU Delft), A. van(2005). *Rijn-Alarmmodel bij gestuwde Nederrijn-Lek*. Amsterdam: RIWA Vereniging van Riverwaterbedrijven.
4. Ruijter, P. de, Heijningen, J. van, Stolk, S.(2011). *Regionale Deltascenario's Rijnmond-Drechtsteden*. Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden, Amstelveen.
5. Deltares. *SOBEK*.
6. Deltares. *SOBEK online help*.
7. Schropp, M. (2012). *MEMO Aanpassing afvoerverdeling t.b.v. DPRD*. Waterdienst.
8. Prinsen, G. F.(2008). *Deelrapport Kenmerken Landelijk Oppervlaktewater - Nationaal Hydrolisch Instrumentarium*. Deltares.
9. Rijkswaterstaat(2011). *Waterhuishouding en waterverdeling in Nederland*. Rijkswaterstaat.
10. Deltacommissie (2008). *Samen werken met water*. Deltacommissie.
11. Smienk, H.(2003). *Verbeteren van de Beneden- en Midden-IJssel als scheepvaartweg*. TU Delft.
12. Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2009). *Scheepvaartinformatie Hoofdvaarwegen*.
13. Nieuwhof, Rik, van de Kreeke, P., van der Ziel, F. (2010). *MER Lent rapport Scheepvaart*.
14. Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2006). *Deel 4 Planologische Kernbeslissing Ruimte voor de Rivier*.
15. Ministerie van Verkeer en Waterstaat(2007). *Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkeringen*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
16. Bomas, B., Nienhuis, A., Alberts, F., van der Molen, P.(2003). *Bouwstenennota*. Lelystad: Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling. Geraadpleegd 11 mei 2012.
17. Rijnland (2005). *Waterakkoord KWA*. Waterakkoord KWA. http://www.rijnland.net/regels/waterakkoorden/waterakkoord_kwa#Artikel5-Verplichtingen. Geraadpleegd 14 mei 2012.
18. Haan, T. de (2012). *Beïnvloeding Afvoerverdeling Rijn*.
19. Rijkswaterstaat. *Maeslantkering*. http://www.rijkswaterstaat.nl/water/feiten_en_cijfers/dijken_en_keringen/euopoortkering/maeslantkering/. Geraadpleegd 8 mei 2012.
20. Rijksoverheid (2011). *Kabinet voert Kierbesluit Haringvliet uit*. <http://www.rijksoverheid.nl/nieuws/2011/06/24/kabinet-voert-kierbesluit-haringvliet-uit.html>. Geraadpleegd 11 mei 2012.

21. Bulthuis (RWS), J., Slootjes (HKV), N., Karelse (DHV), M.K., van Kruchten (DHV), Y.J.G., Louters (DHV), T., Goederen (RWS), S. de, et al.(2010). *Gevoeligheidsanalyse Waterberging Zuidwestelijke Delta*. Rijksoverheid - Rijkswaterstaat.
22. Stichting Deltawerken Online. *Deltawerken*. <http://www.deltawerken.com/>. Geraadpleegd 11 mei 2012.
23. Sandt, T. van de (31 januari 2009). *Getijdencentrale in Brouwersdam serieuze optie*. Technisch Weekblad. <http://www.technischweekblad.nl/getijdencentrale-in-brouwersdam-serieuze-optie.79217.lynkx>.
24. Deltares (2008). *Brouwersluis*. Deltares. <https://publicwiki.deltares.nl/display/DV/Brouwersluis>. Geraadpleegd 11 mei 2012.
25. Deltares (2008). *Flakkeese spuisluis*. Deltares. <http://publicwiki.deltares.nl/download/attachments/13795482/Flakkeese-spuisluis.pdf?version=1&modificationDate=1200788091000>. Geraadpleegd 11 mei 2012.
26. Google (2010). *Google Maps*. <http://maps.google.nl/maps>. Geraadpleegd 11 mei 2012.
27. Rijkswaterstaat. *Oosterscheldekering*. http://www.rijkswaterstaat.nl/water/feiten_en_cijfers/dijken_en_keringen/oosterscheldekering/. Geraadpleegd 8 mei 2012.
28. Deltares (2008). *Bergse Diepsluis*. Deltares. <http://publicwiki.deltares.nl/download/attachments/13795482/Bergsediepsluis.pdf?version=1&modificationDate=1200788091000>. Geraadpleegd 11 mei 2012.
29. Schieland en de Krimpenerwaard (2005). *Waterakkoord Hollandsche IJssel en Lek - Agendapunt 13*. Schieland en de Krimpenerwaard. <http://www.schielandendekrimpenerwaard.nl/aspx/download.aspx?File=/contents/pages/27294/agendapunt13waterakkoordhollandscheijsselenlek.pdf>. Geraadpleegd 15 mei 2012.
30. KNMI. *Nader Verklaard Stormverwachtingen*. <http://www.knmi.nl/cms/content/31502/stormverwachtingen>. Geraadpleegd 8 mei 2012.
31. Rijkswaterstaat. *Normaal Amsterdams Peil*. http://www.rijkswaterstaat.nl/kenniscentrum/databestanden/normaal_amsterdams_peil/. Geraadpleegd 10 mei 2012.
32. Beaufort, G. (2009). *Durf in Delta*. Rijkswaterstaat.
33. Rijkswaterstaat (2012). *Actuele waterstand en waterafvoer*. Geotool. <http://www.rijkswaterstaat.nl/geotool/>. Geraadpleegd 16 mei 2012.
34. Overloop, P.J. van. *Operational Water Management of the main waters in The Netherlands*. TU Delft.
35. Rijkswaterstaat. *O&A Beheerplan Waterbeheer 21e eeuw*.
36. Geopersdienst. *Langsdam in de Waal*. <http://www.geopersdienst.nl/wp-content/uploads/2012/02/langsdaminwaal7.png1328690833>. Geraadpleegd 6 juni 2012.

Auteursvermelding

Tabel A.1 – Auteursvermelding

Hoofdstuknummer	Auteur	Review door:
1-3	P.W. van Steijn	A. C. van 't Veld
4	P.W. van Steijn	R.P. van Denderen
5	C.A. van Geffen	R.P. van Denderen
6.1-6.3	A.C. van 't Veld	C. A. van Geffen
6.4.1-6.4.3	R.P. van Denderen	P. W. van Steijn
6.4.4-6.4.5	P.W. van Steijn	R. P. van Denderen
7	C.A. van Geffen	R.P. van Denderen
8	C.A. van Geffen	R.P. van Denderen
Bijlage A	A. C. van 't Veld	

Afbeeldingen auteursvermelding

Figuur 1.1 – Bewerkt door: P.W. van Steijn

Figuur 4.1 – Bewerkt door: P.W. van Steijn

Figuur 4.2 – Bewerkt door: P.W. van Steijn

Figuur 4.4 – Bewerkt door: P.W. van Steijn

Figuur 4.5 – Bewerkt door: P.W. van Steijn

Figuur 4.6 – Bewerkt door: P.W. van Steijn

Figuur 6.3 – Gemaakt door: R.P. van Denderen

Figuur 6.4 – Gemaakt door: R.P. van Denderen

Figuur 6.5 – Gemaakt door: R.P. van Denderen

Figuur 6.6 – Gemaakt door: R.P. van Denderen

Figuur 7.1 – Gemaakt door: R.P. van Denderen

Figuur 7.2 – Gemaakt door: R.P. van Denderen

Figuur 7.3 – Gemaakt door: R.P. van Denderen

Figuur 7.4 – Gemaakt door: R.P. van Denderen

Figuur 7.5 – Gemaakt door: R.P. van Denderen

Figuur 7.6 – Gemaakt door: R.P. van Denderen

Figuur 7.7 – Gemaakt door: R.P. van Denderen

Figuur 8.1 – Bewerkt door: C.A. van Geffen

Figuur B.1 – Gemaakt door: R.P. van Denderen

Figuur B.2 – Gemaakt door: A.C. van 't Veld

Figuur B.3 – Gemaakt door: A.C. van 't Veld

Titelblad – Bewerkt door: A.C. van 't Veld

Logo – Gemaakt door: A.C. van 't Veld

Voetnoot – Bewerkt door: A.C. van 't Veld

Nawoord

Nu deze voorstudie is voltooid, zal individueel verder gegaan worden om per gekozen maatregel het effect op de afvoerverdeling te bepalen. Hierbij zal gekeken worden in hoeverre met elke maatregel afzonderlijk de gewenste verandering in de afvoerverdeling bereikt kan worden. Hiermee zijn de gestelde deelvragen 1 tot en met 4 geheel beantwoord. De laatste twee deelvragen zullen in dit onderzoek onbeantwoord blijven. Dit betekent dat er niet meer gekeken zal worden naar een combinatie van maatregelen. Er zal daarom geen antwoord gegeven kunnen worden op de gestelde hoofdvraag uit deze voorstudie. Gezien het korte tijdsbestek waarin dit onderzoek voltooid moest worden en de vertraging die ontstaan is wegens modelleerproblemen, zullen alleen conclusies getrokken worden per maatregel.

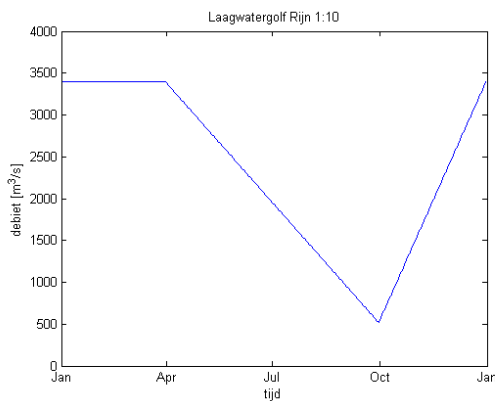
Bijlagen

Bijlage A: Berekening Opzet IJsselmeer

In deze berekening wordt onderzocht hoeveel water er extra nodig is over de IJssel om het IJsselmeer 1,5 m op te zetten in het voorjaar over de periode van 1 april tot 20 juni. In deze periode van 81 dagen wordt er eerst gekeken over bovenop de vereiste 285 m³/s voldoende water beschikbaar is om het IJsselmeer te vullen. Indien dit niet mogelijk is wordt onderzocht hoeveel water er extra over de IJssel moet worden gestuurd in deze periode.

Beschikbare opzet IJsselmeer

In Hoofdstuk 5 is vastgesteld dat de gemiddelde afvoer van de Rijn op 1 april 3400 m³/s is. Verder neemt deze afvoer tot 1 oktober lineair af tot 520 m³/s (zie Figuur B.1).



Figuur B.1 – De maatgevende afvoergolf van de Rijn met een kans van 1:10

Tussen 1 april en 1 oktober zitten 183 dagen. Vanuit deze gegevens kan berekend worden hoeveel water er door de Rijn stroomt bij Lobith op 20 juni.

$$Rijn_{20juni} = \frac{183 - 81}{183} \cdot (3400 - 520) + 520 = 2125 \text{ m}^3/\text{s} \quad (1)$$

Verder geldt dat bij een afvoer van 4000 m³/s er 553 m³/s over de IJssel stroomt en bij 2000 m³/s er 291 m³/s over de IJssel stroomt. (7) Er wordt aangenomen dat de relatie tussen deze getallen lineair is.

Vanuit deze gegevens kan bepaald worden wat de afvoer is op de IJssel van 1 april tot 20 juni. Hiervoor wordt een lineaire formule opgesteld:

$$y = ax + b \quad (2)$$

Hiervoor worden eerst de debieten vastgesteld op 1 april en 1 juni.

$$IJssel_{1april} = \frac{3400 - 2000}{4000 - 2000} \cdot (553 - 291) + 291 = 474 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3)$$

$$IJssel_{20juni} = \frac{2125 - 2000}{4000 - 2000} \cdot (553 - 291) + 291 = 307 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4)$$

Vanuit (3) en (4) kunnen de factoren uit vergelijking (2) worden opgelost.

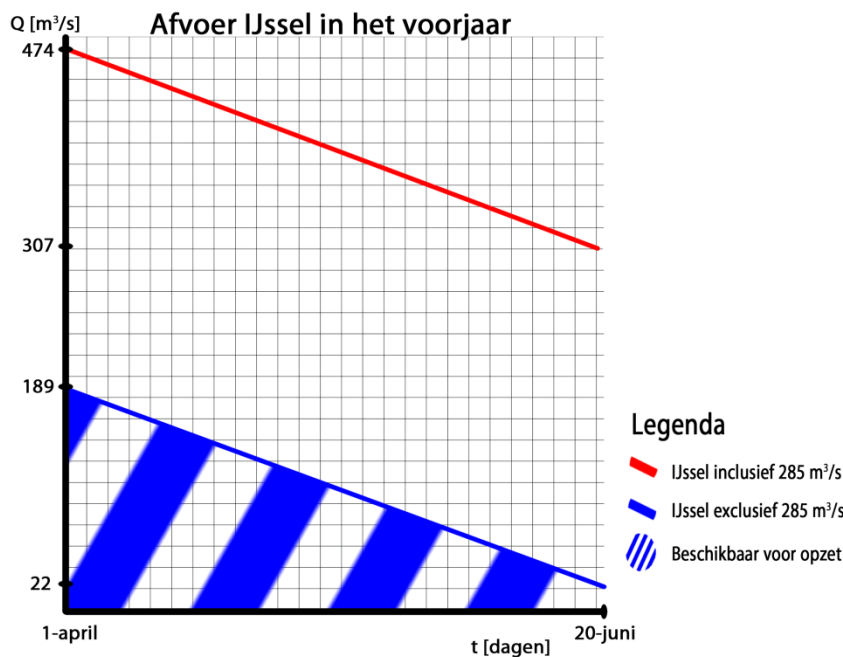
$$a = \frac{307 - 474}{81 \cdot 24 \cdot 3600} = -2,386 \cdot 10^{-5} \text{ en } b = 474 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5)$$

$$Q_{Ijssel \text{ inclusief } 285}(t) = -2,386 \cdot 10^{-5}t + 474 \quad (6)$$

Echter kan dit debiet niet volledig worden gebruikt aangezien er 285 m³/s gebruikt wordt voor koel- en zoetwatervoorziening en scheepvaart. Vanuit vergelijking (6) kan dan vergelijking (7) worden opgesteld.

$$Q_{Ijssel \text{ exclusief } 285}(t) = -2,386 \cdot 10^{-5}t + 189 \quad (7)$$

Deze twee vergelijkingen zijn beide geplot in Figuur B.2, waarin vergelijking (6) is weergegeven als IJssel inclusief 285 m³/s en vergelijking (7) als IJssel exclusief 285 m³/s.



Figuur B.2 – Afvoer IJssel in het voorjaar

Het oppervlak onder de grafiek geeft de beschikbare hoeveelheid water voor opzet weer. Het oppervlak onder de grafiek is gelijk aan:

$$V_{\text{Beschikbare opzet}} = \left(\frac{1}{2} * (189 - 22) + 22 \right) \cdot 81 \cdot 24 \cdot 3600 = 7,383 \cdot 10^8 \text{ m}^3 \quad (8)$$

Aangezien het IJsselmeer een oppervlakte heeft van 1200 km² kan uitgerekend worden hoeveel cm opzet dit geeft:

$$h_{\text{beschikbare opzet}} = \frac{738331200}{1200 \cdot 10^6} = 0,615 \text{ m} \approx 62 \text{ cm} \quad (9)$$

Extra opzet IJsselmeer

Aangezien er 1,5 m opzet gevraagd is en er 62 cm, zie vergelijking (9), dient er extra water naar de IJssel te worden gestuurd om de benodigde opzet te halen.

De benodigde hoeveelheid m^3 water is:

$$V_{\text{Benodigde totale opzet}} = 1,5 \text{ m} \cdot 1200 \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 1,8 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \quad (10)$$

Hieruit kan het verschil worden bepaald wat resulteert in de benodigde extra hoeveelheid water over de IJssel.

$$V_{\text{Extra opzet in } m^3} = 1,8 \cdot 10^9 - 7,383 \cdot 10^8 = 1,062 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \quad (11)$$

Om deze extra opzet te bereiken zijn twee methoden het onderzoeken waard. De eerste methode is om standaard een extra debiet over de IJssel te sturen onafhankelijk van het huidige debiet van de IJssel. Dit resulteert in een extra debiet van 1 april tot 20 juni van:

$$Q_{\text{gemiddeld}} = \frac{1,062 \cdot 10^9}{81 \cdot 24 \cdot 3600} = 151,7 \text{ m}^3/\text{s} \quad (12)$$

De tweede methode is om de hoeveelheid extra debiet te bepalen aan de hand van een percentage extra debiet ten opzichte van de huidige debietsverdeling. Deze keuze kan gemaakt worden als verwacht wordt dat het effect van de maatregelen lineair afneemt naarmate de debietsverdeling afneemt. Het extra debiet over de IJssel krijgt dan een formule in de vorm van:

$$Q_{\text{extra afvoer}}(t) = ct + d \quad (13)$$

Om de factoren c en d in deze formule op te lossen krijgt is een stelsel van drie vergelijkingen met drie onbekenden nodig ((17), (19) en (20)). De eerste vergelijking kan bepaald worden aan de hand van het volgende evenwicht:

$$\text{Oppervlakte onder de grafiek} = V_{\text{Extra opzet in } m^3} \quad (14)$$

$$\int_0^{81 \cdot 24 \cdot 3600} ct + d \, dt = 1,062 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \quad (15)$$

$$\left. \frac{1}{2} cx^2 + dx \right|_0^{81 \cdot 24 \cdot 3600} = 1,062 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \quad (16)$$

$$3499200c + d = 151,7 \quad (17)$$

De andere vergelijkingen worden bepaald uit het percentage dat extra over de IJssel stroomt:

$$Verhouding = \frac{Q_{extra\ afvoer}(t)}{Q_{IJssel\ inclusief\ 285}(t)} = \frac{ct + d}{-2,386 \cdot 10^{-5}t + 474} \quad (18)$$

Op $t = 0$ dagen geeft dit de volgende vergelijking:

$$Verhouding = \frac{d}{474} \quad (19)$$

En op $t = 81$ dagen = 699840 seconden geeft dit de volgende vergelijking:

$$Verhouding = \frac{699840c + d}{307} \quad (20)$$

Als vergelijking (19) en (20) aan elkaar gelijk worden gesteld kan worden gevonden dat:

$$d = -1,986 \cdot 10^7 c \quad (21)$$

Als vervolgens vergelijking (21) wordt ingevuld in vergelijking (17) dan wordt gevonden dat:

$$c = -9,27 \cdot 10^{-6} m^3/s^2 \quad (22)$$

Aan de hand van deze waarde kunnen ook d en de verhouding bepaald worden:

$$d = 184 m^3/s \quad (23)$$

$$Verhouding = 0,388 = 38,8\% \quad (24)$$

Dit betekent dat er ongeveer 40% extra water over de IJssel moet stromen in de periode tussen 1 april en 20 juni. Het debiet over deze periode weergegeven in een formule is:

$$Q_{extra\ afvoer}(t) = -9,270 \cdot 10^{-6}t + 184 \quad (25)$$

Uit deze formule kan het volgende worden afgeleid:

$$Q_{extra\ afvoer}(0) = 184 m^3/s \quad (26)$$

$$Q_{extra\ afvoer}(81\ dagen) = 119 m^3/s \quad (27)$$

$$Q_{gem.extra\ afvoer} = Q_{extra\ afvoer}(40,5\ dagen) = 152 m^3/s \quad (28)$$

Het totale “nieuwe” debiet dat over de IJssel gaat is $Q_{extra\ afvoer}(t)$ (25) opgeteld bij $Q_{IJssel\ inclusief\ 285}(t)$ (6):

$$Q_{nieuw\ afvoer}(t) = (-9,270 \cdot 10^{-6}t + 184) + (-2,386 \cdot 10^{-5}t + 474) \quad (29)$$

$$Q_{\text{nieuw afvoer}}(t) = -3,313 \cdot 10^{-5}t + 658 \quad (30)$$

De totale “nieuwe” afvoer op de IJssel wordt dan op 1-april en 20 juni:

$$Q_{\text{nieuw afvoer}}(0) = 658 \text{ m}^3/\text{s} \quad (31)$$

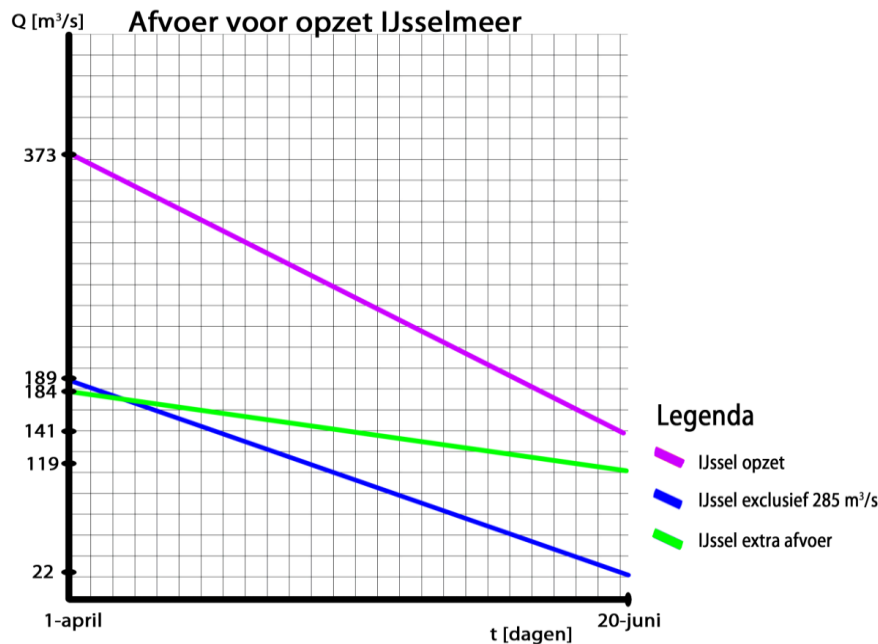
$$Q_{\text{nieuw afvoer}}(81 \text{ dagen}) = 426 \text{ m}^3/\text{s} \quad (32)$$

$$Q_{\text{gem.nieuwe afvoer}} = Q_{\text{nieuw afvoer}}(40,5 \text{ dagen}) = 542 \text{ m}^3/\text{s} \quad (33)$$

Het debiet beschikbaar voor opzet is dan $Q_{\text{nieuw afvoer}}(t) - 285 \text{ m}^3/\text{s}$:

$$Q_{\text{opzet}}(t) = -3,313 \cdot 10^{-5}t + (658 - 285) = -3,313 \cdot 10^{-5}t + 373 \quad (34)$$

In Figuur B.3 zijn de grafieken geplot van $Q_{\text{opzet}}(t)$ (34), $Q_{\text{IJssel exclusief 285}}(t)$ (7) en $Q_{\text{extra afvoer}}(t)$ (25).



Figuur B.3 – Afvoer voor opzet IJsselmeer

Ter controle kan gekeken worden of het oppervlak onder $Q_{\text{opzet}}(t)$ (34) gelijk is aan $V_{\text{Benodigde totale opzet}}$, zie vergelijking (10).

$$V_{Q_{\text{opzet}}(t)} = \int_0^{81 \cdot 24 \cdot 3600} -3,313 \cdot 10^{-5}t + 373 \, dt \quad (35)$$

$$V_{Q_{\text{opzet}}(t)} = 1,799 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \approx 1,80 \cdot 10^9 \text{ m}^3 = V_{\text{Benodigde totale opzet}} \quad (36)$$

In geval dat een debiet over de IJssel voor opzet wordt bereikt zoals is weergegeven in vergelijking (34) is er voldoende water beschikbaar om het IJsselmeer 1,5 m op te zetten.