

Maakbaarheid afvoerverdeling Rijntakken laagwater

2D D-HYDRO berekeningen

HKV LIJN IN WATER

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Rijkswaterstaat WVL

Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Maakbaarheid afvoerverdeling Rijntakken

HKV LIJN IN WATER

2D D-HYDRO berekeningen

Eindrapport

Auteur(s)
Matthijs Gensen
Lieke Lokin
Abe Klaas de Jong
Joana Vieira da Silva

PR5289.10
juni 2025

Samenvatting

Dit rapport is het resultaat van een onderzoek naar de maakbaarheid van de gewenste afvoerverdeling over de Rijntakken bij laagwater. Bij de voorlopige definitie van de wenselijk afvoerverdeling gaat er met afnemende afvoer zo lang mogelijk 285 m^3/s naar de IJssel en 30 m^3/s naar de Nederrijn waarbij dit tot een Boven-Rijn afvoer van 1300 m^3/s mogelijk moet zijn. Met D-HYDRO berekeningen is voor een viertal basismaatregelen de effectiviteit onderzocht.

De onderzochte maatregelen zijn:

- Het versmallen van de Waal met 30 m over een lengte van 50 km
- Het versmallen van de Waal met 30 m en het ophogen van de Waalbodem met 20 cm over een lengte van 50 km
- Het versmallen van de Waal met 30 m over een lengte van 50 km en het verbreden van de Boven-IJssel met 15 m over een lengte van 10 km
- Het verruwen van de buitenbochten van de Boven-Waal

De resultaten tonen aan dat een combinatie van maatregelen nodig is om de gewenste afvoerverdeling te bereiken. Het versmallen van de Waal levert bij een Boven-Rijn afvoer van 1300 m^3/s ongeveer 40 m^3/s verhoging van de IJsselafvoer op. Dit is een bovengrens van wat met de doorgerekende versmalling gerealiseerd kan worden, omdat geen rekening is gehouden met afvoer door de oevergeul. Afvoer door de oevergeul reduceert het effect van de versmalling. Afvoer door de oevergeul is gewenst vanuit ecologie, maar dit geeft dus een tegenstrijdig belang met de gewenste extra afvoer naar de IJssel. Het verbreden van de IJssel of het verruwen van de Waalbochten levert 20 m^3/s op. Het ophogen van de Waalbodem levert ongeveer 15 m^3/s op. De extra afvoer naar de IJssel betekent ook dat stuw Driel al bij lagere afvoeren geopend kan worden en dat de Nederrijn-Lek tot tientallen dagen minder per jaar volledig gestuwd is.

De resultaten wijzen erop dat de effecten van maatregelen opgeteld kunnen worden als maatregelen gecombineerd worden; er is geen verminderende of versterkende interactie in de effecten van maatregelen op de afvoerverdeling. Lateralen en de resolutie van het rekenrooster hebben slechte beperkte invloed op de berekende effectiviteit van de maatregelen.

Voor de effecten op de rivierfuncties zijn diverse ontwerpkeuzes rondom de maatregel ‘versmallen Waal’ bepalend. De inrichting van de oevergeul bepaalt sterkt de effecten op hoogwaterveiligheid en natuur. De verandering van de afvoerverdeling is gunstig voor de bevaarbaarheid van de IJssel. In benedenstroomse delen van de Waal neemt de bevaarbaarheid licht af door de afname van de afvoer.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Context	1
1.2	Onderzoek maakbaarheid gewenste afvoerverdeling lage afvoeren	1
1.3	Doelstelling rapportage	2
1.4	Leeswijzer	2
2	Methodiek	3
2.1	Algemeen	3
2.2	Modellering	3
2.3	Referentiesituatie	5
3	Effectiviteitsanalyse basismaatregelen	8
3.1	Versmalling van de Waal met 30 meter	9
3.2	Versmalling van de Waal met 30 meter en een verhoging van de Waalbodem met 20 centimeter	13
3.3	Versmalling van de Waal met 30 meter en een verbreding van de (Boven-)IJssel met 15 meter	15
3.4	Verruwing van de buitenbochten van de Waal	18
4	Aanvullende analyses effectiviteit maatregelen	22
4.1	Optelbaarheid losse maatregelen in maatregelpakketten	22
4.2	Vergelijking met 1D-resultaten	23
4.3	Keuzes omtrent 2D-modellering	24
4.4	Keuzes omtrent schematisatie maatregelen	27
4.5	Alternatieve keuzes zoetwatervoorziening	33
5	Synthese maatregelen en effecten	35
5.1	Beschouwing doelbereik afvoerverdeling laagwater	35
5.2	Effecten op rivierkunde	36
5.3	Effecten op rivierfuncties	37
5.4	Kosten en uitvoerbaarheid	46
6	Conclusies en aanbevelingen	48
6.1	Conclusies	48
6.2	Aanbevelingen	49
7	Referenties	50

Bijlagen 51
A Vergelijking met vereffende afvoerverdeling 53
B Baselinemaatregelen t.b.v. referentie 55
C Baseline schematisaties 56
D Resultaten in tabellen 64
E Memo ruwheidswaardes en polygonen voor varianten “verruwen Waal” 65

1 Inleiding

1.1 Context

Het programma Ruimte voor de Rivier 2.0 (RvdR2.0), voorheen Integraal Riviermanagement, heeft tot doel het Nederlandse rivierengebied toekomstbestendig te maken.

De Rijn is de belangrijkste bron van zoetwater voor Nederland. De verdeling van het Rijnwater over de Rijntakken en vervolgens de regionale wateren wordt in belangrijke mate bepaald door de verdeling over de splitsingspunten Pannerdense Kop en IJsselkop. Door ongelijke bodemerosie in de Rijntakken nabij de splitsingspunten is de IJsselafvoer bij lage afvoeren (≈ 1000 m^3/s op Boven-Rijn) sinds de aanleg van stuw Driel (1970) met ongeveer 30 m^3/s afgenomen ten gunste van de Waal. Zonder verder ingrijpen zet deze trend zich door en zal in het jaar 2050 de IJsselafvoer nog eens 25 m^3/s minder ontvangen. Deze ontwikkeling is negatief voor de zoetwatervoorziening van gebieden die afhankelijk zijn van het water uit de IJssel en het IJsselmeer (ongeveer de helft van Nederland). Daarnaast heeft de verandering in afvoerverdeling in combinatie met de bodemerosie ook een effect op de waterstanden en waterdieptes en daarmee op de rivierfuncties in het rivierengebied zelf (scheepvaart, riviernatuur, grondwater, inlaatpunten).

In het kader van Ruimte voor de Rivier 2.0 wordt vanaf 2024 in verschillende werkpakketten onderzoek opgestart:

- Het deelonderzoek 'Uitwerking beleidskeuze Rivierbodemligging' richt zich op de maakbaarheid van de genoemde beleidskeuze. De nadruk hierbij ligt op de rivierbodem. Herstel van de afvoerverdeling bij laag water is hierbij expliciet in beeld maar geen doel op zich.
- Dit project 'Afvoerverdeling over de splitsingspunten Rijntakken bij lage afvoeren' richt zich specifiek op de maakbaarheid van de gewenste afvoerverdeling bij laagwater en is dus aanvullend op het project 'Uitwerking beleidskeuze Rivierbodemligging'.
- Een derde project legt de focus op de waterverdeling bij hoge afvoeren: Voor vijf verschillende scenario's voor de verdeling van de extra afvoer boven 16.000 m^3/s over de Waal en de IJssel is verkend hoe deze verdeling kan worden gerealiseerd.

1.2 Onderzoek maakbaarheid gewenste afvoerverdeling lage afvoeren

De 'gewenste' afvoerverdeling bij laagwater staat (nog) niet vast. Om deze te bepalen loopt een gezamenlijk spoor met o.a. het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW). DPZW onderzoekt in de lopende planperiode de wenselijke verdeling, RvdR2.0 de maakbaarheid hiervan. In 2026 zal de herijking van de Deltabeslissingen een afgewogen en samenhangend beeld moeten opleveren waaronder een richtinggevende koers voor de afvoerverdeling bij laag water. In 2025 moeten de verschillende bouwstenen hiervoor al in beeld zijn, waaronder dus inzicht in de maakbaarheid van de gewenste afvoerverdeling.

Voorlopig is door DPZW de gewenste verdeling gedefinieerd als de verdeling conform (in grote lijnen) de 2e Nota Waterhuishouding (1984). Dit houdt in dat dat bij afnemende afvoeren op de Rijn zo lang mogelijk, tot een afvoer van 1300 m^3/s bij Lobith, minimaal 285 m^3/s via de IJssel en

30 m^3/s via de Nederrijn wordt afgevoerd. Dat is bij de Lobithafvoer van 1300 m^3/s ca. 57 m^3/s extra naar de IJssel t.o.v. de huidige situatie (vereffende afvoerverdeling 2024).

1.3 Doelstelling rapportage

Het doel van deze rapportage is inzicht te krijgen in hoeverre met maatregelen in het splitsingspuntengebied de wenselijke afvoerverdeling bij laagwater is te realiseren en wat de consequenties zijn voor het rivierengebied en de rivierfuncties.

De volgende vragen worden beantwoord:

- Hoe effectief zijn verschillende maatregelen?
- Met welke maatregelen kan de wenselijke verdeling gerealiseerd worden?
- Wat zijn globaal de voor- en nadelen van de verschillende maatregelen (effecten op rivierfuncties, kosten en uitvoerbaarheid)?

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de algemene methodiek van deze studie, de keuzes over de modellering en beschrijft de referentiesituatie. In Hoofdstuk 3 berekenen we de effecten van een viertal basismaatregelen. Hierbij beschrijven we de maatregelen en tonen de resultaten in termen van het effect op de afvoerverdeling en op de waterstanden langs de riviertakken. In Hoofdstuk 4 voeren we aanvullende analyses uit om de effectiviteit van de basismaatregelen beter te kunnen doorgronden en op waarde te kunnen schatten. In Hoofdstuk 0 geven we een synthese van de resultaten en geven een beschouwing van de resultaten ten aanzien van hun effecten op rivierkunde, de rivierfuncties en de kosten en uitvaarbaarheid. Hoofdstuk 0 geeft de conclusies en aanbevelingen.

2 Methodiek

2.1 Algemeen

In een voorafgaand onderzoek uitgevoerd door Deltares (Asselman et al., 2025) is in 1D de effectiviteit ten aanzien van een wijziging van de afvoerverdeling van een groot aantal maatregelen en dimensioneringen van die maatregelen verkend.

In deze studie zijn in samenspraak met Rijkswaterstaat vier basismaatregelen gekozen waarvan de effectiviteit in 2D wordt geanalyseerd. Van deze maatregelen zijn drie maatregelen ook in 1D geanalyseerd, waardoor we een vergelijking van de resultaten tussen 1D en 2D kunnen doen. Elk van de maatregelen schematiseren we in Baseline en rekenen we door in het Rijntakken-model in D-FLOW FM 2D. Met aanvullende analyses doorgronden we de effectiviteit van de bedachte maatregelen.

Voor de gekozen basismaatregelen brengen we de effecten op rivierkunde en rivierfuncties kwalitatief en waar mogelijk kwantitatief in beeld. Ook geven we met vuistregels inzichten in kosten en uitvoerbaarheid.

2.2 Modellering

Elk van de maatregelen en het geselecteerde maatregelpakket worden doorgerekend tweedimensionaal doorgerekend in D-FLOW FM 2D. In de volgende paragrafen beschrijven we het referentiemodel (2.2.1), de randvoorwaarden (2.2.2) en de aangepaste stuwsturing (2.2.3).

2.2.1 Model en software

Het model wordt opgebouwd uit de Baseline schematisatie *baseline-rijn-beno19_6-v1* en het basismodel *dflowfm2d-rijn-beno19_6-v1b*. Voor het opbouwen van het referentiemodel heeft Rijkswaterstaat 33 maatregelen en een aangepaste modelboundary aangeleverd. De lijst met 33 maatregelen is opgenomen in Bijlage B . De belangrijkste maatregel betreft het aanpassen van de bodemligging naar de bodemligging van 2021 (referentiebodem voor dit onderzoek)

In overleg met Rijkswaterstaat is ervoor gekozen te rekenen met het 40m grid van de Rijntakken horend bij het model *dflowfm2d-rijn-beno19_6-v1b*. Het belangrijkste argument hiervoor is dat het fijnere rooster (20m) van het deelgebied splitsingspunten niet lang genoeg is in de Waal. In paragraaf 4.3.3 is een doorrekening gedaan met het fijnere rekenrooster van het splitsingspuntenmodel om te onderzoeken in hoeverre de resultaten overeenkomen met het grovere rooster.

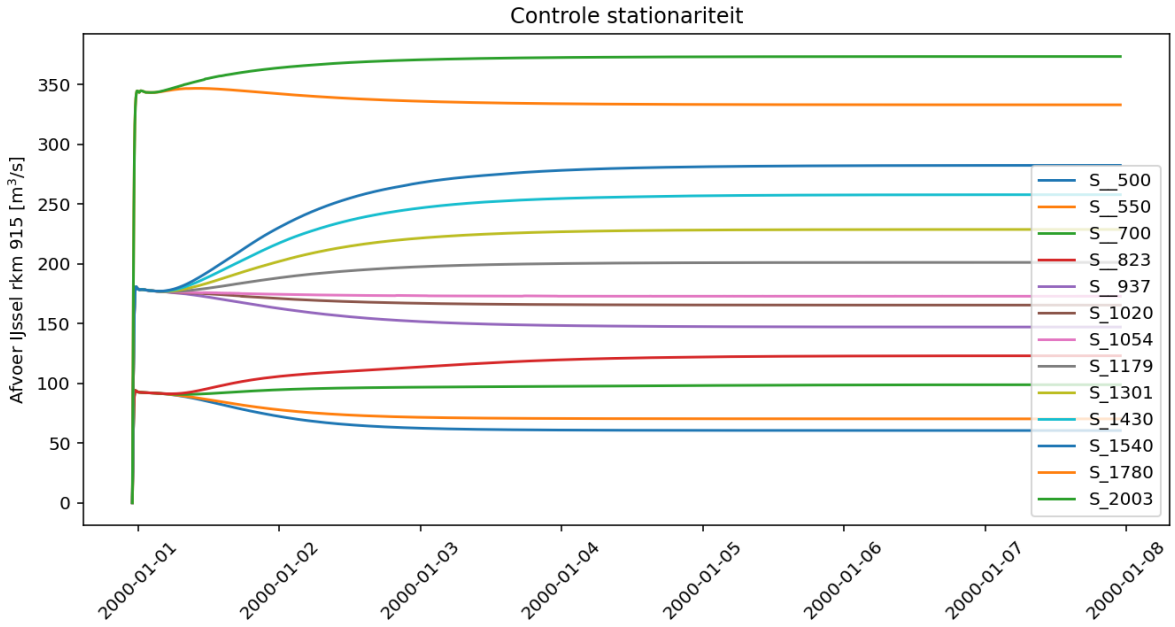
We gebruiken de volgende software:

- Baseline 6.3.2
- Arcgis 10.6
- D-HYDRO 2025.01

2.2.2 Randvoorwaarden

We rekenen met stationaire afvoeren variërend tussen 550 en 2003 m^3/s bij Lobith. Dit komt overeen met het afvoerbereik dat in Asselman et al. (2025) is beschouwd. In tegenstelling tot die 1D modellering hanteren we geen 'trapjes' maar rekenen we de afvoeren los van mekaar door. Dit vereenvoudigt de nabewerking (*last25* csv-bestanden en *fou-files* uit D-HYDRO) en is makkelijker te controleren op stationariteit. Uit de randvoorwaarden gehanteerd door Asselman et al. (2025) rekenen we met 13 afvoerniveaus: 500, 550, 700, 823, 937, 1020, 1054, 1179, 1301, 1430, 1540, 1780 en 2003 m^3/s bij Lobith. Deze afvoerniveaus zijn representatief voor het gehele afvoerbereik relevant voor dit onderzoek; ertussen zijn de effecten vrijwel lineair. Net als Asselman et al. (2025) rekenen we zonder lateralen in de basisset van de berekeningen.

De simulatieperiode is 7 dagen. Dit levert stationaire resultaten op voor de referentiesituatie (Figuur 2.1); ook voor de varianten met maatregelen met sommen wordt gecontroleerd op stationariteit.



Figuur 2.1: Controle op stationariteit van de referentieberekeningen door het weergeven van de IJsselafvoeren op rivierkilometer 915,47.

2.2.3 Stuwsturing

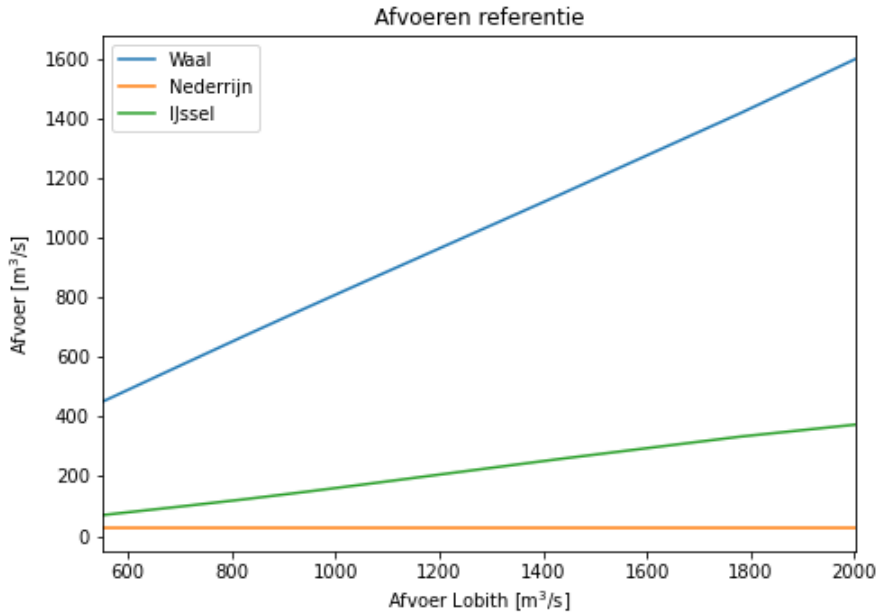
Stuw Driel is belangrijk voor de afvoerverdeling bij lage en gemiddelde rivierafvoeren. Door het (gedeeltelijk) sluiten van stuw Driel gaat er meer afvoer naar de IJssel. De sturing van stuw Driel is afhankelijk van de waterstanden bij Lobith en op de IJsselkop (Hydrologic, 2022). Bij waterstanden lager dan 10,00 m+NAP bij Lobith begint stuw Driel te stuwen met een minimale IJsselafvoer van 285 m^3/s. Tot een waterstand van 8,60 m+NAP bij Lobith (afvoer van ca. 1590 m^3/s) kan deze minimale IJsselafvoer worden gehaald volgens het huidige stuwprogramma (2016). Bij deze afvoer is de stuw volledig gesloten en gaat er enkel nog een afvoer van 30 m^3/s door stuw Driel die nodig is langs de Nederrijn-Lek en gaat er bij verder afnemende afvoer minder dan 285 m^3/s door de IJssel.

Vanwege de wijze waarop stuwsturing in het model is opgenomen, wordt er gekozen niet te rekenen met een actieve sturing van stuw Driel. De effectiviteit van maatregelen wordt namelijk

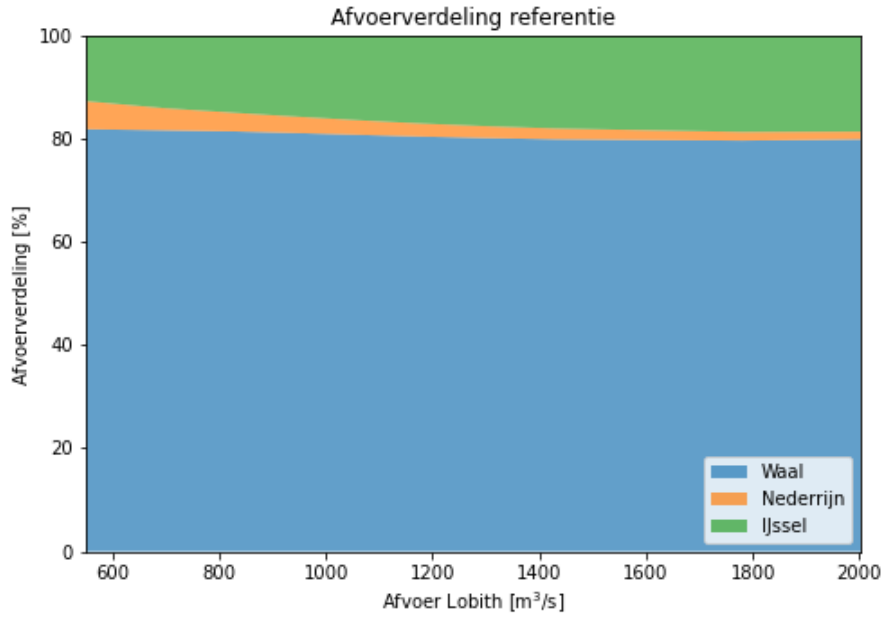
vertroebeld omdat het model de opgelegde stuwregels zal volgen en de stuw als gevolg van veranderde waterstanden bij Lobith en de IJsselkop op een ander moment open en dicht gaat. In plaats van een actieve stuwsturing zetten we stuw Driel dicht en leggen we een constante afvoer van 30 m^3/s door stuw Driel op. Deze aanpak komt overeen met Asselman et al. (2025).

2.3 Referentiesituatie

Voor de referentiesituatie presenteren we in Figuur 2.2 t/m Figuur 2.4 de resultaten van de referentieberekeningen. Met toenemende Lobith-afvoer zien we de afvoer van de Waal nagenoeg lineair toenemen (Figuur 2.2 en Figuur 2.3). Bij een Lobithafvoer van 550 m^3/s gaat 82% van de afvoer naar de Waal en bij een Lobithafvoer van 2003 m^3/s gaat 80% van de afvoer naar de Waal. De Nederrijnafvoer heeft de opgelegde waarde van 30 m^3/s. De procentuele IJsselafvoer neemt toe met toenemende bovenafvoer, namelijk van 13% (=70 m^3/s) bij een Lobithafvoer van 550 m^3/s en 18% (=374 m^3/s) bij een Lobithafvoer van 2003 m^3/s. Voor afvoeren van 1550 m^3/s en lager wordt de minimaal gewenste IJsselafvoer van 285 m^3/s onderschreden. Dit is een iets lagere afvoer dan de vereffende afvoerverdeling uit 2024 (Bijlage A), waarin bij afvoeren van 1590 m^3/s en lager 285 m^3/s naar de IJssel wordt onderschreden. Vanwege dit verschil werken we in de rest van het rapport met het afvoerverschil in plaats van dit absolute afvoerniveau.

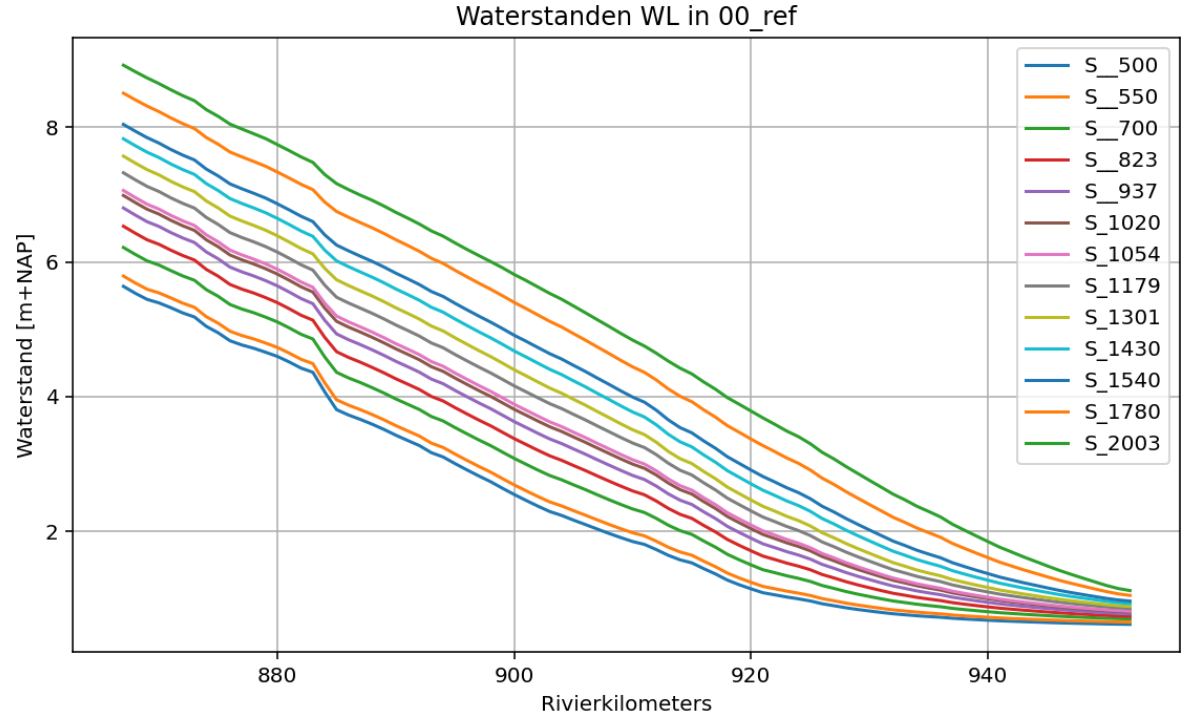


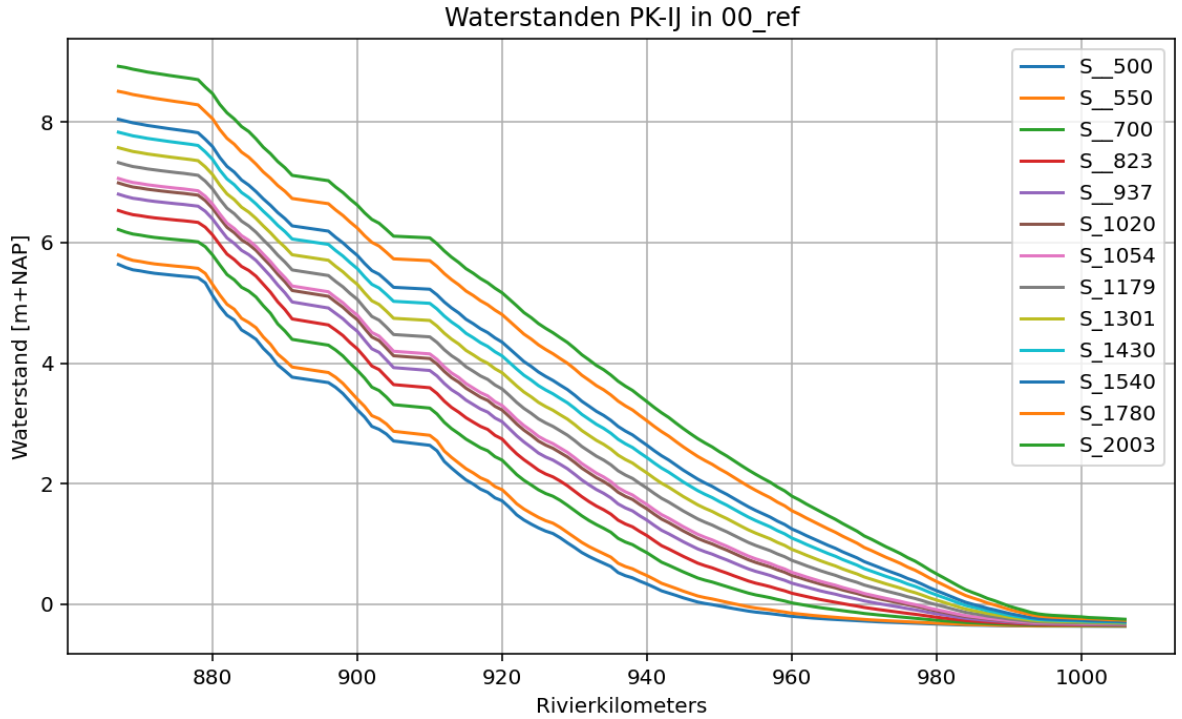
Figuur 2.2: Afvoeren in de referentiesituatie als functie van de afvoer bij Lobith



Figuur 2.3: Procentuele afvoerverdeling in de referentiesituatie als functie van de afvoer bij Lobith

In de langsprofielen van de waterstanden langs de rivieras (Figuur 2.4) valt vooral het grote verschil in verhang tussen het Pannerdensch Kanaal en de (Boven-)IJssel op. Langs het Pannerdensch Kanaal is het verhang relatief flauw, terwijl deze op de IJssel (vanaf rkm 878) veel steiler is.





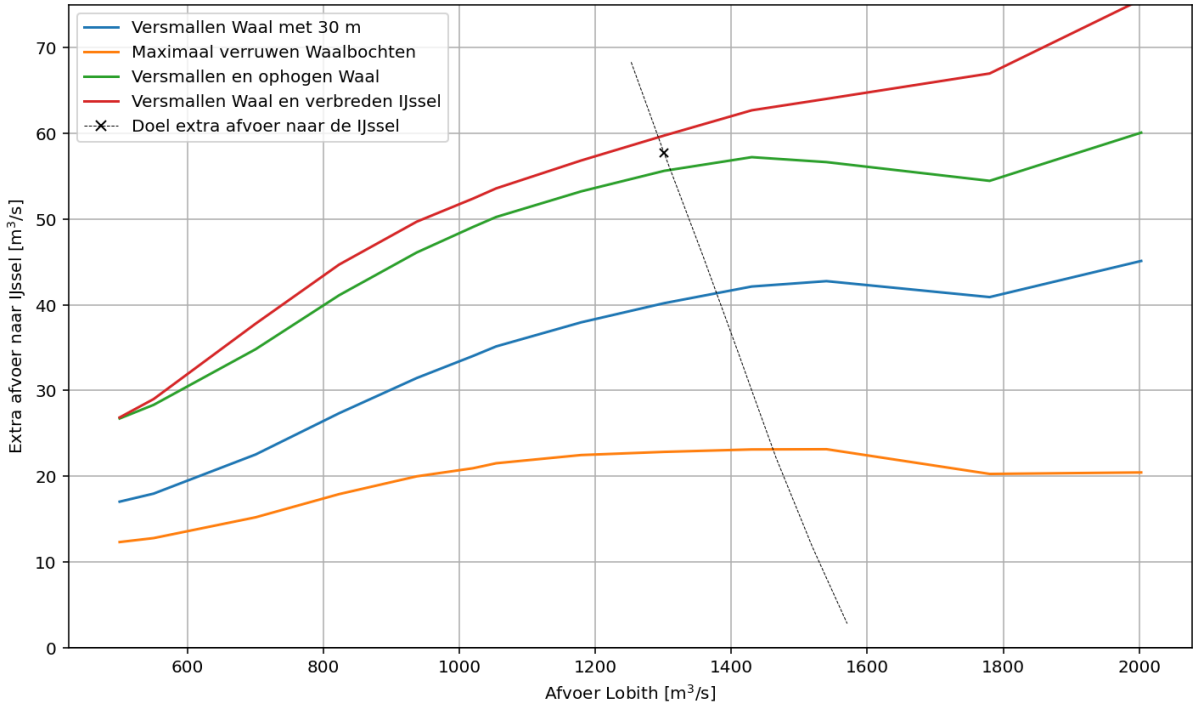
Figuur 2.4: Langsprofielen in de waterstanden langs de Waal (boven) en het Pannerdensch Kanaal – IJssel voor de 13 afvoerniveaus in de referentiesituatie. Het steile verloop rond rivierkilometer 883 in de Waal vindt plaats bij de vaste laag van Nijmegen. De vlak lopende delen van de lijnen in het onderste figuur bij rivierkilometers 891-896 en 905-910 zijn de bochtafsnijdingen in de Boven-IJssel. Hier verspringt de kilometrering plots, waar in het figuur niet voor is gecorrigeerd.

3 Effectiviteitsanalyse basismaatregelen

Voor vier maatregelen is de effectiviteit op de verandering van de afvoerverdeling onderzocht:

1. Versmalling van de Waal met 30 m over een lengte van 50 km
2. Versmalling van de Waal met 30 m in combinatie met een ophoging van de Waalbodem met 20 cm, beide over een lengte van 50 km
3. Versmalling van de Waal met 30 m over een lengte van 50 km in combinatie met een verbreding van de Boven-IJssel met 15 m over een lengte van 10 km
4. Verruwing van de buitenbochten van de Boven-Waal

In Figuur 3.1 zijn de effecten van de maatregelen samengevat. In Bijlage D zijn de resultaten ook in tabelvorm gepresenteerd. De resultaten tonen aan dat een combinatie van maatregelen nodig is om de doelstelling van 285 m^3/s naar de IJssel bij een Lobithafvoer van 1300 m^3/s te halen. Dit relateren we aan het afvoerverschil van 57 m^3/s dat nodig is om 285 m^3/s om in de vereffende afvoerverdeling van 2024 aan de minimale IJsselafvoer te komen (Bijlage A). Deze doelstelling is weergegeven met het kruisje. De zwarte stippellijn geeft bij een gegeven Lobith-afvoer aan hoeveel extra afvoer naar de IJssel nodig is om aan de minimale afvoer van 285 m^3/s naar de IJssel te voldoen.



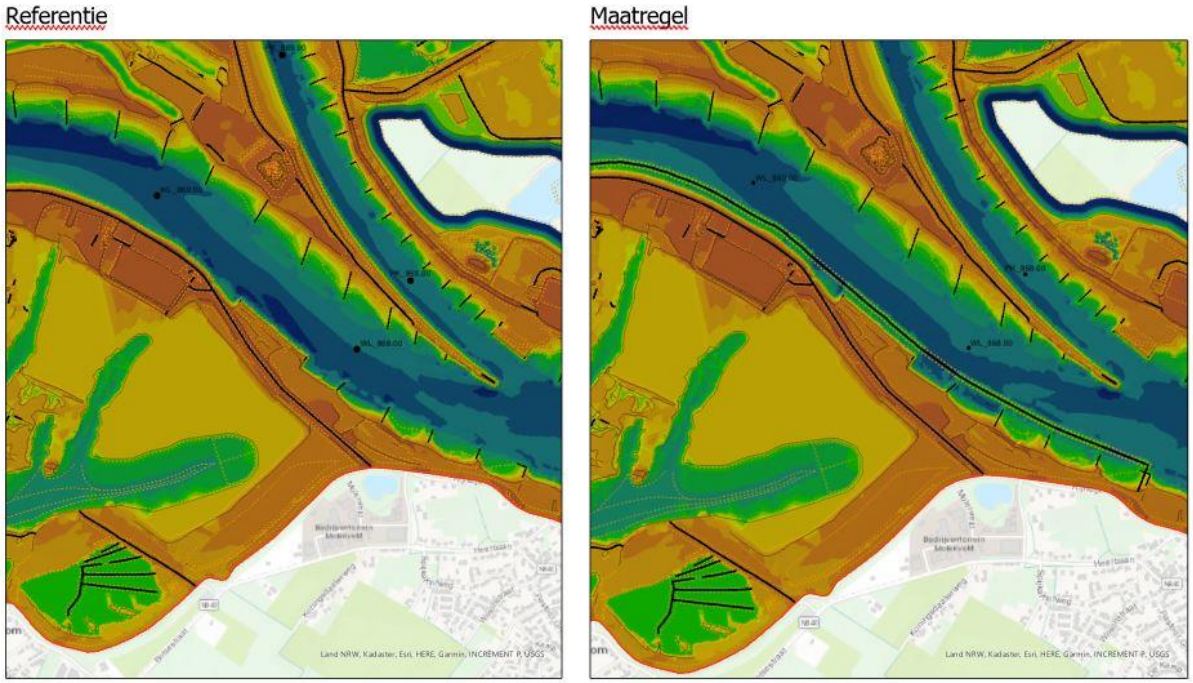
Figuur 3.1: Samenvatting van de effectiviteit van de maatregelen ten aanzien van laagwater afvoerverdeling. Het figuur toont de extra afvoer naar de IJssel ten opzichte van de referentiesituatie met het doel van 57 m^3/s extra naar de IJssel bij een afvoer bij Lobith van 1300 m^3/s.

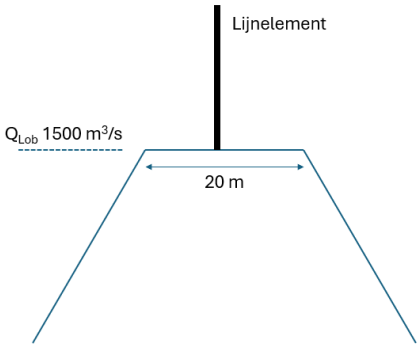
In de volgende vier paragrafen worden de maatregelen en de effecten ervan in meer detail beschreven. In Bijlage C is beschreven hoe de maatregelen zijn geschematiseerd.

3.1 Versmalling van de Waal met 30 meter

3.1.1 Beschrijving maatregel

Een van de meest effectieve maatregelen is een versmalling van het doorstroomprofiel van de Waal (Asselman et al., 2025). Een versmalling stuwt het water op richting het splitsingspunt waardoor meer afvoer naar het Pannerdensch Kanaal wordt gestuwd. Hoe groter de versmalling, hoe dichterbij het splitsingspunt en hoe langer de afstand waarover de versmalling wordt toegepast, hoe groter het effect op de afvoerverdeling is. We onderzoeken een versmalling van de Waal met 30 meter over een lengte van ca. 50 km startend op het splitsingspunt (Figuur 3.2). De versmalling wordt gerealiseerd door het aanbrengen van langsdammen (Bijlage C.1) en sluiten benedenstrooms aan op de bestaande langsdammen. Deze komen aan een kant van de rivier te liggen op 30 m van de huidige kribkoppen (en daarmee de rand van het zomerbed). De langsdammen worden volledig afgesloten zodat er bij de beschouwde afvoeren geen stroming achter de langsdam plaatsvindt. Dit geeft de maximale potentie van de maatregel. Ten behoeve van andere doeleinden (bijv. bodemligging en ecologie) kunnen andere ontwerpkeuzes worden gemaakt.

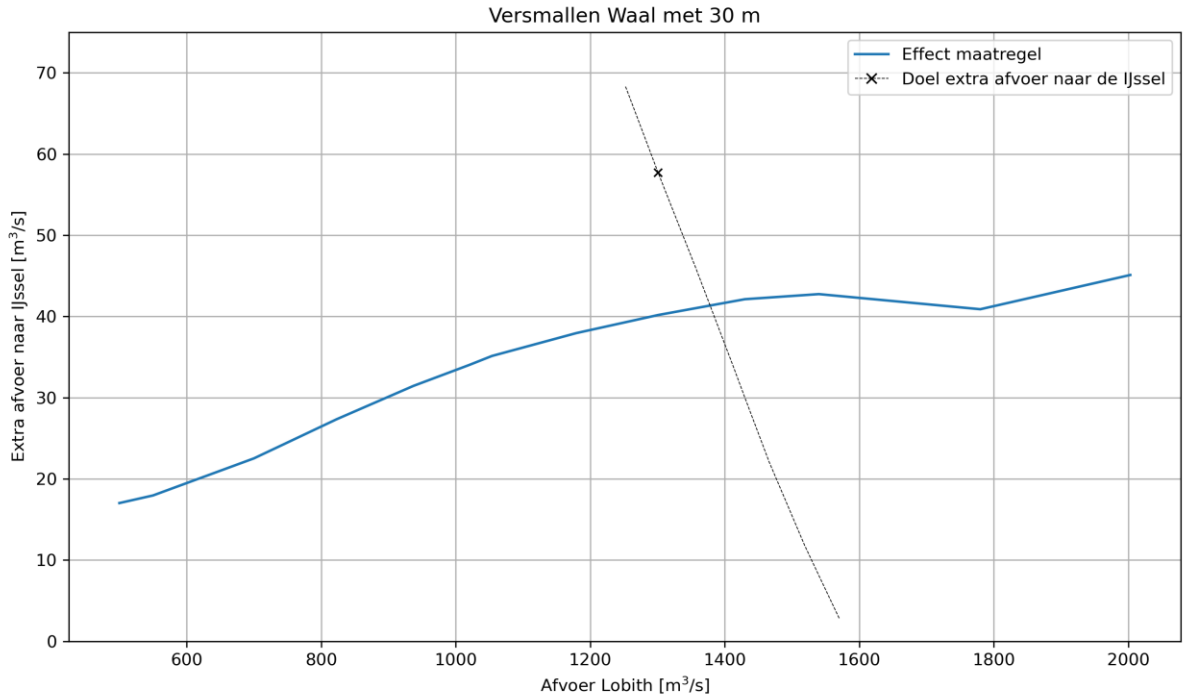




Figuur 3.2: Boven: Aangebrachte langsdammen (zwarte lijn) bij de Pannerdense Kop. Onder: dwarsdoorsnede langsdamschematisatie welke overeenkomt met die van de bestaande langsdammen

3.1.2 Resultaten

De beschouwde versmalling van de Waal levert tussen de 18 en 45 m³/s extra afvoer naar de IJssel op (Figuur 3.3). Voor afvoeren bij Lobith van ca. 1360 m³/s en hoger wordt de gewenste IJsselafvoer van minimaal 285 m³/s gerealiseerd (was 1590 m³/s in de referentiesituatie). Het effect is sterk afvoerafhankelijk. Met toenemende afvoer neemt ook de extra afvoer naar de IJssel toe. De knik in het rechterfiguur van Figuur 3.3 rond 1800 m³/s wordt verklaard uit de schematisatie van de langsdammen. Deze zitten tot een afvoer van 1500 m³/s bij Lobith ook in de rivierbodem en niet enkel als lijnelement (Figuur 3.2; onder). Hierdoor is de versmalling bij afvoeren lager dan 1500 m³/s groter dan 30 m.

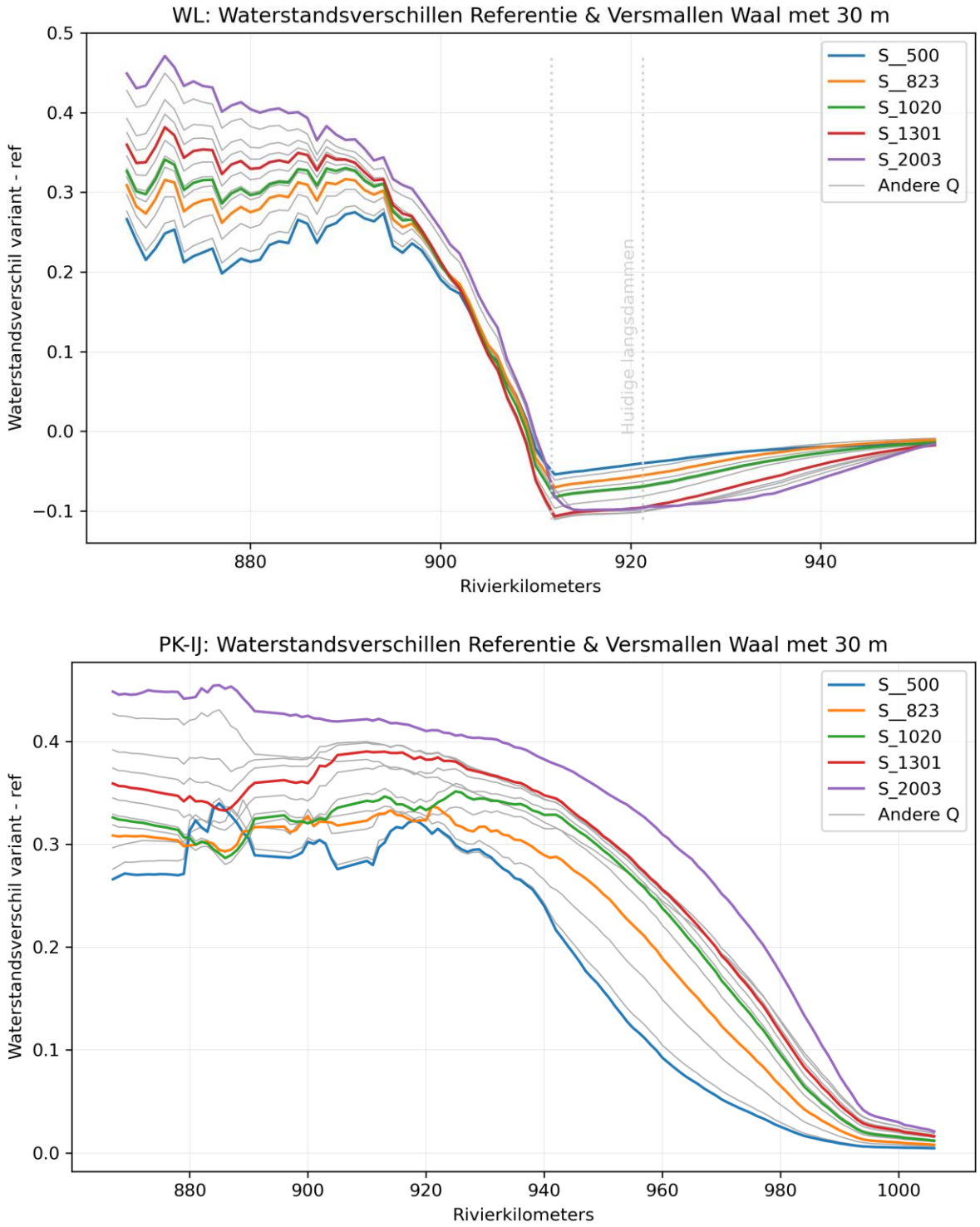


Figuur 3.3: Effect van een versmalling van de Waal op de afvoer naar de IJssel als functie van Lobithafvoer.

Langs de Waal nemen de waterstanden toe op het traject van de versmalling (Figuur 3.4) met orde 20 á 40 cm (met gewijzigde afvoerverdeling). Direct benedenstrooms daarvan nemen de waterstanden af met orde 5 á 10 cm door de afname van de afvoer door de Waal. In het laatste

deel van de versmalling (~5 km) nemen de waterstanden ook af. Richting de benedenstroomse rand van het model wordt het waterstandsverschil steeds kleiner aangezien de waterstand in benedenstroomse richting minder gevoelig wordt voor de afvoer. Dit volgt uit de waterstand-afvoerrelaties die bij de benedenrand is opgelegd. Het waterstandseffect is het grootst voor de hoogste afvoeren. De kanttekening daarbij is dat in werkelijkheid/bij realistische schematisatie bij de hogere afvoerniveaus de oevergeulen gaan meestromen waardoor het waterstandseffect kleiner is (zie later in paragraaf 4.4.1).

Langs het Pannerdensch Kanaal en de IJssel zien we de waterstanden met orde 30 á 45 cm toenemen door de toename van de afvoer. Sprongen en dalen in de langsprofielen kunnen verklaard worden uit lokale verschillen in de bodemgeometrie, bijvoorbeeld het grote waterstandsverschil bij 'S__500' kan verklaard worden uit de ondiepe binnenbocht tegenover de Steegse Haven die bij de allerlaagste afvoeren nog niet meestroomt en vanaf het afvoerniveau 'S__823' wel.



Figuur 3.4: Waterstandsverschillen ten opzichte van de referentiesituatie langs de Waal (boven) en het traject Pannerdensch Kanaal – IJssel.

3.2 Versmalling van de Waal met 30 meter en een verhoging van de Waalbodem met 20 centimeter

3.2.1 Beschrijving maatregel

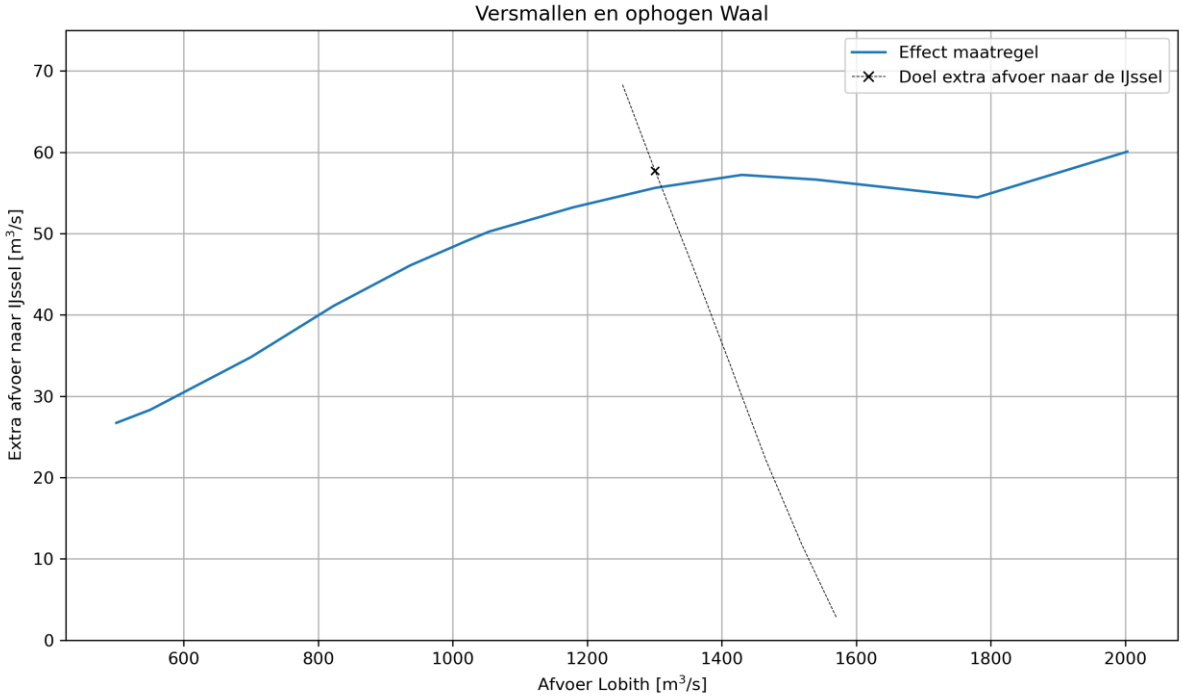
In deze maatregel wordt de versmalling van de Waal gecombineerd met een verhoging van de bodem van de Waal. Deze verhoging van de Waalbodem vindt ook plaats over een afstand van 50 km.



Figuur 3.5: Traject waarop de verhoging van de Waalbodem wordt toegepast.

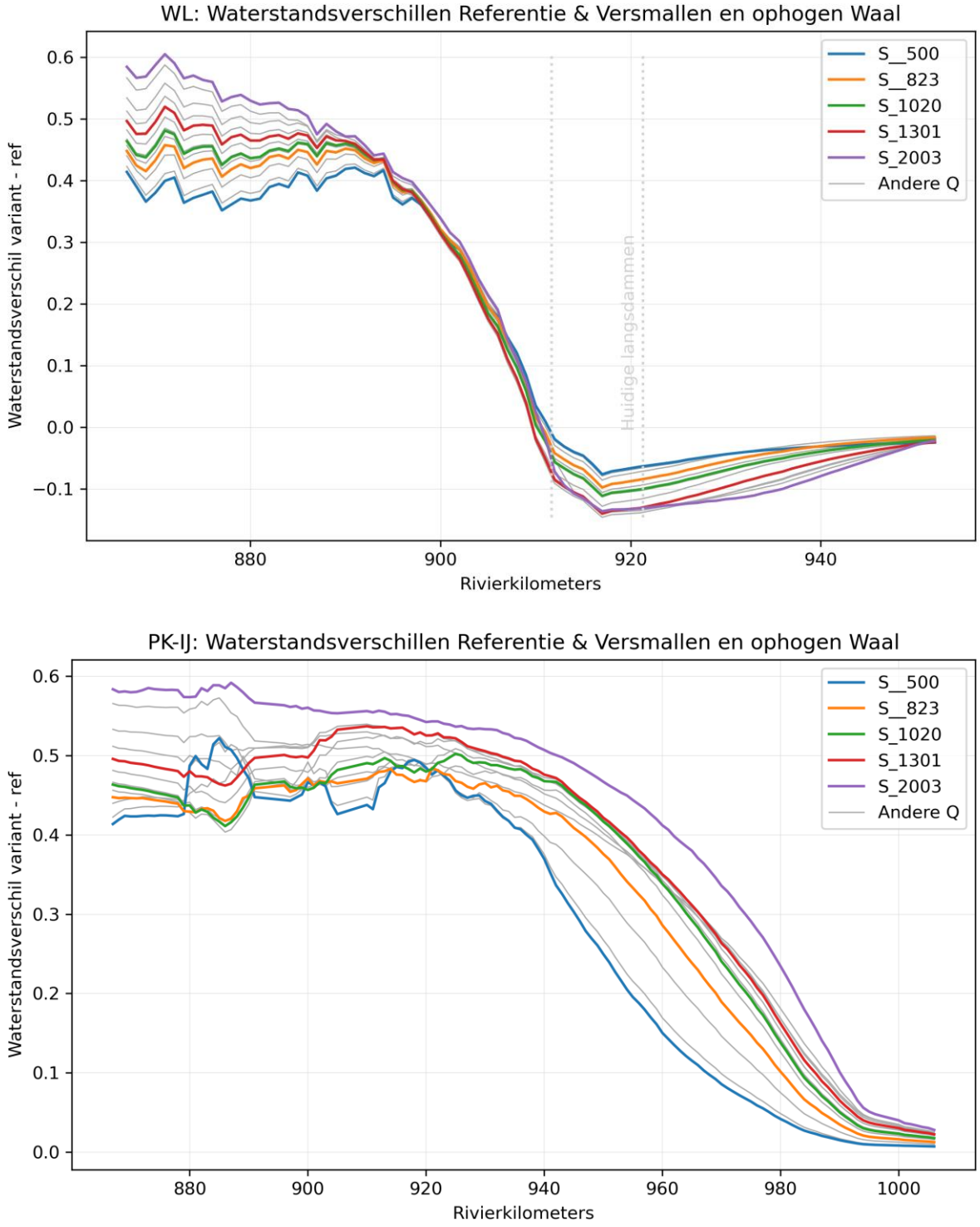
3.2.2 Resultaten

De beschouwde versmalling van de Waal in combinatie met de ophoging van de bodem van de Waal levert tussen de 28 en 60 m^3/s extra afvoer naar de IJssel op (Figuur 3.6). Het betreft 3 á 5% van de Lobithafvoer. Het effect is afvoerafhankelijk, vergelijkbaar met de maatregel met enkel de versmalling van de Waal. Naar verwachting is het effect van de ophoging van de bodem alleen minder afvoerafhankelijk (zie ook Asselman et al., 2025). Vanaf een afvoer van ca. 1310 m^3/s bij Lobith kan de extra afvoer gerealiseerd worden om tot de gewenste IJsselafvoer van 285 m^3/s te komen (ten opzichte van 1590 m^3/s in de huidige situatie).



Figuur 3.6: Effect van een versmalling van de Waal en verhoging van de Waalbodem op de afvoer naar de IJssel als functie van Lobithafvoer.

Langs de Waal nemen de waterstanden toe op het bovenstroomse traject van de versmalling en ophoging (Figuur 3.7) met orde 40 á 60 cm. Dit neemt in een verhanglijn af tot een verlaging van de waterstanden met orde 10 cm benedenstrooms van de versmalling en ophoging. Langs de IJssel nemen de waterstanden sterk toe met orde 40 á 60 cm door de grote toename van de IJsselafvoer.

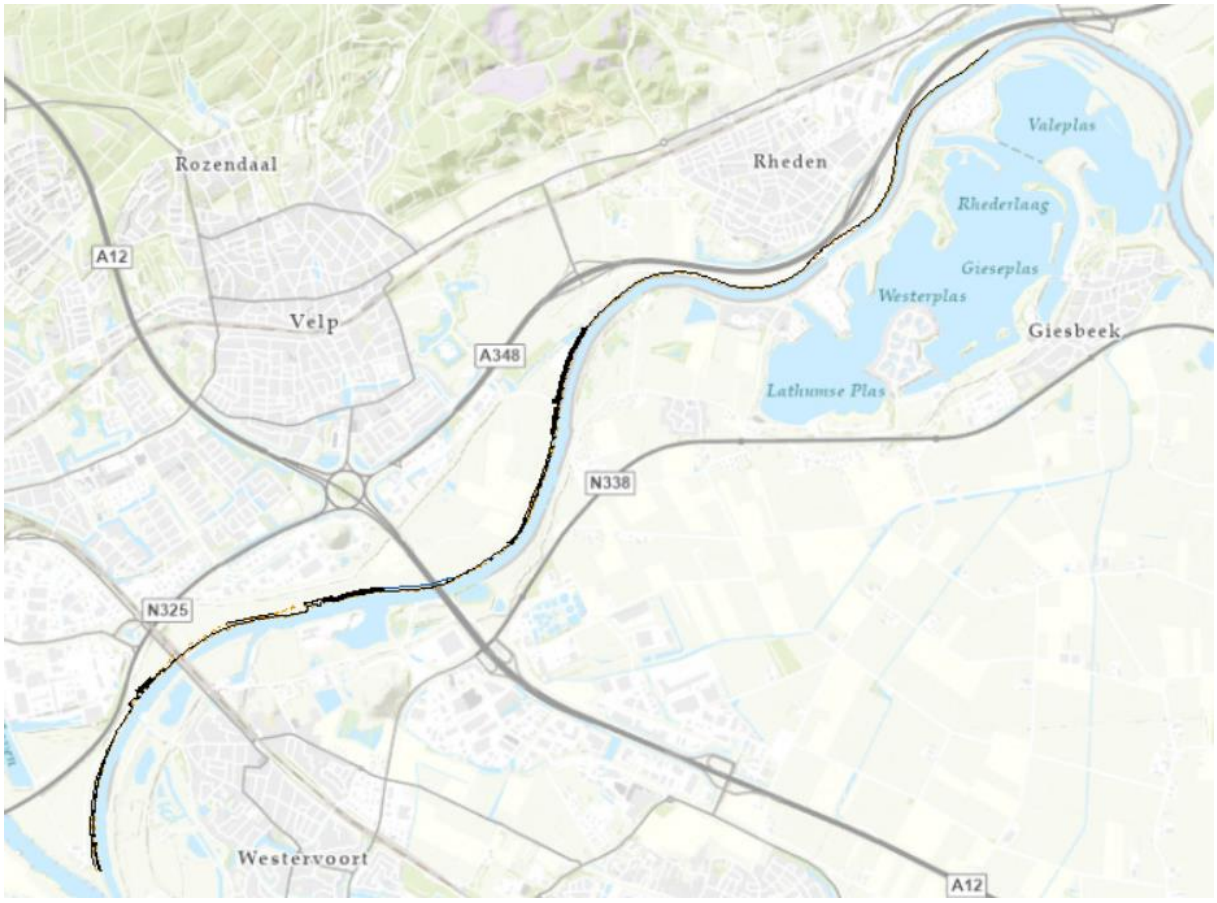


Figuur 3.7: Waterstandsverschillen ten opzichte van de referentiesituatie langs de Waal (boven) en het traject Pannerdensch Kanaal – IJssel.

3.3 Versmalling van de Waal met 30 meter en een verbreding van de (Boven-)IJssel met 15 meter

3.3.1 Beschrijving maatregel

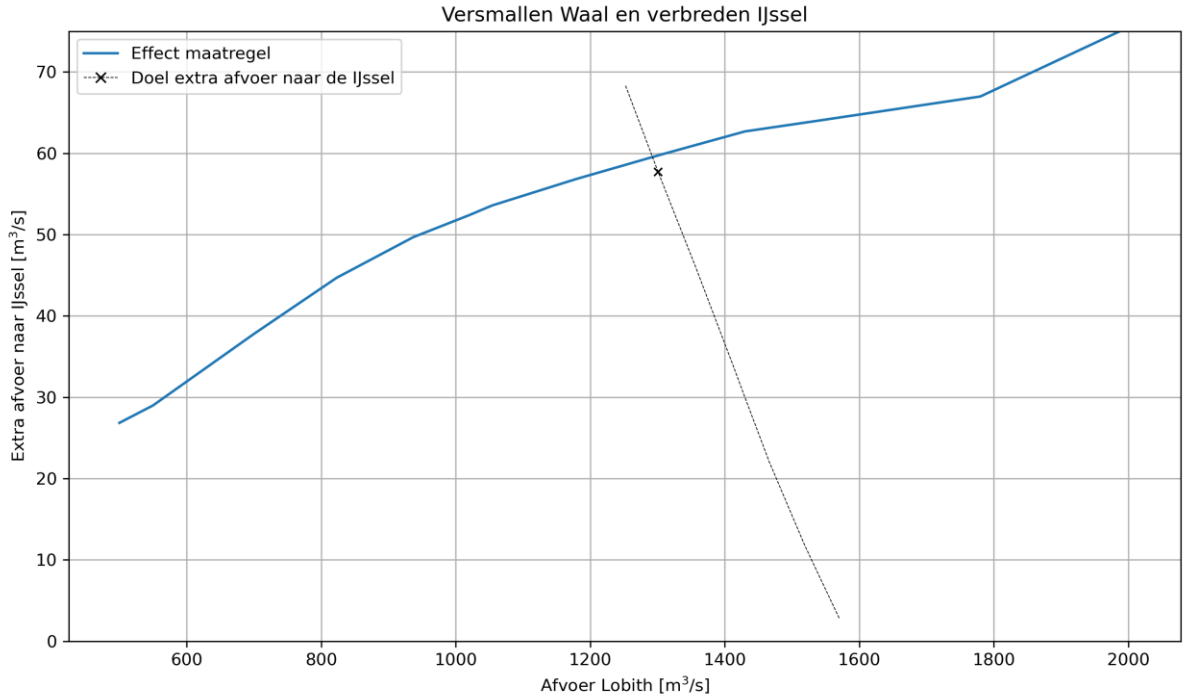
Voor deze maatregel combineren we de versmalling van de Waal (paragraaf 3.1) met een verbreding van de IJssel met 15 m. Deze verbreding wordt toegepast over een lengte van 10 km tot rivierkilometer 890 (Figuur 3.8). De verbreding van de IJssel betreft een volledige verplaatsing van de linkeroever met bijvoorbeeld verplaatste kribben landinwaarts (zie Bijlage C). In het verbrede deel ligt de bodemhoogte op het gemiddelde niveau van het zomerbed nabij de linkeroever.



Figuur 3.8: Traject waarover de IJssel is verbreed.

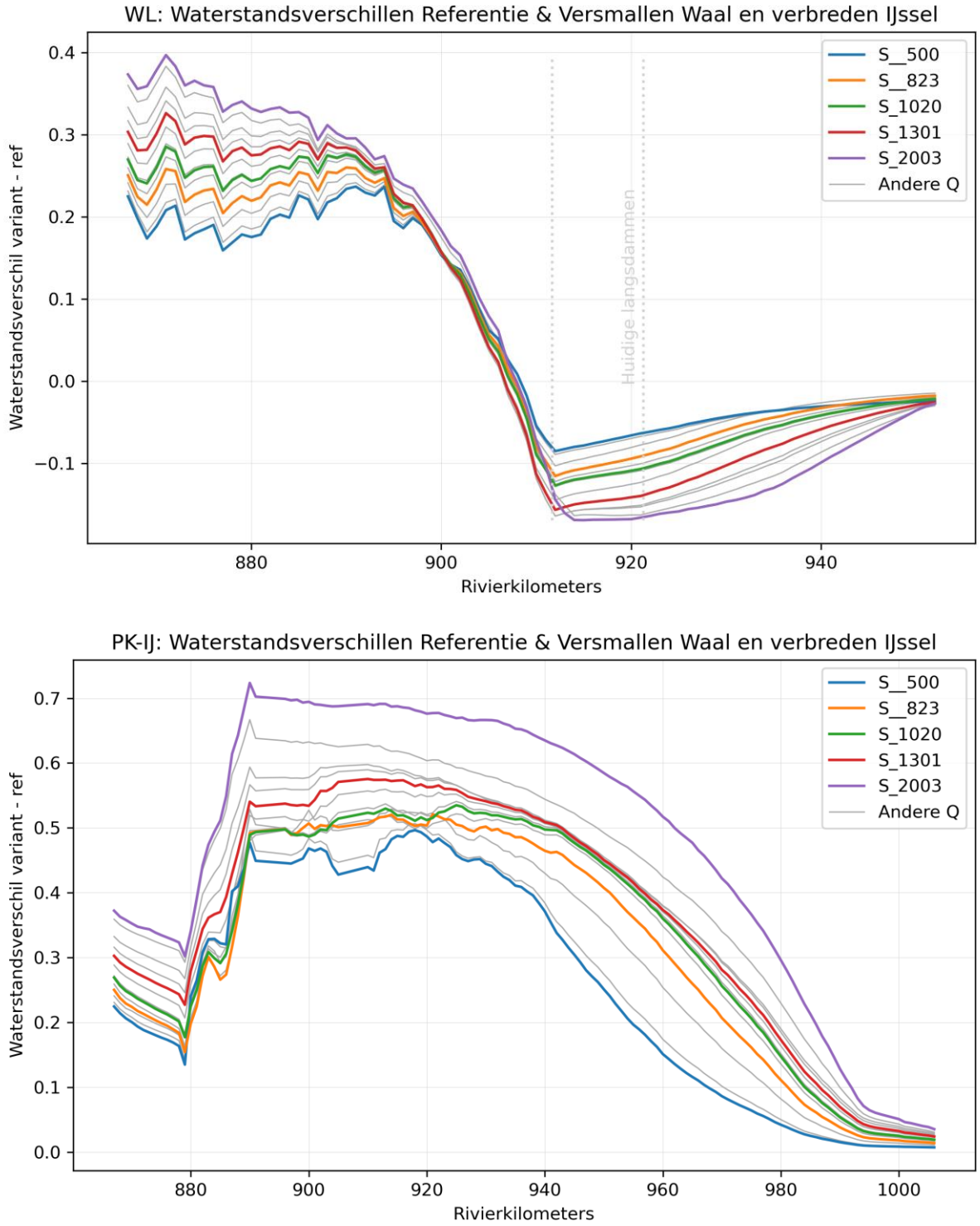
3.3.2 Resultaten

De beschouwde versmalling van de Waal in combinatie met de verbreding van de Boven-IJssel levert tussen de 29 en 76 m^3/s extra afvoer naar de IJssel op (Figuur 3.9). Het betreft ca. 5% van de Lobithafvoer. Het effect is sterk afvoerafhankelijk, wat dus zowel geldt voor de versmalling van de Waal en de verbreding van de IJssel. Vanaf een afvoer van ca. 1290 m^3/s bij Lobith kan de extra afvoer gerealiseerd worden om tot de gewenste IJsselafvoer van 285 m^3/s te komen (ten opzichte van 1590 m^3/s in de huidige situatie).



Figuur 3.9: Effect van een versmalling van de Waal en een verbreding van de IJssel op de afvoer naar de IJssel als functie van Lobithafvoer.

Langs de Waal nemen de waterstanden toe op het traject van de versmalling (Figuur 3.10) met orde 20 á 35 cm. Dit is iets minder dan wanneer enkel de Waal wordt versmald. Het verschil wordt veroorzaakt door de extra afname van de Waalafvoer. Direct benedenstrooms van de versmalling nemen de waterstanden af met orde 8 á 15 cm door de afname van de afvoer door de Waal. Benedenstrooms van het verbrede deel van de IJssel (na rkm 889) nemen de waterstanden sterk toe met orde 50 á 70 cm door de grote toename van de IJsselafvoer. Op het traject van de verbreding zien we via een verhanglijn het waterstandsverschil in bovenstroomse richting met de referentie sterk afnemen. Dit werkt ook door op het Pannerdensch Kanaal. Het verschil in waterstandsverhang tussen het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel neemt als gevolg van de maatregelen duidelijk af.



Figuur 3.10: Waterstandsverschillen ten opzichte van de referentiesituatie langs de Waal (boven) en het traject Pannerdensch Kanaal – IJssel.

3.4 Verruwing van de buitenbochten van de Waal

3.4.1 Beschrijving maatregel

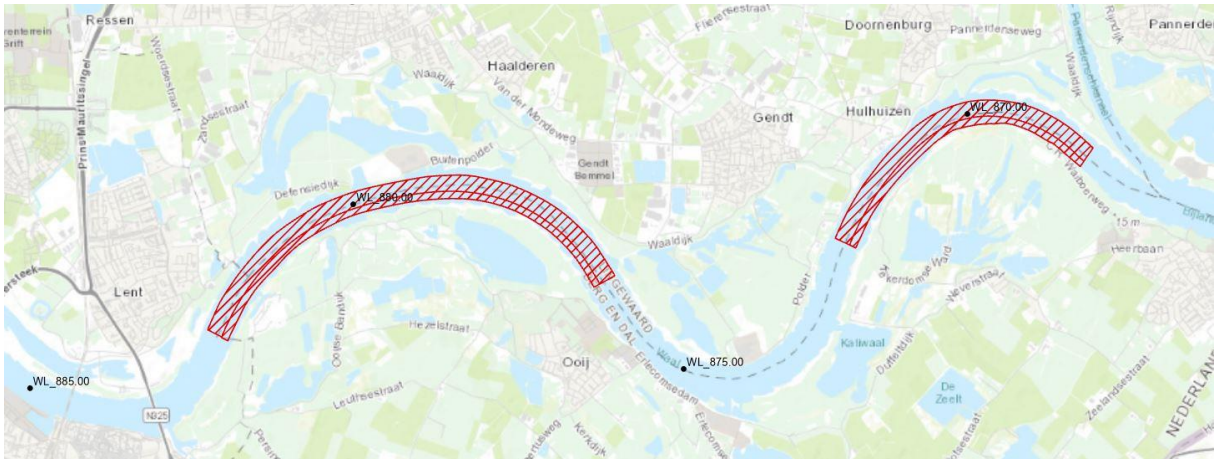
De verruwing van (een deel van) de Waalbochten creëert opstuwing en daarmee meer afvoer richting het Pannerdensch Kanaal. De haalbaarheid en wenselijkheid van deze maatregel is niet bekend, maar in dit onderzoek verkennen we of de maatregel effectief kan zijn bovenop andere maatregelen om de afvoerverdeling te beïnvloeden. De verruwing is voor te stellen als een zeer grove suppletie / vaste laag. We beschouwen enkel de verruwing en niet de verandering van de bodemhoogte.

We kunnen niet inschatten welke exacte ruwheidswaarde realistisch is voor verruwing van de Waalbochten. Daarom zoeken we naar een bandbreedte van een semi-realistische verhoging van de ruwheid. Hiervoor kijken we naar de ruwheid van al bestaande speciale trajecten in de Waal en wat daar als ruwheidswaarde wordt aangehouden (Sieben, 2014).

Voor de bovengrens van de verruwing nemen we de ruwheidsschematisatie van de bodemkribben bij Erlecom (één van de Waalbochten) over. Over een 2/3^{e} breedte van de hoofdgeul van de andere Waalbochten verhogen we de basisruwheidswaarde[1] van n = 0,055 s/m$^{1/3}$ naar k=0,68 m^{2}. Als gevolg van de verruwing van een buitenbocht neemt de bodemdynamiek en daarmee de amplitude van de bodemvormen toe in de binnenbochten. Dit zorgt daarmee ook voor een verhoging van de ruwheid. Voor de overige 1/3^{e} breedte van de hoofdgeul verhogen we de basisruwheidswaarde van 0,055 s/m$^{1/3}$ naar 0,070 s/m$^{1/3}$, overeenkomend met de waarden bij Erlecom.

Voor de ondergrens van de verruwing nemen we de ruwheidswaarden van de vaste laag bij St. Andries over, namelijk k=0,34 m. Van de drie trajecten met een afwijkende ruwheid (Erlecom, Nijmegen, St. Andries) heeft het traject St. Andries de laagste ruwheidswaarde. De ruwheid van de binnenbocht houden we op de oorspronkelijke waarde en houden daarmee geen rekening met een toename van de bodemdynamiek. De vlakken waarover we de verruwing toepassen houden we gelijk, dus zoals weergegeven in Figuur 3.11.

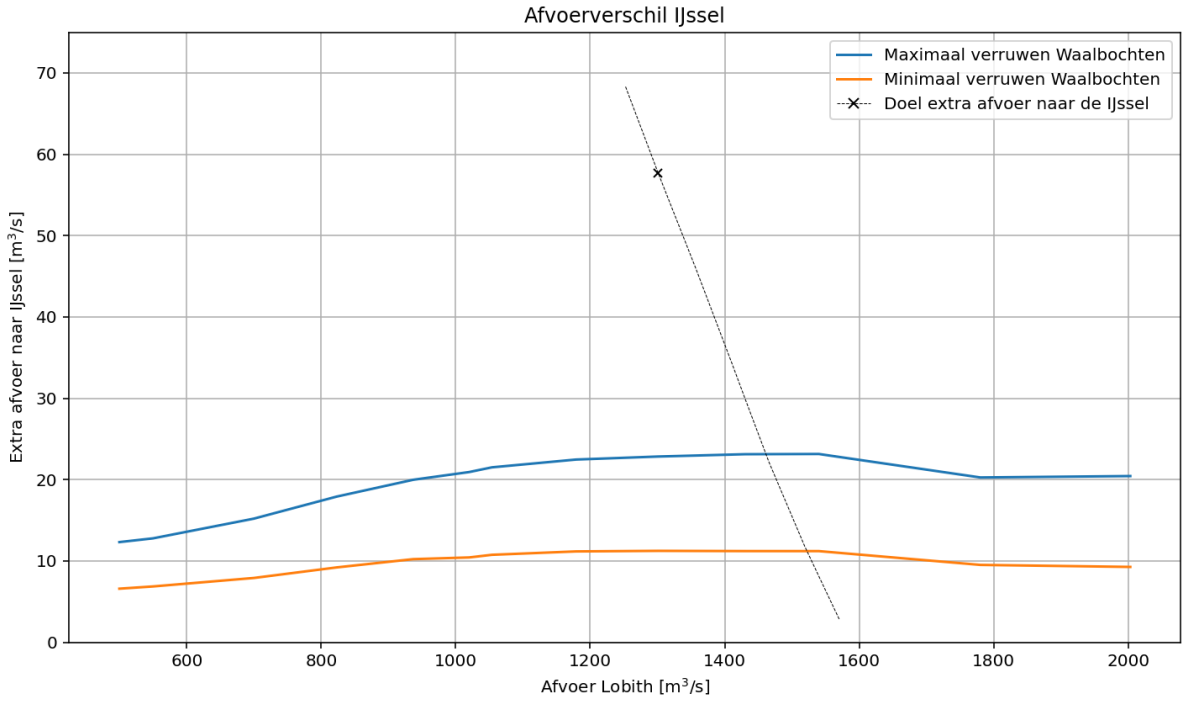
[1] De ruwheid in het model worden bepaald door de basisruwheidswaarden die vermenigvuldigd worden door een kalibratiefactor. Deze kalibratiefactor is afvoerafhankelijk.
[2] Omgerekend naar een Chézy-waarde bij een afvoer van 1300 m^{3}/s bij Lobith geeft dit een verlaging van de Chézy-waarde van ca. 50 m$^{1/2}$/s naar ca. 30 m$^{1/2}$/s



Figuur 3.11: Trajecten waarop de buitenbocht is verruwd. De verruwing wordt toegepast op 2/3e van de breedte van het zomerbed.

3.4.2 Resultaten

De verruwing van de Waal levert maximaal 23 m^3/s extra afvoer naar de IJssel op (Figuur 3.12). Bij een minimale verruwing gaat er maximaal 11 m^3/s extra afvoer naar de IJssel. Het effect is matig afvoerafhankelijk. Deze resultaten tonen aan dat een lokale verruwing mogelijk ingezet kan worden als extra maatregel om extra afvoer naar de IJssel te stuwen. Voor de varianten 'maximaal' en 'minimaal verruwen' kan respectievelijk vanaf een Lobithafvoer van ca. 1460 en 1520 m^3/s de extra afvoer gerealiseerd worden om tot de gewenste IJsselafvoer van 285 m^3/s te komen (ten opzichte van 1590 m^3/s in de huidige situatie).

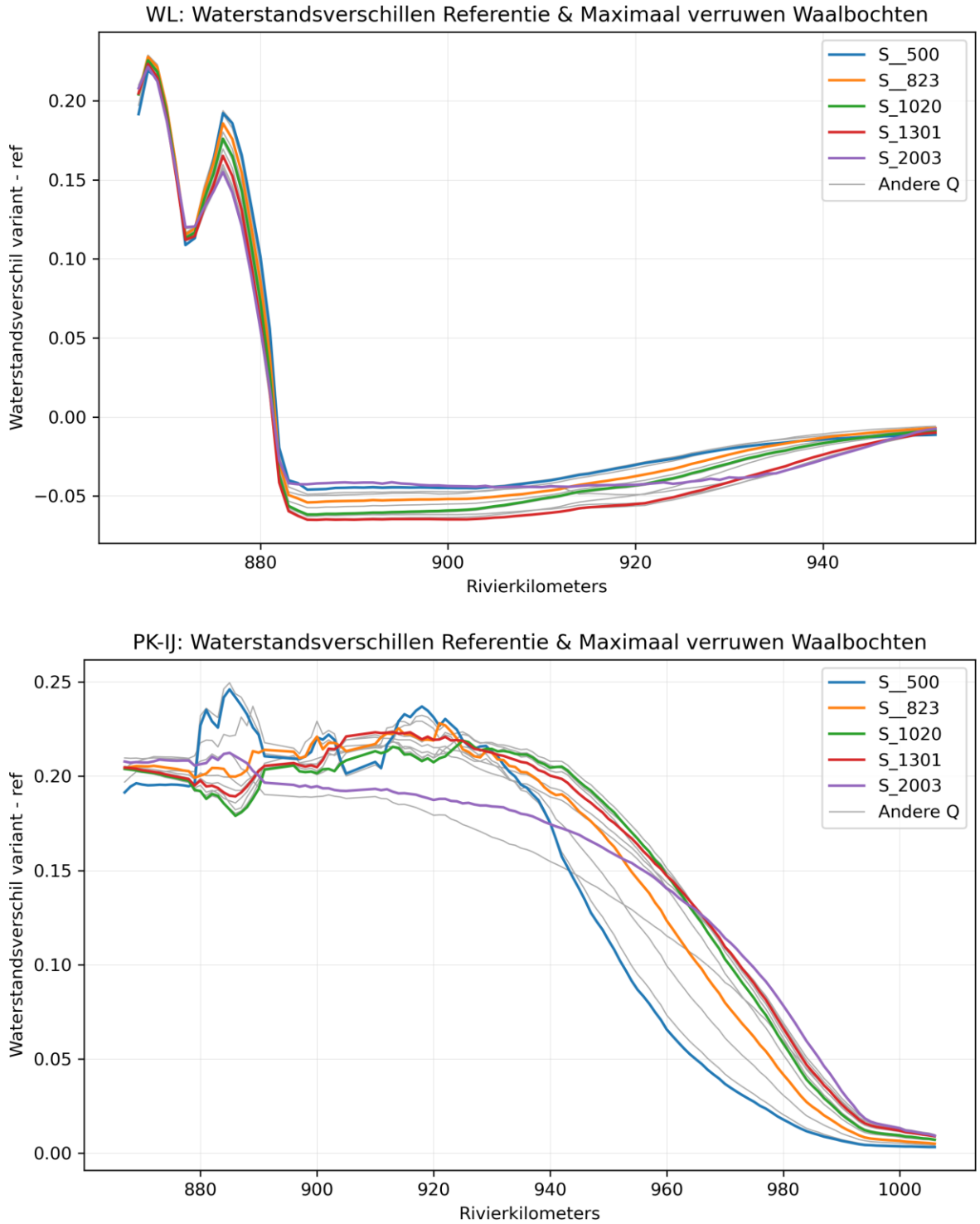


Figuur 3.12: Effect van een verruwing van de Waalbochten op de afvoer naar de IJssel als functie van Lobithafvoer.

Langs de Waal nemen de waterstanden toe op het traject van de maximale verruwing (Figuur 3.13) met duidelijke stuwkrommes rondom de verruwingen. Op de Pannerdense Kop is de waterstandsverhoging 20 cm. Benedenstrooms van de verruwingen nemen de waterstanden orde 4

á 6 cm af als gevolg van de afgenomen Waalafvoer. Het effect van de verruwing op de waterstanden is nagenoeg afvoeronafhankelijk. Deze afvoeronafhankelijkheid komt overeen met de bevindingen van Gensen et al. (2020), waarin is laten zien dat het effect van verruwing op de waterstanden over het gehele afvoerbereik (ook zeer hoge afvoeren) vrijwel afvoeronafhankelijk is. Ook laat Gensen et al. (2020) zien dat daarmee het effect op de afvoerverdeling vrijwel afvoeronafhankelijk is. Langs het Pannerdensch Kanaal en de IJssel nemen de waterstanden orde 20 cm toe. Bij de variant met minimale verruwing halveren de waterstandseffecten ongeveer (niet getoond). De afwijkende waterstandsverschillijnen bij 'S_2003' (en 'S_1780' in grijs) komen omdat bij gestrekte oevers in de Midden-IJssel er een extra rekencel in het dwarsprofiel gaat meestromen. Dit zorgt ervoor dat de waterstand minder sterk reageert op een afvoertoename.

Een belangrijke kanttekening bij deze resultaten is dat het aanpassen van de ruwheid de morfologische ontwikkeling van de rivierbodem sterk beïnvloedt en dat het effect van het verruwen uitdempt in de tijd. Om een blijvend effect te sorteren, is onderhoud nodig.



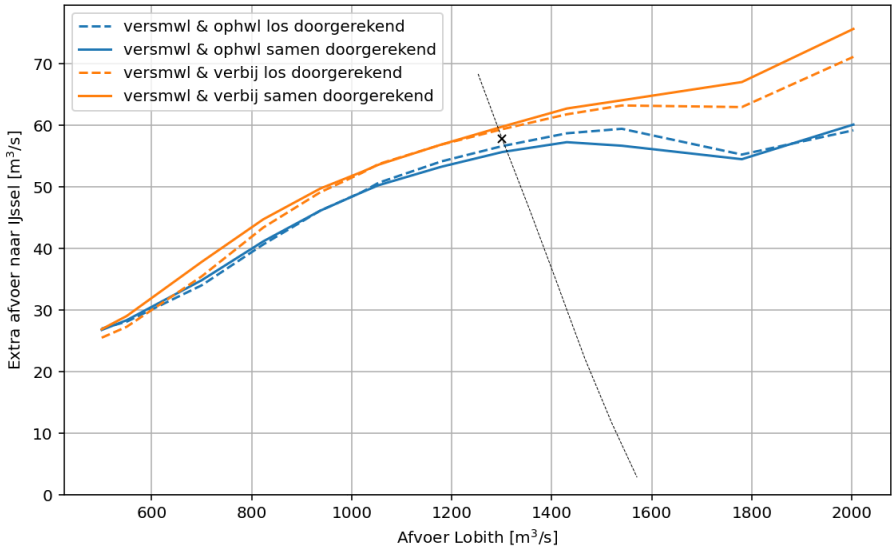
Figuur 3.13: Waterstandsverschillen ten opzichte van de referentiesituatie langs de Waal (boven) en het traject Pannerdensch Kanaal – IJssel.

4 Aanvullende analyses effectiviteit maatregelen

Om de effectiviteit van de basismaatregelen beter te kunnen doorgronden en op waarde te kunnen schatten, voeren we aanvullende analyses uit. In paragraaf 4.1 kijken we in welke mate de effecten van individuele maatregelen optelbaar zijn. In paragraaf 4.2 maken we een vergelijking met de resultaten uit de 1D berekeningen van Asselman et al. (2025). In paragraaf 4.3 toetsen we de gevoeligheid van de resultaten ten aanzien van de gemaakte modelleerkeuzes. In paragraaf 4.4 toetsen we in welke mate keuzes over de schematisatie van de basismaatregelen de resultaten beïnvloeden. Ten slotte voeren we in paragraaf 4.5 een effectiviteitsanalyse uit naar het meer water door de Nederrijn-Lek laten stromen, wat kan helpen in het kader van situationeel sturen. In tijden dat de verzilting in de Rijn-Maasmonding te hoog wordt, en er nog marge is in het peil van het IJsselmeer, kan er extra afvoer door de Nederrijn-Lek worden gelaten door stuw Driel verder open te zetten.

4.1 Optelbaarheid losse maatregelen in maatregelpakketten

De basismaatregelen bevatten twee pakketten waarin maatregelen gecombineerd worden: het versmallen van de Waal in combinatie met het ophogen van de Waal (paragraaf 3.2) en in combinatie met het verbreden van de Boven-IJssel (paragraaf 3.3). Om te weten te komen of de effecten van individuele maatregelen optelbaar zijn en dus hetzelfde resultaat geven als een gelijktijdige doorrekening van dezelfde maatregelen, rekenen we de maatregelen ‘ophogen Waal’ en ‘verbreden IJssel’ ook als losse maatregelen door. Vervolgens tellen we de berekende effecten op bij het effect van het ‘versmallen Waal’ (paragraaf 3.1). Het resultaat van deze optellingen zien we in de gestippelde lijnen in Figuur 4.1. Het figuur laat zien dat het optellen van de individuele effecten niet exact hetzelfde resultaat geeft, maar dat de orde grootte van het effect zeer goed overeenkomt voor alle afvoerniveaus. Op basis van deze constatering kunnen ook de effecten van andere combinaties van maatregelen worden ingeschat zonder dat al deze combinaties doorgerekend hoeven te worden.



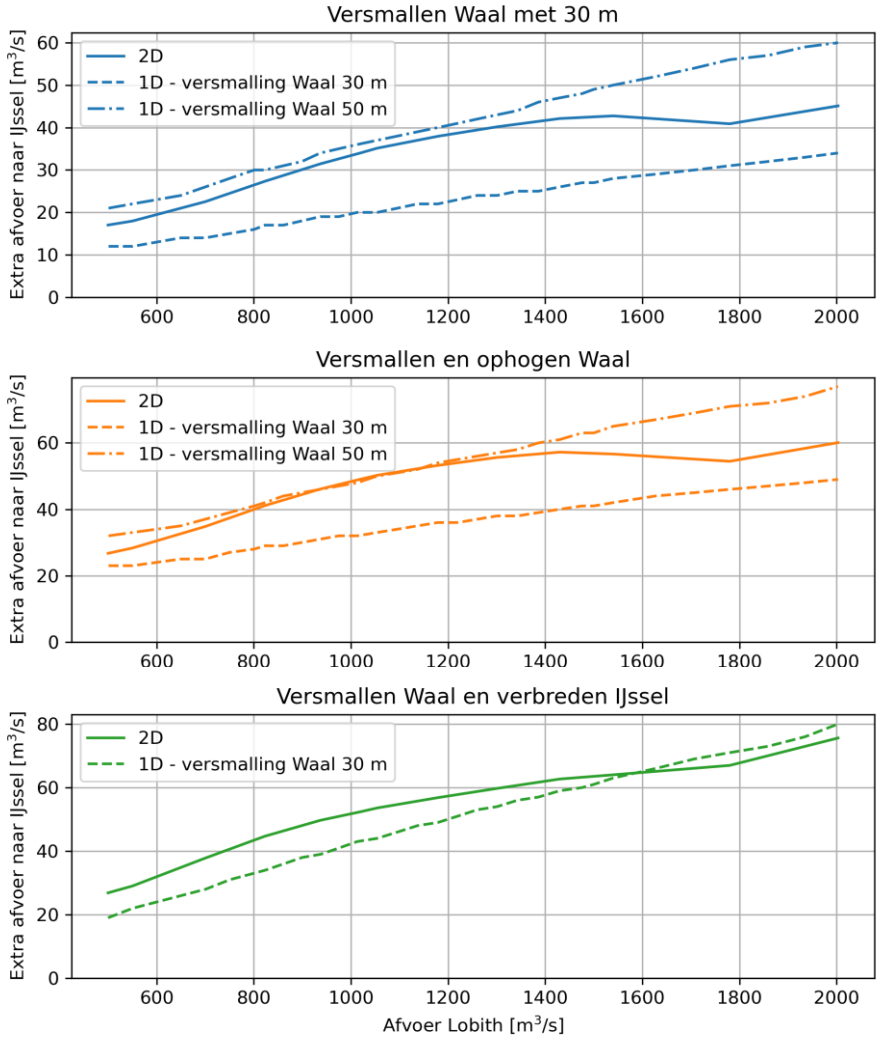
Figuur 4.1: Optelbaarheid van los doorgerekende maatregelen voor de maatregelen versmallen Waal in combinatie met ophogen van de Waalbodem (blauw) en verbreden van de IJssel (oranje).

4.2 Vergelijking met 1D-resultaten

Figuur 4.2 vergelijkt de verkregen 2D resultaten met de 1D resultaten uit Asselman et al. (2025). Voor de 1D resultaten tonen we zowel de versmalling met 30 m en 50 m omdat we zien dat bij de projectie op het 2D rekenrooster de versmalling effectief groter blijkt dan 30 m.

De effectiviteit van alle maatregelen komen in orde grootte goed overeen tussen de 1D en 2D resultaten. De afvlakking die we in 2D zien, zien we niet in de 1D resultaten. Dit laat zich verklaren door schematisatieverschillen. In 1D is het hele profiel van de Waal versmald, waardoor de extra afvoer naar de IJssel een lineair verband kent met de Lobithafvoer. In 2D zijn langsdammen geschematiseerd waarbij het deel van de langsdam dat onder de waterstand bij 1500 m^3/s ligt ook in de bodem terugkomt (zie Figuur B.4). Bij afvoeren lager dan 1500 m^3/s is de versmalling daarom effectief ca. 40 m. Bij afvoeren boven de 1500 m^3/s varieert de versmalling tussen 20 en 40 m.

De vergelijkbaarheid van de resultaten in 1D en 2D geeft vertrouwen in beide aanpakken. Een 1D aanpak kan in het vervolg gekozen worden om een groot aantal variaties in dimensionering door te rekenen. Een subset hiervan kan in 2D worden doorgerekend om het effect nauwkeuriger te kunnen bepalen.



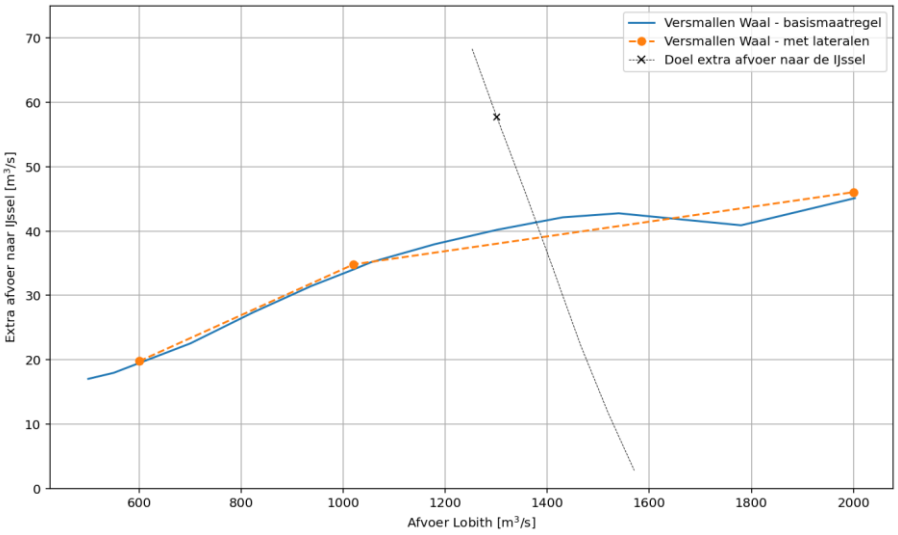
Figuur 4.2: Vergelijking van de 2D resultaten met de 1D resultaten van Asselman et al. (2025) voor drie basismaatregelen. Voor de basismaatregel 'versmallen Waal en verbreden IJssel' is in 1D de IJssel over een lengte van 50 km verbreed, waar dat in deze studie ruim 10 km is. Daarmee zijn deze resultaten niet heel goed vergelijkbaar.

4.3 Keuzes omtrent 2D-modellering

4.3.1 Lateralen

In de methodiek van deze studie hebben we ervoor gekozen om de lateralen (zijdelingse instromen en onttrekkingen van beken, gemalen, etc.) uit te zetten. Deze zorgen voor een discontinue afvoer in lengterichting langs een riviertak en vertroebelen daarmee mogelijk de effecten van de maatregelen. Voor de basismaatregel 'versmallen Waal' testen we de gevoeligheid van de resultaten ten aanzien van de lateralen. De lateralen zijn alleen beschikbaar voor de afvoerniveaus 600, 1020 en 2000 m^3/s. In Figuur 4.3 vergelijken we de effectiviteit van de maatregel 'versmallen Waal' als er wel en niet met lateralen wordt gerekend. Voor de resultaten waarin wél met lateralen is gerekend, is er vergeleken met de referentie waarin ook met lateralen is gerekend. Hierdoor krijgen we inzicht in of de effectiviteit van de maatregel daadwerkelijk beïnvloed wordt door de lateralen. Uit Figuur 4.3 blijkt dat de lateralen nauwelijks de effectiviteit van de maatregel

beïnvloeden; de extra afvoer naar de IJssel wordt nauwelijks meer of minder als gevolg van lateralen.



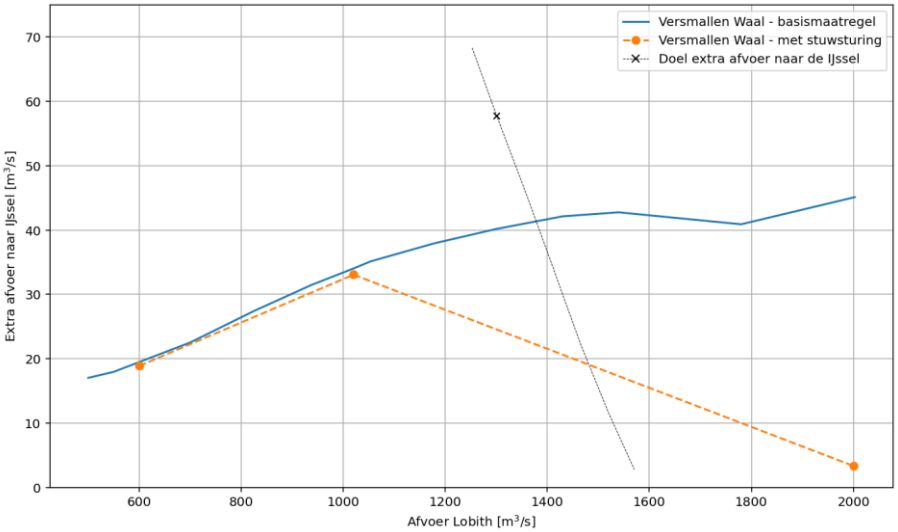
Figuur 4.3: Gevoeligheid van de effectiviteit van de basismaatregel Versmallen Waal ten aanzien van de lateralen.

4.3.2 Stuwsturing Driel

Naast het uitzetten van de lateralen is ook de actieve stuwsturing van Driel uitgeschakeld. In plaats daarvan is een vaste afvoer door de Nederrijn van 30 m^3/s opgelegd. In de praktijk is voor afvoeren onder de ca. 1600 m^3/s bij Lobith de stuw (nagenoeg) volledig gesloten en wordt er gestreefd naar een afvoer door de Nederrijn van minimaal 30 m^3/s. Voor afvoeren boven de 1600 m^3/s opent de stuw geleidelijk en stroomt er meer afvoer door de Nederrijn.

In Figuur 4.4 vergelijken we het effect van de basismaatregel 'versmallen Waal' met het effect van dezelfde maatregel als wel met stuwsturing wordt gerekend (zowel in de referentiesituatie als in de situatie met de maatregel). De kleine verschillen tussen de twee lijnen bij de afvoerniveaus 600 en 1020 m^3/s worden veroorzaakt doordat de afvoer door de Nederrijn in de berekeningen met stuwsturing net iets hoger is dan 30 m^3/s. Bij het afvoerniveau 2000 m^3/s zien we een zeer groot verschil. Het versmallen van de Waal zorgt nauwelijks voor extra afvoer naar de IJssel. In plaats daarvan gaat juist extra afvoer naar de Nederrijn. Omdat stuw Driel stuurt op een waterstand bij de IJsselkop en meer afvoer via het Pannerdensch Kanaal gaat, gaat stuw Driel ten opzichte van de referentiesituatie veel verder open.

Deze analyse toont dat de stuwsturing (vanzelfsprekend) aangepast moet worden als er (fysieke) maatregelen ten behoeve van de laagwaterafvoerverdeling worden genomen.



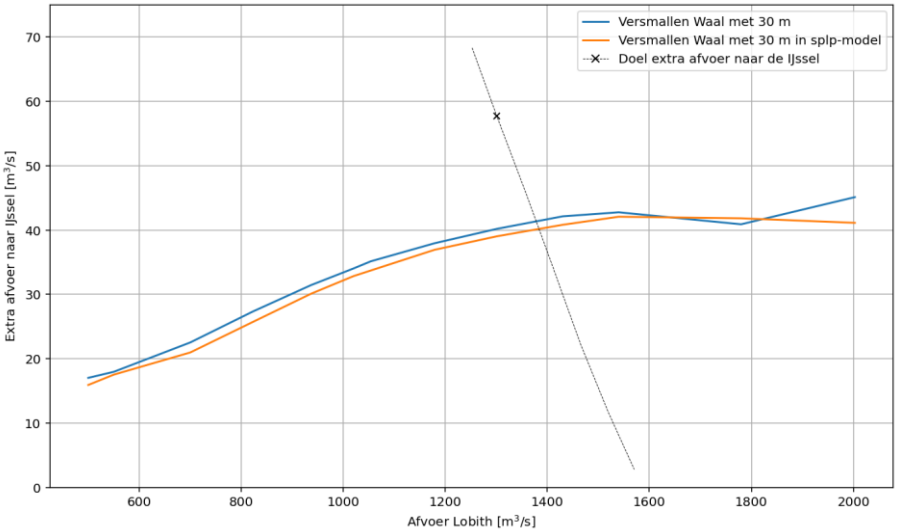
Figuur 4.4: Gevoeligheid van de effectiviteit van de basismaatregel Versmallen Waal ten aanzien van actieve sturing van de stuwen in de Nederrijn-Lek.

4.3.3 Resolutie rekenrooster

In deze studie is gerekend met het 40m rekenrooster horend bij het model *dflowfm2d-rijn-beno19_6-v1b*. In het dwarsprofiel van de rivier zijn de roostercellen ca. 20 m breed. Het projecteren van de maatregel 'versmallen Waal met 30 m' op het rekenrooster zorgt ervoor dat de kruin van de langsdam niet op de beoogde 30 m komt te liggen en dat de veranderingen in de bodemhoogtes ook niet consistent zijn in langsrichting van de Waal (zie Bijlage C.1). Op het fijnere 20m rekenrooster van het model *dflowfm2d-rijn-beno19_6_20m_splp-v2c* ('splitsingspuntenmodel') komt de maatregel nauwkeuriger in het model. Voor de maatregel 'versmallen Waal' hebben we daarom ook berekeningen uitgevoerd met het splitsingspuntenmodel[3]. Figuur 4.5 toont aan dat de berekende resultaten met het 'Rijntakkenmodel' nagenoeg hetzelfde zijn als met het splitsingspuntenmodel. Bij afvoeren boven 1600 m^3/s wijken de resultaten iets van elkaar af. Bij deze afvoeren en waterstanden is de kruin van de langsdam leidend voor de hoeveelheid versmalling. Juist deze kruin zien we verspringen tussen 20 en 40 m versmalling op het grovere 40m rekenrooster.

De analyse laat zien dat het belangrijk is dat de maatregel goed op het rooster komt te vallen, maar dat de orde grootte van het effect van de maatregel ook op een grover rooster goed benaderd kan worden. Voor deze specifieke maatregel en dimensionering kan gesteld worden dat dit komt omdat het deel van de versmalling 'dat in de bodem zit' (zie het profiel in Figuur 3.2) relatief goed op het grove rooster geprojecteerd wordt. Bij een andere dimensionering of een andere maatregel kan het wel noodzakelijk blijken om de maatregel met een fijner rooster door te rekenen om het effect van de maatregel nauwkeurig te kunnen bepalen.

[3] Omdat de benedengrens van het splitsingspuntenmodel in de Waal bij rkm 910 ligt en de geschematiseerde versmalling iets verder doorloopt, hebben we de benedenstroomse randvoorwaarde aangepast aan de hand van de berekende waterstanden in de berekeningen met de basismaatregel 'versmallen Waal'.



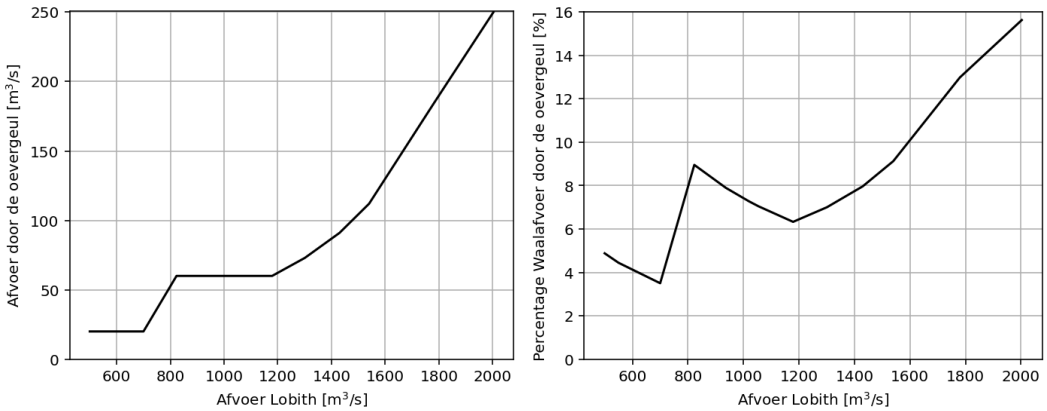
Figuur 4.5: Vergelijking resultaten bij doorrekening van de basismaatregel 'Versmallen Waal met 30m' in het Rijntakkenmodel (blauw; gebruikt in deze studie) en het fijnere splitsingspuntenmodel (oranje).

4.4 Keuzes omtrent schematisatie maatregelen

4.4.1 Afvoer door de oevergeul bij langsdammen

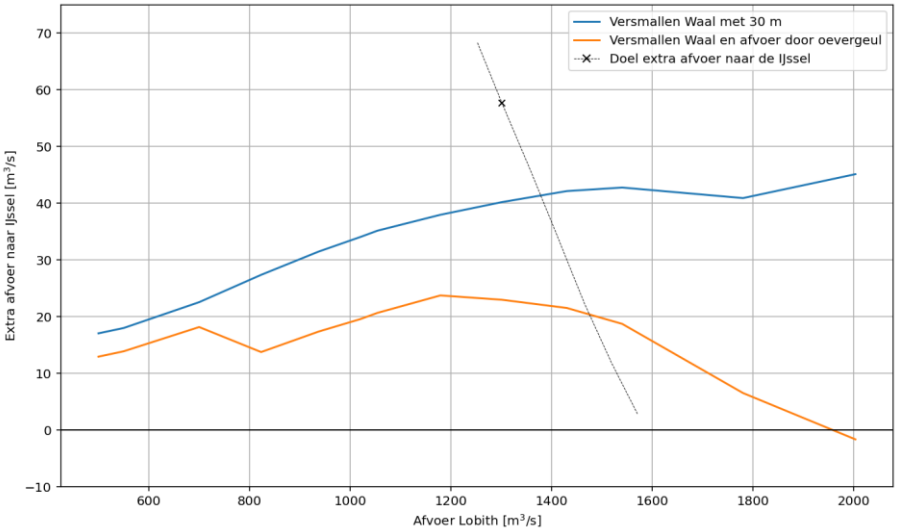
In de basismaatregel 'versmallen Waal' stroomt er geen water achter de langsdam. De belangrijkste reden hiervoor is, is dat de hoeveelheid afvoer dat achter de langsdam langs stroomt sterk afhangt van specifieke inrichtingskeuzes als de hoogte en breedte van instroomdrempels, hoogte van de langsdam en de dimensionering van de geul achter de langsdam. Om zo veel mogelijk afvoer richting de IJssel te krijgen is de laagst mogelijke afvoer achter de langsdam gewenst. Voor ecologie en de stabilisering van de bodemligging is afvoer door de oevergeul juist wel gewenst en zelfs noodzakelijk.

Om een inschatting te geven van hoe afvoer door de oevergeul de effectiviteit van de basismaatregel 'versmallen Waal' beïnvloedt, nemen we een relatie aan tussen de afvoer bij Lobith en de afvoer achter de oevergeul (Figuur 4.6). Voor lage afvoeren (<1200 m^3/s) is in samenspraak met ecologen van Rijkswaterstaat Oost-Nederland een gewenste afvoer van 60 m^3/s vastgesteld. Dit is een significant percentage van de Waalafvoer en kan gezien worden als een bovengrens voor de afvoer door de oevergeul bij de genoemde Lobithafvoer. Bij zeer lage Lobithafvoeren (<800 m^3/s) nemen we aan dat 20 m^3/s achter de langsdam langs stroomt. Bij afvoeren hoger dan 1200 m^3/s gaan in de studie 'Uitwerking beleidskeuze rivierbodemligging' de oevergeulen meestromen en neemt het percentage van de afvoer dat door de oevergeul stroomt ook sterk toe met verder toenemende afvoer. In benedenstroomse richting neemt de afvoer door de oevergeulen toe. Hier houden we geen rekening mee in de aangenomen afvoerrelatie (Figuur 4.6). De aangenomen afvoerrelatie is ook in dit afvoerdomein (>1200 m^3/s) een bovengrens voor de afvoer door de oevergeul.



Figuur 4.6: Aangenomen relatie tussen de afvoer bij Lobith en de in lengterichting constante afvoer door de oevergeulen achter de langsdammen in de Waal. Links: afvoer door de oevergeul. Rechts: percentage van de Waalafvoer door de oevergeul.

De aangenomen afvoeren door de oevergeul leggen we in het model op als 'lozing-onttrekking' omdat we het proces van in- en uitstromen van de oevergeulen in de huidige schematisatie niet kunnen modelleren. Figuur 4.7 laat zien hoe de effectiviteit van de versmalling van de Waal afneemt als (veel) afvoer door de oevergeulen stroomt. Bij een afvoer van 1300 m^3/s bij Lobith gaat in plaats van ca. 40 m^3/s extra afvoer naar de IJssel, maar ruim 20 m^3/s extra afvoer naar de IJssel. Voor hogere afvoeren neemt de effectiviteit verder af omdat steeds meer afvoer door de oevergeulen stroomt. De twee lijnen in Figuur 4.7 geven een realistische boven- en ondergrens aan de effectiviteit van het versmallen van de Waal. Afvoer door de oevergeul is gewenst vanuit ecologie, maar dit is dus tegenstrijdig met het belang van meer afvoer naar de IJssel.



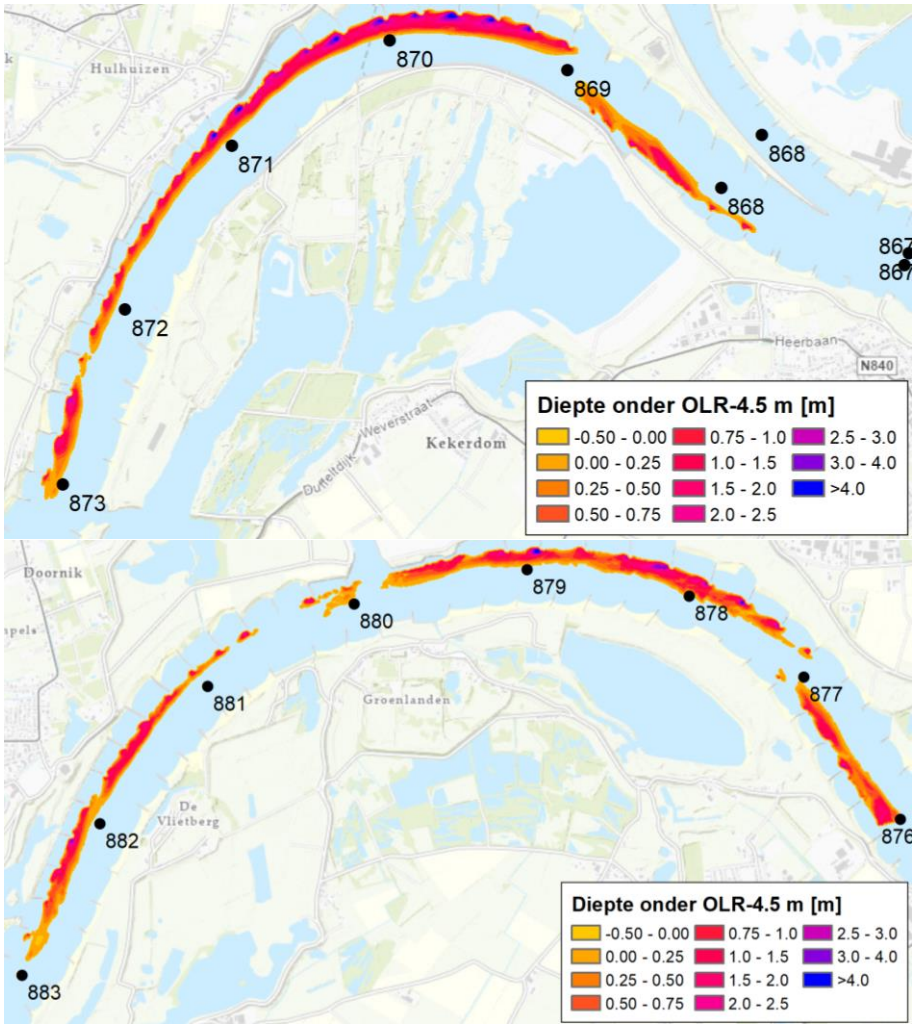
Figuur 4.7: Verandering van de effectiviteit van het versmallen van de Waal als gevolg van de aangenomen afvoer door de oevergeul.

4.4.2 Opvullen en verruwen Waalbochten

Als alternatief voor een uniforme verruwing van 2/3e van de rivierbodem in de Waalbodem (basismaatregel; paragraaf 3.4), kan de verruwing worden toegepast op louter de diepe delen van de Waalbochten waarbij deze diepe delen dan ook opgevuld worden. De verruwing vindt plaats in dezelfde bochten als in de basismaatregel, maar wordt nu alleen toegepast daar waar de bodem heel laag ligt. De maatregel om de diepe delen van de Waalbochten op te vullen, is eerder beschouwd in het rapport 'Slim Suppleren Boven-Waal' (Becker, 2021). In dat rapport is de

morfologische respons van een zestal suppletievarianten doorgerekend waarbij alleen de sedimentfracties van de suppletie waren aangepast en niet ook de bodemruwheid van de verschillende maatregelen. Puur het opvullen van buitenbochten (zonder verruwing) leverde ca. 10 m^3/s extra afvoer naar de IJssel op.

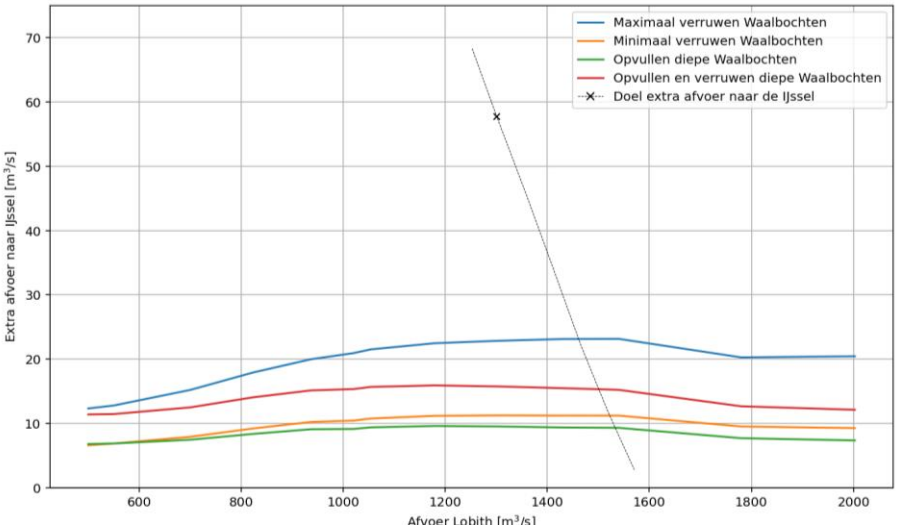
We beschouwen een suppletievariant waarin alle diepe delen van de hoofdgeul worden opgevuld met ruw materiaal. In overleg met het projectteam kozen we het referentievlak OLR-4,5 m. Dit biedt nog voldoende vaardiepte en de suppletievlak blijft beperkt tot minder dan de helft van breedte van de hoofdgeul. Figuur 4.8 toont de vlakken die verondiept worden en de dieptes onder het vlak van OLR-4,5 m. In Bijlage E is een memo met overwegingen over deze maatregel opgenomen.



Figuur 4.8: De vlakken waarin de bodemhoogte in de Waalbochten lager ligt dan OLR-4,5 m waarbij de kleurenschaal aangeeft hoe ver de bodem onder OLR-4,5 m ligt. Deze vlakken worden opgehoogd tot het niveau van OLR-4,5 m.

We rekenen twee maatregelen door: 1) alleen opvullen en 2) opvullen en verruwen. Hiermee kunnen we het resultaat van 1) vergelijken met Becker (2021). De toegepaste ruwheid is die van St. Andries (k=0,34 m), hetzelfde als de minimale verruwing die eerder is toegepast in de basismaatregel. Figuur 4.9 laat zien dat het opvullen van de buitenbochten ca. 10 m^3/s extra afvoer naar de IJssel oplevert, overeenkomend met de resultaten van Becker (2021). Het verruwen van deze opgevulde delen levert nog eens 5 m^3/s extra afvoer naar de IJssel op. Een belangrijke kanttekening bij deze resultaten is dat het suppleren de morfologische ontwikkeling van de

rivierbodem sterk beïnvloedt. Daarnaast dempt het effect van het opvullen en verruwen uit met de tijd aangezien op die plekken er erosie zal plaatsvinden.

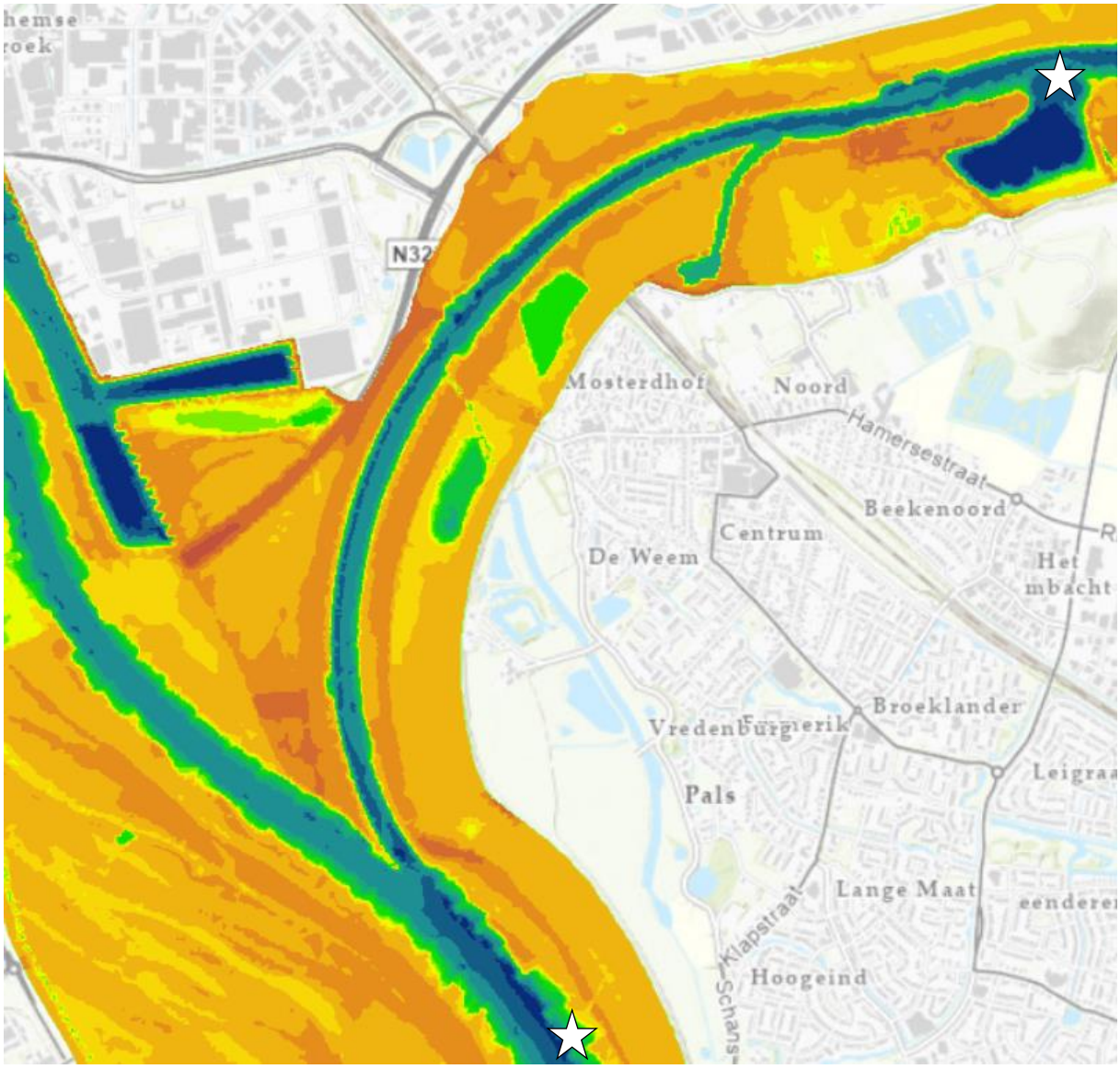


Figuur 4.9: Effectiviteit van variaties van op de basismaatregel 'verruwing Waalbochten'.

4.4.3 Bypass Hondsbroeksche Pleij

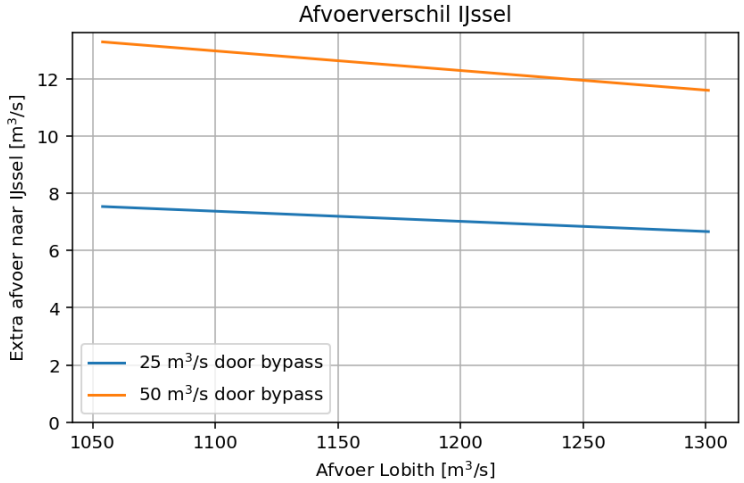
Het aanleggen van een bypass door de Hondsbroeksche Pleij zorgt voor een verlaging van de waterstanden op de Pannerdense Kop, waarmee meer afvoer naar het Pannerdensch Kanaal en vervolgens de IJssel kan worden getrokken. De effectiviteit van deze maatregel is niet onderzocht in de 1D-studie (Asselman et al., 2025). Wel is ingeschat dat een meestromende nevengeul en een duiker van 4 bij 2 m onder regelwerk Hondsbroeksche Pleij er bij lage afvoeren 9 tot 17 m^3/s door de nevengeul afgevoerd kan worden.

Het tracé en het dwarsprofiel van een mogelijke bypass is niet bekend. We onderzoeken of de maatregel effectief kan zijn door te werken met een zogenaamde 'onttrekking-lozing'. We onttrekken afvoer uit het Pannerdensch Kanaal bij de inlaat van de bypass en lozen deze afvoer weer in de IJssel bij de uitlaat van de bypass (Figuur 4.10). De locatie van de uitlaat is gebaseerd op het vooralsnog meest waarschijnlijke tracé van een mogelijke KRW-strang in het project Rivierklimaatpark IJsselpoort. Hoe langer de geul wordt, hoe meer het de waterstand in de IJssel naar beneden kan trekken en hoe groter het effect op de Pannerdense Kop dus nog is. Daarnaast, hoe groter de afvoer die door de geul wordt onttrokken, hoe groter het waterstandseffect en het effect op de afvoerverdeling zal zijn. We verkennen voor twee Lobithafvoeren (1054 en 1301 m^3/s) en twee onttrekkingen (25 en 50 m^3/s) hoe effectief de maatregel kan zijn.

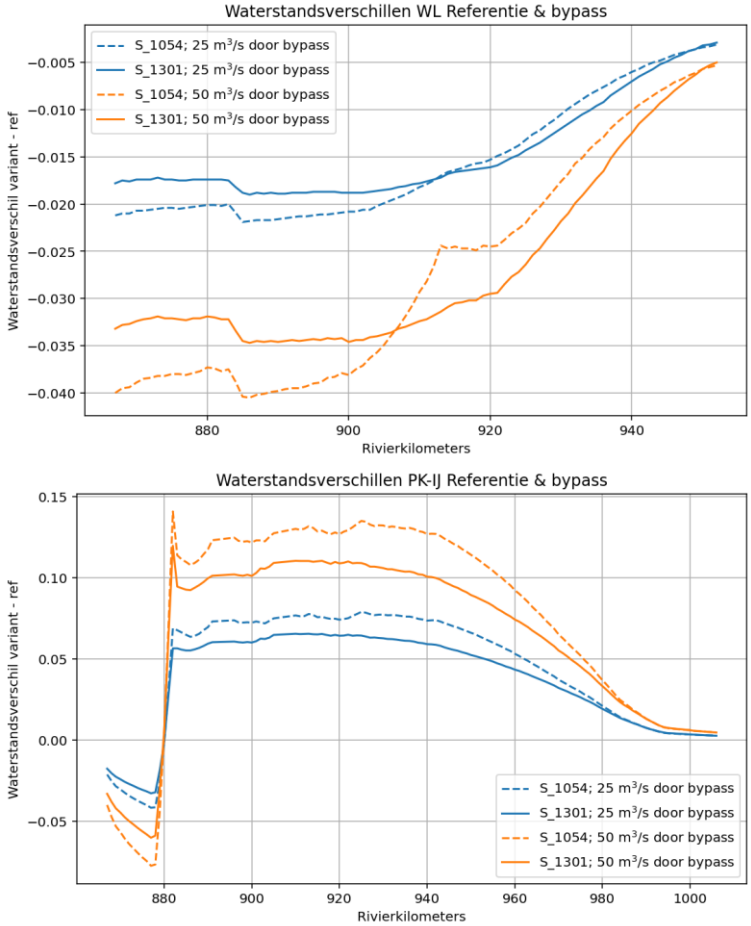


Figuur 4.10: Locaties van de onttrekking en lozing ter hoogte van de mogelijke inlaat en uitlaat van een bypass door de Hondsbroeksche Pleij

Figuur 4.11 toont de effectiviteit van de onttrekking-lozing (bypass) ten aanzien van het trekken extra afvoer naar de IJssel. Voor een afvoer van 1054 m^3/s gaat respectievelijk 8 en 13 m^3/s extra afvoer naar het Pannerdensch Kanaal en vervolgens de IJssel bij bypass-afvoeren van 25 en 50 m^3/s. Dit neemt iets af voor de hogere Lobithafvoer van 1301 m^3/s.



Figuur 4.11: Afvoerverschil door de IJssel bij Lobithafvoeren 1054 en 1300 m³/s (en geïnterpoleerd) voor twee afvoeren door de bypass.



Figuur 4.12: Waterstandsverschillen ten opzichte van de referentiesituatie langs de Waal (boven) en het traject Pannerdensch Kanaal – IJssel.

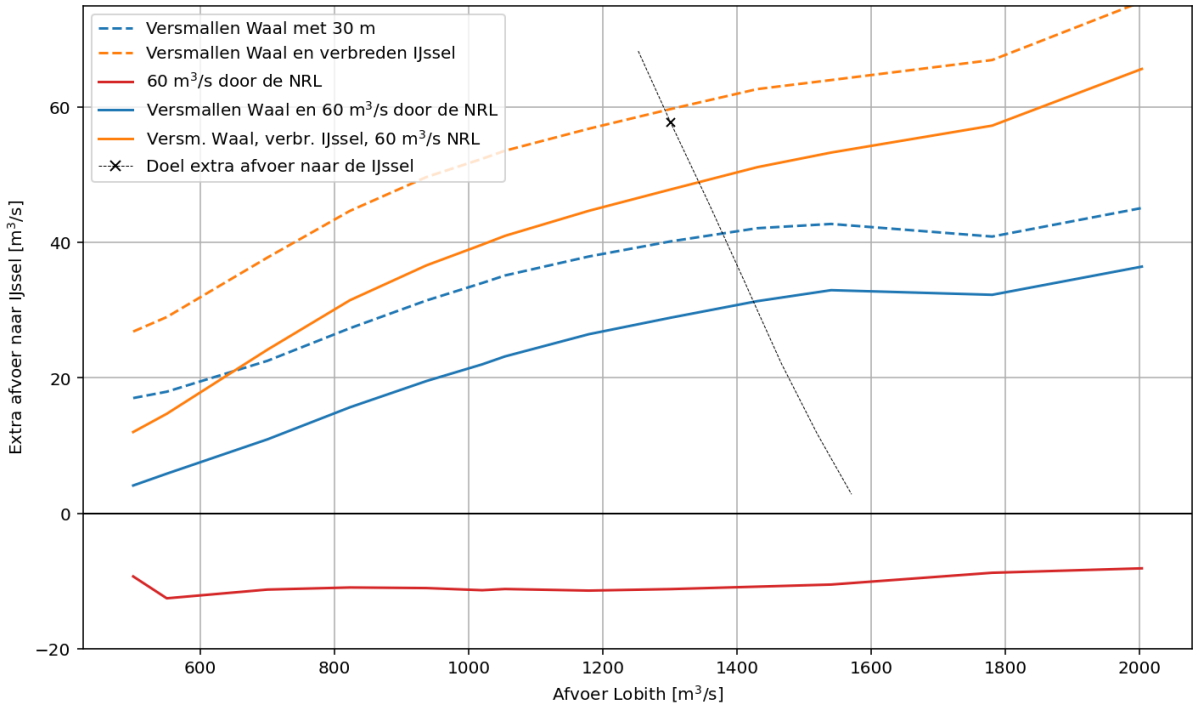
Op basis van vuistregels[4] kunnen we een inschatting maken van de benodigde dimensionering van een geul door de Hondsbroeksche Pleij. De inlaat en de bodem van de geul moet laag genoeg liggen om water onder vrij verval in te kunnen laten. De hoogte is dan ca. 6,5 á 7,0 m +NAP, wat 3

[4] Dwarsprofielbenadering ontwikkeld door HKV en Arcadis in het kader van de effectbepaling van KRW-Oost in de IJssel en Nederrijn-Lek. In deze methode wordt het waterstandsverhang tussen de instroom en uitstroom verdeeld over de duiker(s) en de geul zelf.

á 4 m onder het huidige maaiveld ligt. Om het regelwerk Hondsbroeksche Pleij te passeren, zijn duikers nodig. Uitgaande van duikers die dezelfde breedte hebben als de elementen in het regelwerk zijn voor een afvoer van 25 m^3/s door de geul twee parallelle duikers nodig (totaal 8x2 m doorstroomoppervlakte) en voor een afvoer van 50 m^3/s drie of vier. Een breed bodemprofiel van enkele tientallen meters breed is nodig om bij de lage afvoeren ook voldoende afvoer door de geul te kunnen krijgen. In de geul komt bij voorkeur geen ruwe vegetatie om voldoende afvoercapaciteit te behouden.

4.5 Alternatieve keuzes zoetwatervoorziening

Als er veel zoutindringing is in West-Nederland is kan het gunstig zijn om tijdelijk meer water door de Nederrijn-Lek te laten om zoutindringing tegen te gaan. Door, met de in dit project onderzochte maatregelen, standaard meer water naar de IJssel te sturen ontstaan meer regelmogelijkheden. Immers, bij Driel kan worden afgeweken van het standaard stuwprotocol en meer water worden doorgevoerd naar de Nederrijn. De mogelijkheden en meerwaarde van dit situationeel sturen wordt momenteel verkend in het programma Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem (KZH). Extra afvoer over de Nederrijn-Lek gaat deels ten koste van de afvoer naar de IJssel. We rekenen drie varianten door waarin we de hoeveelheid afvoer door de Nederrijn-Lek verhogen van 30 m^3/s naar 60 m^3/s. Deze drie varianten zijn 1) geen maatregelen, 2) versmallen van de Waal en 3) versmallen van de Waal en verbreden van de IJssel. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 4.13. Het figuur laat zien dat van de 30 m^3/s extra afvoer naar de Nederrijn-Lek er ongeveer 10 m^3/s van de IJssel afkomstig is (rode lijn). Het versmallen van de Waal en verbreden van de IJssel blijven even effectief. Het verschil tussen de effecten van de basismaatregelen (gestippelde lijnen) en de varianten waarin 60 m^3/s door de Nederrijn-Lek (doorgetrokken lijnen) gaat is ca. 10 m^3/s. Het toont wederom de optelbaarheid van maatregelen.



Figuur 4.13: De extra afvoer naar de IJssel als er 60 m^3/s in plaats van 30 m^3/s door de Nederrijn stroomt (doorgetrokken lijnen) als er geen andere maatregelen worden genomen (rood), bij het versmallen van de Waal (blauw) en het versmallen van de Waal en het verbreden van de IJssel (oranje). De gestippelde lijnen geven de resultaten van de basismaatregelen waarin 30 m^3/s door de Nederrijn stroomt.

5 Synthese maatregelen en effecten

5.1 Beschouwing doelbereik afvoerverdeling laagwater

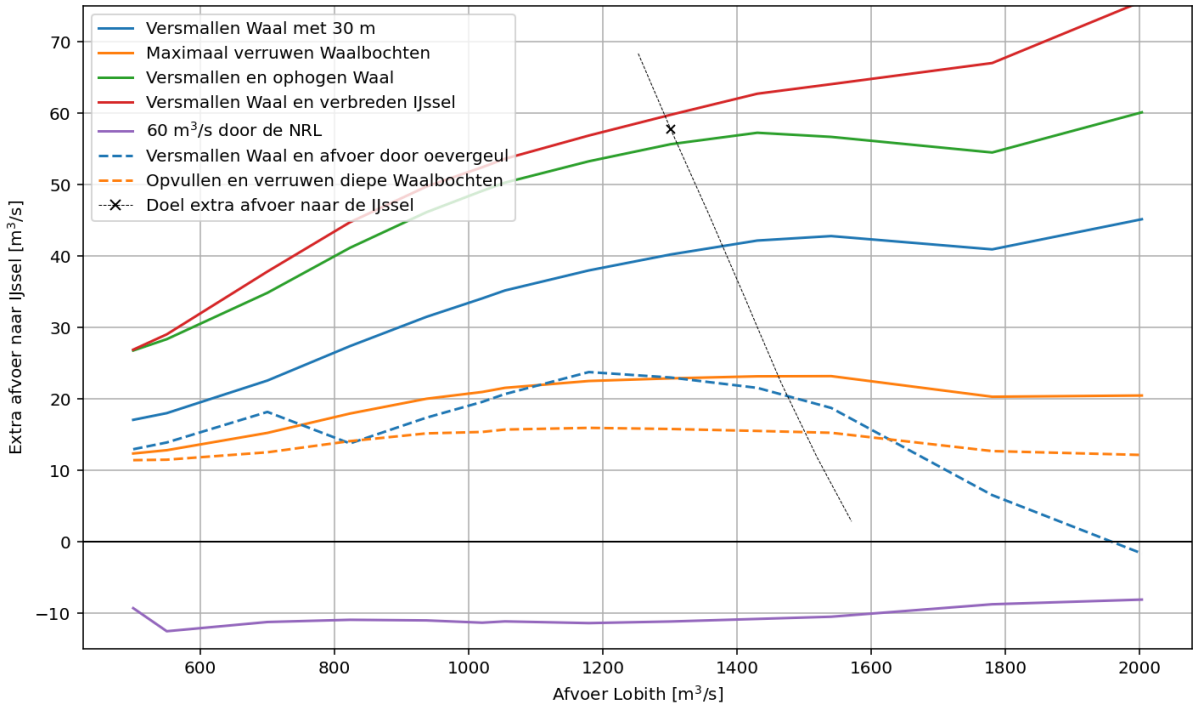
De door Deltaprogramma Zoetwater (voorlopig vastgestelde) gewenste afvoerverdeling bij laagwater is conform (in grote lijnen) de 2e Nota Waterhuishouding (1984). Dit houdt in dat dat bij afnemende afvoeren op de Rijn zo lang mogelijk, tot een afvoer van 1300 m^3/s bij Lobith, minimaal 285 m^3/s via de IJssel en 30 m^3/s via de Nederrijn wordt afgevoerd. Dat is bij deze Lobithafvoer ca. 57 m^3/s extra naar de IJssel t.o.v. de huidige situatie. In deze studie hebben we vier basismaatregelen doorgerekend op effectiviteit ten aanzien van het trekken van extra afvoer naar de IJssel.

De resultaten (Figuur 5.1) tonen dat een combinatie van maatregelen nodig is om het doelbereik te halen. Het enkel versmallen van de Waal, met de kruin op 30 m vanaf de huidige kribkoppen levert bij een Lobithafvoer van 1300 m^3/s ongeveer 40 m^3/s extra afvoer naar de IJssel op. Het effect van het versmallen van de Waal is sterk afhankelijk van de afvoer die door de oevergeul wordt gelaten. Met een toenemende afvoer door de oevergeul, neemt de effectiviteit van de maatregel sterk af (blauw gestippelde lijn in Figuur 5.1). Vanuit ecologie is het noodzakelijk dat voldoende stroming in de oevergeul plaatsvindt, ook bij lage afvoeren. Dit is in tegenstrijd met het doelbereik afvoerverdeling laagwater.

Het verbreden van de IJssel levert 20 m^3/s op waarmee in combinatie met het versmallen van de Waal het doelbereik gehaald wordt. Mogelijk kan dit ook gerealiseerd worden met een bypass door het regelwerk en de uiterwaard Hondsbroeksche Pleij. Dimensies in de orde van tientallen meters breed en 3 á 4 meter diep ten opzichte van huidig maaiveld, is daarbij wel noodzakelijk.

Het verruwen van de Waalbochten, door het opvullen van de diepe bochten met ruw materiaal of het aanleggen van bodemkribben, geeft tot maximaal 20 m^3/s extra naar de IJssel. Het effect neemt echter waarschijnlijk in de tijd af door morfologische ontwikkelingen.

Extra afvoer door de Nederrijn-Lek laten , bijvoorbeeld voor verziltingsbestrijding in de Rijn-Maasmonding, gaat ten koste van afvoer naar de IJssel. De extra afvoer naar de Nederrijn-Lek komt voor ca. 1/3e uit de IJssel en voor 2/3e uit de Waal. De effectiviteit van maatregelen, versmallen van de Waal en het verbreden van de IJssel, verandert echter niet.



Figuur 5.1: Extra afvoer naar de IJssel als functie van afvoer bij Lobith.

5.2 Effecten op rivierkunde

5.2.1 Morfologische effecten op rivierbodem

De onderzochte maatregelen hebben een effect op de langjarige rivierbodemontwikkeling alsmede de jaarlijkse rivierbodemdynamiek. In deze studie hebben we een stabiele bodemligging richting de toekomst verondersteld op basis van de werkhypothese van Ruimte voor de Rivier 2.0.

In de resultaten van de studie 'Uitwerking beleidskeuze Rivierbodemligging' zien we dat hoe meer de Waal versmald wordt, hoe breder de oevergeulen moeten worden om een langjarig stabiele bodemligging te realiseren. Meer versmalling van de Waal en bredere oevergeulen leveren extra bodemdynamiek op binnen een jaar wat voor extra onderhoud in de vorm van baggeren zorgt. Vanuit een stabiele bodemligging en de maakbaarheid daarvan gezien, is een versmalling van de Waal niet nodig en kan juist ongewenste effecten met zich meebrengen.

Suppleren in de Waal (door bijv. het opvullen van diepe buitenbochten met grof materiaal of stortsteen) geeft slechts tijdelijk een verandering van de afvoerverdeling ten gunste van de IJssel. Als er gesuppleerd wordt met sediment, zal dit sediment na verloop van tijd weer eroderen. Als er zeer grof materiaal of stortsteen wordt aangebracht, erodeert de bodem elders. De binnenbocht zal eroderen en er kunnen erosiekuilen benedenstrooms ontstaan. Ongeacht de manier van suppleren, verdwijnt het positieve effect na verloop van tijd.

Het verbreden van de IJssel zorgt voor een lagere sedimenttransportcapaciteit in het verbrede traject. Dit zorgt voor sedimentatie. In welke mate dit een stabiele of hogere bodemligging oplevert wordt beschouwd in de studie 'Uitwerking beleidskeuze Rivierbodemligging'. Eventueel is baggeren nodig om de gewenste bodemligging te handhaven.

5.2.2 Effecten op stuwbereik stuw Driel

Met de huidige stuwregels is stuw Driel volledig gesloten voor Lobithafvoeren van 1590 m^3/s en lager. Het regelbereik neemt toe als er maatregelen worden getroffen om meer afvoer naar de IJssel krijgen. Als absoluut doelbereik wordt bereikt, 285 m^3/s naar de IJssel bij een Lobithafvoer van 1300 m^3/s, is stuw Driel pas volledig gesloten bij deze afvoer van 1300 m^3/s en lager. Ten opzichte van de huidige situatie zal de Nederrijn-Lek tientallen dagen per jaar minder volledig gestuwd zijn. Met alleen een versmalling van de Waal neemt het stuwbereik van stuw Driel ook toe. Tot een afvoer van ongeveer 1380 m^3/s is stuw Driel nog niet volledig gesloten.

5.3 Effecten op rivierfuncties

We voeren een kwalitatieve effectbepaling uit voor vier rivierfuncties: veilige afvoer van hoogwater, zoetwaterbeschikbaarheid, natuur en bevaarbaarheid. De effectbepaling voeren we uit voor de vier basismaatregelen. We sluiten grotendeels aan bij de beoordelingsaspecten van het in de PlanMER IRM toegepaste beoordelingskader[5]. De uiteindelijke beoordelingsaspecten en de beoordelingsschalen worden ook toegepast in de twee parallelle studies die HKV uitvoert, namelijk 'Doorrekenen afvoerverdeling bij hoogwater' en 'Uitwerking beleidskeuze rivierbodemligging'.

Een belangrijk uitgangspunt voor de effectbepaling is dat de bodem na uitvoering van de maatregelen in het kader van Ruimte voor de Rivier 2.0, waaronder die in het kader van de hoogwater afvoerverdeling, stabiel blijft. Met andere woorden: de bij de modelschematisatie gehanteerde bodem ligt er ook in de toekomst. Ook wordt uitgegaan van het beleid 'Lek Ontzien', waarvoor het surplus aan afvoer boven de 16.000 m^3/s volledig wordt verdeeld over de Waal en IJssel.

Voor de effectbepaling is de indeling naar trajecten volgens Ruimte voor de Rivier 2.0 als basis gebruikt. Om de effectbepaling overzichtelijk te houden zijn de trajecten samengevoegd tot negen samengevoegde trajecten op basis van de verwachting dat de effecten binnen de samengevoegde trajecten niet onderscheidend zijn. De resulterende trajecten zijn weergegeven in Tabel 5.1.

Tabel 5.1: Samengevoegde trajecten voor effectbepaling

Nr.	Traject voor effectbepaling	
1	Boven-Rijn	857,7 – 867,5
2	Waalbochten	867,5 – 887,0
3	Midden-Waal	887,0 – 917,5
4	Beneden Waal, Boven-Merwede	917,5 - 962,5
5	Pannerdensch Kanaal	867,5 – 878,5
6	Boven-Nederrijn	878,5 – 891,5
7	Midden-Nederrijn, Beneden-Nederrijn, Lek	891,5 - 971,4
8	Boven-IJssel	878,5 – 911,5
9	Midden-IJssel, Sallandse IJssel, Beneden-IJssel	911,5 – 1005,0

[5] https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2023/12/15/bijlage-5-planmer-programma-irm-eindrapport-14-november-2023

5.3.1 Hoogwaterveiligheid

Een veilige afvoer van hoogwater wordt binnen deze studie gevat in het beoordelingsaspect hoogwaterstanden, waarmee we aansluiten bij het PlanMER Ruimte voor de Rivier 2.0. Hoogwaterstanden zijn de belangrijkste hydraulische belasting op de waterkeringen in het bovenrivierengebied. Een verlaging van de hoogwaterstanden is gunstig voor een veilige afvoer van hoogwater, aangezien de overstromingskansen van de langs de rivier gelegen primaire waterkeringen afnemen. Toch is een verlaging van de hoogwaterstanden niet de enige optie om de waterveiligheidsdoelen te halen, omdat dat met het verhogen en versterken van de waterkeringen ook kan. We gaan ervan uit dat de maatregelen geen invloed hebben op de sterkte van de waterkeringen.

Ten opzichte van de referentie is het effect op de waterstand beoordeeld voor de verschillende riviertakken bij een Rijnafvoer van 18.000 m^3/s, waarbij de schaal uit Tabel 5.2 is gehanteerd. We gaan hierbij uit van een vaste instelling van de regelwerken en wegen niet mee dat deze opnieuw ingesteld kunnen worden om effecten op de afvoerverdeling te gaan. Dit uitgangspunt is ook gehanteerd bij de studie 'Doorrekenen afvoerverdeling bij hoogwater'. Op basis van expert judgement en kwantitatieve informatie uit de studie 'Doorrekenen afvoerverdeling bij hoogwater' scoren we de vier basismaatregelen.

Versmallen Waal
De langsdammen in combinatie met de aanleg van oevergeulen resulteren naar verwachting voor het grootste waterstandseffect bij hoogwater. Ze laten de waterstanden dalen in de Boven-Rijn en het traject van de Waal waar de langsdammen langs liggen. In de studie 'Doorrekenen afvoerverdeling bij hoogwater' zijn de langsdammen over een korter traject toegepast, maar juist wel met zeer grote oevergeulen, wat resulteerde in het trekken van extra afvoer bij 18.000 m^3/s en (desondanks) in waterstandsdalingen tot ca. 10 cm. De waterstandstijging benedenstrooms van de langsdammen als gevolg van die hogere afvoer is ook ca. 10 cm. In de andere takken is de waterstandsdaling als gevolg van de afgenomen afvoer ook in de orde van 10 cm. We kennen scores van '**+**' en '**-**' toe.

Versmallen Waal en ophogen Waalbodem
Het ophogen van de Waalbodem geeft iets opstuwing langs het traject waar de bodem wordt verhoogd. Als vuistregel kan gesteld worden dat ca. $1/3^e$ van de bodemstijging doorwerkt in de waterstanden. Dit geeft orde 6 cm hogere waterstanden langs de Waal, waardoor er netto met de langsdammen en oevergeulen nog steeds een waterstandsdaling plaatsvindt. Deze valt echter in de score '**0**'. Langs de andere takken zijn de waterstandsverschillen kleiner.

Versmallen Waal en verbreden Boven-IJssel
Wanneer de langsdammen gecombineerd worden met een verbreding van de IJssel komt de hoogwaterafvoerverdeling meer overeen met de referentie. Langs de trajecten met verruiming (Waalbochten en Boven-IJssel) en in mindere mate ook de bovenstrooms gelegen trajecten Pannerdensch kanaal en Boven-Rijn dalen de waterstanden, maar waarbij dit waarschijnlijk beperkt tot minder dan 10 cm.

Verruwen van de Waalbochten
Het verruwen van de Waalbochten stuwt lokaal de waterstanden op. De effecten op de afvoerverdeling resulteren niet in waterstandsdalingen of -stijgingen groter dan 10 cm langs de andere takken.

Tabel 5.2: Beoordelingsschaal hoogwaterveiligheid (waterstandsdaling is positief effect)

Beoordeling		
	Bovenkant klasse	*Onderkant klasse*
++++	-100 cm t.o.v. referentie	N.v.t.
+++	-60 cm t.o.v. referentie	-100 cm t.o.v. referentie
++	-30 cm t.o.v. referentie	-60 cm t.o.v. referentie
+	-10 cm t.o.v. referentie	-30 cm t.o.v. referentie
0	+10 cm t.o.v. referentie	-10 cm t.o.v. referentie
-	+30 cm t.o.v. referentie	+10 cm t.o.v. referentie
--	+60 cm t.o.v. referentie	+30 cm t.o.v. referentie
---	+100 cm t.o.v. referentie	+60 cm t.o.v. referentie
----	N.v.t.	

Het resultaat is weergegeven in Tabel 5.3.

Tabel 5.3: Beoordeling hoogwaterveiligheid

Traject voor effectbepaling	**Versmallen Waal**	**Versmallen en ophogen Waal**	**Versmallen Waal en verbreden IJssel**	**Verruwen buitenbochten Waal**
Boven-Rijn (857,7 – 867,5)	+	0	0	0
Waalbochten (867,5 – 887,0)	+	0	+	-
Midden Waal (887 – 917,5)	0	0	+	0
Beneden Waal + Boven-Merwede (917,5 – 962,5)	-	0	0	0
Pannerdensch Kanaal (867,5 – 878,5)	+	0	0	0
Boven Nederrijn (878,5 – 891,5)	0	0	0	0
Nederrijn/Lek (891,5 - 946,9)	0	0	0	0
Boven IJssel (878,5 – 911,5)	+	0	+	0
Midden IJssel, Sallandse IJssel, Beneden IJssel (911,5 – 1005)	+	0	0	0

5.3.2 Zoetwaterbeschikbaarheid en drinkwatervoorziening

Voor de zoetwaterbeschikbaarheid is de afvoerverdeling over de splitsingspunten bij lage afvoeren een bepalende factor.

Het Deltaprogramma Zoetwater onderzoekt de wenselijke afvoerverdeling bij laagwater. Hier is nog geen conclusie over. Wat vaststaat, is dat voortzetting van het scheeftrekken van de afvoerverdeling ongewenst is en voor het functioneren van het IJsselmeer als zoetwaterbuffer meer afvoer naar de IJsel wenselijk is. Voorlopig is de gewenste afvoerverdeling gedefinieerd als het bereiken van een IJsselafvoer van 285 m^3/s bij 1300 m^3/s bij Lobith. s. Ten opzichte van de huidige situatie moet de afvoer naar de IJssel ca. 57 m^3/s toenemen. De IJsselafvoer is zeer belangrijk voor de vulling van het IJsselmeer en Markermeer en voor toevoer van zoetwater naar

Oost-Nederland via de Twentekanalen. De afvoer naar de Waal en Nederrijn-Lek zijn belangrijk voor West-Nederland om tegendruk te bieden tegen zoutindringing, om de peilen te kunnen beheren en om in de directe zoetwatervraag te kunnen voorzien. Of toenemende zoutindringing, behorend bij een aanpassing naar de gewenste afvoerverdeling, acceptabel is, is onderdeel van het bestuurlijk traject en daarmee een aandachtspunt in het vervolg.

Voor de beoordeling blijven we bij de wens om meer afvoer naar de IJssel te trekken. We beoordelen daarom ook alleen de extra afvoer naar de IJssel.

Tabel 5.4: Beoordelingsschaal Zoetwaterbeschikbaarheid en drinkwatervoorziening

Beoordeling	**Extra afvoer naar de IJssel bij lage afvoeren (1300 m³/s bij Lobith)**	
	Onderkant klasse	*Bovenkant klasse*
++++	+60 m³/s t.o.v. referentie	n.v.t.
+++	+40 m³/s t.o.v. referentie	+60 m³/s t.o.v. referentie
++	+20 m³/s t.o.v. referentie	+40 m³/s t.o.v. referentie
+	+5 m³/s t.o.v. referentie	+20 m³/s t.o.v. referentie
0	-5 m³/s t.o.v. referentie	+5 m³/s t.o.v. referentie
-	-20 m³/s t.o.v. referentie	-5 m³/s t.o.v. referentie
--	-40 m³/s t.o.v. referentie	-20 m³/s t.o.v. referentie
---	-60 m³/s t.o.v. referentie	-40 m³/s t.o.v. referentie
----	n.v.t.	-60 m³/s t.o.v. referentie

Op basis van de in hoofdstuk 3 gepresenteerde resultaten hebben we de beoordelingstabel, Tabel 5.5, ingevuld. Voor de maatregelen 'versmallen Waal' en 'versmallen Waal en verbreden IJssel' is het effect op de grens van twee klasses. We hebben de score 'naar het midden' bijgesteld. De doorgerekende maatregel versmallen Waal geeft eerder een bovengrens van het effect van de maatregel aangezien er geen afvoer door de oevergeul ging.

Tabel 5.5: Beoordeling zoetwaterbeschikbaarheid en drinkwatervoorziening

Traject voor effectbepaling	**Versmallen Waal**	**Versmallen en ophogen Waal**	**Versmallen Waal en verbreden IJssel**	**Verruwen buitenbochten Waal**
Zoetwatervoorziening	++	+++	+++	++

5.3.3 Bevaarbaarheid

Het doelbereik voor bevaarbaarheid wordt (grotendeels) bepaald door de bevaarbare diepte in de hoofdgeul. Op een vaartraject is het minst diepe deel bepalend voor het gehele vaartraject. Eén knelpunt kan dus al zorgen voor beperkingen in de bevaarbaarheid. De effectbepaling doen we per traject omdat de effecten van de maatregelen sterk verschillen per traject. We merken daarbij op dat een verslechtering van één van de trajecten wel kan resulteren in een verslechtering van de gehele vaarroute als de afname van de waterdiepte op het belangrijkste knelpunt plaatsvindt.

De verandering van de waterdiepte bij de Overeengekomen Lage Afvoer (OLA[6]) als gevolg van een maatregelpakket is bepalend voor de bevaarbaarheid van een traject. Door het jaar heen kan morfodynamiek bij in- en uitstromen van nevengeulen, oevergeulen en hele uiterwaarden zorgen voor tijdelijke ondieptes. Deze moeten weggebaggerd worden, waardoor (tijdelijk) hinder is. Maatregelen die de morfodynamiek en baggerlast versterken, hebben daardoor een (licht) negatieve impact hebben op de bevaarbaarheid.

Voor de beoordeling wordt gebruik gemaakt van onderstaande schaal. De beoordeling is samengevat in Tabel 5.7.

Tabel 5.6: Beoordelingsschaal bevaarbaarheid

Beoordeling	**Bevaarbaarheid; waterdiepte bij OLA**	
	Onderkant klasse	*Bovenkant klasse*
++++	+50 cm t.o.v. referentie	n.v.t.
+++	+30 cm t.o.v. referentie	+50 cm t.o.v. referentie
++	+15 cm t.o.v. referentie	+30 cm t.o.v. referentie
+	+5 cm t.o.v. referentie	+15 cm t.o.v. referentie
0	-5 cm t.o.v. referentie	+5 cm t.o.v. referentie
-	-15 cm t.o.v. referentie	-5 cm t.o.v. referentie
--	-30 cm t.o.v. referentie	-15 cm t.o.v. referentie
---	-50 cm t.o.v. referentie	-30 cm t.o.v. referentie
----	n.t.v.	-50 cm t.o.v. referentie

Versmallen Waal

De langsdammen versmallen de hoofdgeul van de Waal en stuwen daarmee de waterstanden op (Figuur 3.4). Bij gelijkblijvende bodemligging neemt de waterdiepte daarmee toe. Door de hogere afvoer stijgen de waterstanden en waterdieptes langs Pannerdensch Kanaal en de IJssel. De afname van de afvoer door de Waal is met name voelbaar in het traject waar de langsdammen niet worden aangelegd. Daar wordt de waterstand niet opgestuwd, maar neemt de afvoer wel af.

Een vaste bodemligging aannemend, zijn de veranderingen van de waterstanden gelijk aan de veranderingen van de waterdieptes. Dat geeft het volgende beeld:

- Langs de Boven-Rijn worden de waterstanden opgestuwd door de langsdammen in de Waal met 15 á 30 cm, score **'++'**.
- Langs het traject Waalbochten worden de waterstanden het meest opgestuwd. Het traject ligt niet in de stuwkromme. De waterstanden en waterdieptes stijgen met ruim 30 cm, score **'+++'**.
- Het traject Midden-Waal ligt in de stuwkromme van het waterstandseffect. Benedenstrooms in het traject stijgt de waterstand en waterdiepte niet, terwijl deze in het bovenstroomse deel stijgt met ca. 30 cm. Gemiddeld, score **'++'**.
- Langs de Beneden-Waal en in mindere mate langs de Boven-Merwede in verband met de invloed van de zee en getij, dalen de waterstanden en waterdieptes als gevolg van een afname van de afvoer met orde 5 á 10 cm. Dit geeft score **'-'**.

[6] Voor de beoordeling is de huidige OLA van 1020 m^3/s bij Lobith in eerste instantie leidend. Indien de effecten bij afvoeren lager dan de huidige OLA groter zijn, wordt daar rekening mee gehouden in de beoordeling. Dit omdat in de toekomst de OLA naar verwachting gaat afnemen.

- Langs het Pannerdensch Kanaal, de Boven-IJssel en de Boven-Nederrijn tot aan stuw Driel[7] stijgen de waterdieptes als gevolg van de toegenomen afvoer met ruim 30 cm. Dit geeft score **'+++'**.
- Langs de Nederrijn-Lek vanaf stuw Driel verandert niks, score '**0**'.
- In de Midden-IJssel en verder benedenstrooms neemt het waterstandseffect van de toegenomen afvoer geleidelijk af, gemiddeld geeft dit score **'++'**.

Versmallen Waal en ophogen Waalbodem

Het ophogen van de Waalbodem stuwt de laagwaterstanden verder op (Figuur 3.7), maar neemt de waterdiepte in het verhoogde traject van de Waal af door de hogere bodemligging. Netto met het versmallen van de Waal erbij is er nog wel duidelijk sprake van een grotere waterdiepte bij OLA.

Het beeld is als volgt:

- Langs de Boven-Rijn worden de waterstanden opgestuwd door de langsdammen en de bodemophoging in de Waal met ca. 40 cm, score **'+++'**.
- Langs het traject Waalbochten nemen de waterstanden met ca. 45 cm toe, maar neemt de waterdiepte door de hogere bodemligging ca. 25 cm toe, score **'++'**.
- Het traject Midden-Waal ligt in de stuwkromme van het waterstandseffect. Benedenstrooms in het traject daalt de waterdiepte als gevolg van de hogere bodemligging, terwijl deze in het bovenstroomse deel stijgt met ca. 25 cm. Gemiddeld, score **'+'**.
- Langs de Beneden-Waal en in mindere mate langs de Boven-Merwede in verband met de invloed van de zee en getij, dalen de waterstanden en waterdieptes als gevolg van een afname van de afvoer met orde 5 á 10 cm. Dit geeft score **'-'**.
- Langs het Pannerdensch Kanaal, de Boven-IJssel en de Boven-Nederrijn tot aan stuw Driel stijgen de waterdieptes als gevolg van de toegenomen afvoer met ruim 40 cm. Dit geeft score **'+++'**.
- Langs de Nederrijn-Lek vanaf stuw Driel verandert niks, score '**0**'.
- In de Midden-IJssel en verder benedenstrooms neemt het waterstandseffect van de toegenomen afvoer geleidelijk af, gemiddeld geeft dit score **'++'**.

Versmallen Waal en verbreden Boven-IJssel

Het verbreden van de Boven-IJssel zorgt voor een sterke stuwkromme in de Boven-IJssel, waarbij de waterstanden op de IJsselkop netto 20 cm toenemen, terwijl deze benedenstrooms van de verbreding toenemen met 50 cm (Figuur 3.10). Ook in het Pannerdensch Kanaal en in de Waal is de waterstandsstijging minder dan wanneer enkel de Waal wordt versmald.

Een vaste bodemligging aannemend, ook in de Boven-IJssel, zijn de veranderingen van de waterstanden gelijk aan de veranderingen van de waterdieptes. Dat geeft het volgende beeld:

- Langs de Boven-Rijn worden de waterstanden opgestuwd door de langsdammen in de Waal met 15 á 30 cm, score **'++'**.
- Langs het traject Waalbochten worden de waterstanden opgestuwd met iets ca. 30 cm, score **'++'**.
- Het traject Midden-Waal ligt in de stuwkromme van het waterstandseffect. Benedenstrooms in het traject stijgt de waterstand en waterdiepte niet, terwijl deze in het bovenstroomse deel stijgt met ca. 30 cm. Gemiddeld, score **'+'**.

[7] De Nederrijn tot aan stuw Driel volgt de waterstand van de IJsselkop zolang er nauwelijks afvoer door de stuw gaat.

- Langs de Beneden-Waal en in mindere mate langs de Boven-Merwede in verband met de invloed van de zee en getij, dalen de waterstanden en waterdieptes als gevolg van een afname van de afvoer met orde 5 á 10 cm. Dit geeft score **'-'**.
- Langs het Pannerdensch Kanaal en de Boven-Nederrijn tot aan stuw Driel[8] stijgen de waterdieptes met ca. 20 cm. In de Boven-IJssel stijgen de waterstanden nabij de IJsselkop met ca. 20 cm en met 50 cm aan het eind van het traject. Omdat de laagste waterdieptes bepalend zijn voor de bevaarbaarheid, ronden we de score 'naar het midden' af. Score **'++'**.
- Langs de Nederrijn-Lek vanaf stuw Driel verandert niks, score '**0**'.
- In de Midden-IJssel en verder benedenstrooms neemt het waterstandseffect van de toegenomen afvoer geleidelijk af, gemiddeld geeft dit score **'++'**.

Verruwen van de Waalbochten

Het verruwen van de Waalbochten zorgt voor waterstandsstijgingen in de Waalbochten met 10 á 20 cm (Figuur 3.13). Door de verandering van de afvoerverdeling dalen de waterstanden en nemen de waterdieptes af langs de rest van de Waal. Langs het Pannerdensch Kanaal en de IJssel nemen de laagwaterstanden met ca. 20 cm toe door de toegenomen afvoer.

Een vaste bodemligging aannemend[9], zijn de veranderingen van de waterstanden gelijk aan de veranderingen van de waterdieptes. Dat geeft het volgende beeld:

- Langs de Boven-Rijn worden de waterstanden opgestuwd door de verruwing van de Waal met ca. 15 cm, score **'+'**.
- Langs het traject Waalbochten worden de waterstanden opgestuwd met 10 á 20 cm, score **'+'**. We plaatsen de kanttekening dat in het verruwde traject de morfodynamiek naar verwachting toeneemt in de (ondiepere) binnenbocht, waardoor lokaal knelpunten kunnen ontstaan.
- Het traject Midden-Waal, Beneden-Waal en in mindere mate langs de Boven-Merwede in verband met de invloed van de zee en getij, dalen de waterstanden en waterdieptes als gevolg van een afname van de afvoer met orde 5 cm. Dit geeft score **'-'**.
- Langs het Pannerdensch Kanaal, de Boven-IJssel en de Boven-Nederrijn tot aan stuw Driel[10] stijgen de waterdieptes met ca. 20 cm. Score **'++'**.
- Langs de Nederrijn-Lek vanaf stuw Driel verandert niks, score '**0**'.
- In de Midden-IJssel en verder benedenstrooms neemt het waterstandseffect van de toegenomen afvoer geleidelijk af, gemiddeld geeft dit score **'+'**.

Tabel 5.7: Beoordeling bevaarbaarheid

Traject voor effectbepaling	Versmallen Waal	Versmallen en ophogen Waal	Versmallen Waal en verbreden IJssel	Verruwen buitenbochten Waal
Boven-Rijn (857,7 – 867,5)	++	+++	++	+
Waalbochten (867,5 – 887,0)	+++	++	++	+
Midden Waal (887 – 917,5)	++	+	+	-

[8] De Nederrijn tot aan stuw Driel volgt de waterstand van de IJsselkop zolang er nauwelijks afvoer door de stuw gaat.
[9] Deze maatregel zorgt niet voor een stabiele bodemligging, waardoor de effecten anders zijn dan zoals hier beoordeeld. Om consistent te blijven is de aanname wel gedaan.
[10] De Nederrijn tot aan stuw Driel volgt de waterstand van de IJsselkop zolang er nauwelijks afvoer door de stuw gaat.

Beneden Waal + Boven-Merwede (917,5 – 962,5)	-	-	-	-
Pannerdensch Kanaal (867,5 – 878,5)	+++	+++	++	++
Boven Nederrijn (878,5 – 891,5)	+++	+++	++	++
Nederrijn/Lek (891,5 - 946,9)	0	0	0	0
Boven IJssel (878,5 – 911,5)	+++	+++	++	++
Midden IJssel, Sallandse IJssel, Beneden IJssel (911,5 – 1005)	++	++	++	+

5.3.4 Natuur

Voor het doelbereik voor natuur en ecologische waterkwaliteit zijn aspecten als hydrodynamiek, morfodynamiek en ruimte voor natuurontwikkeling belangrijk. De maatregelpakketten worden op het aspect ecologische waterkwaliteit niet onderscheidend geacht.

Voor het aspect hydrodynamiek wordt het effect van de maatregelen beschouwd op overstromingsfrequentie, grondwaterstanden en variatie in ruimte en tijd van stroming en inundatie. De effecten van maatregelen op veranderingen van grondwaterstanden en overstromingsfrequentie zijn beperkt.

Geschikte hydrodynamiek is verder sterk afhankelijk van de lokaal gewenste condities en de lokale inrichting van oevers en uiterwaarden. Ditzelfde geldt voor morfodynamiek. Daarom wordt hieronder op riviertakniveau een kwalitatieve beschouwing van de effecten van de maatregelen op de hydrodynamiek en morfodynamiek gegeven.

Tabel 5.8: Beoordelingsschaal Hydrodynamiek en morfodynamiek

Beoordeling	Hydrodynamiek en morfodynamiek
++++	Zeer veel meer variatie in ruimte en tijd van de stroming en waterdieptes en zeer geschikte grondwaterstanden. Qua morfodynamiek is sprake van zeer veel meer vrije uitwisseling van sediment tussen zomerbed, oeverzone en uiterwaard.
++	Meer variatie in ruimte en tijd van de stroming en waterdieptes en geschikte grondwaterstanden. Qua morfodynamiek is sprake van meer vrije uitwisseling van sediment tussen zomerbed, oeverzone en uiterwaard.
0	Nauwelijks veranderingen van de hydrodynamiek en morfodynamiek
--	Minder variatie in ruimte en tijd van de stroming en waterdieptes en minder geschikte grondwaterstanden. Qua morfodynamiek is sprake van minder vrije uitwisseling van sediment tussen zomerbed, oeverzone en uiterwaard.
----	Zeer veel minder variatie in ruimte en tijd van de stroming en waterdieptes en zeer veel minder geschikte grondwaterstanden. Qua morfodynamiek is sprake van zeer veel minder vrije uitwisseling van sediment tussen zomerbed, oeverzone en uiterwaard.

Versmallen Waal

De langsdammen met een oevergeul of geul door de uiterwaard zorgen voor een toename van de hydro- en morfodynamiek. Vanuit het oogpunt van natuur is diversiteit in oevergeulbreedtes en -

dieptes gewenst. Dit resulteert namelijk in diversiteit in habitats. De specifieke inrichting van de geulen bepaalt dus sterk de verbetering van hydro- en morfodynamiek. Score '**++**'. Langs de andere takken zijn geen maatregelen voorzien, score '**0**'.

Versmallen Waal en ophogen Waalbodem
Het ophogen van de Waal geeft nauwelijks extra hydro- en morfodynamiek. De scores zijn '**++**' voor de Waal en '**0**' voor de andere takken.

Versmallen Waal en verbreden Boven-IJssel
Het verbreden van de Boven-IJssel heeft afhankelijk van de inrichting van de nieuwe oeverzone een positief effect op de hydro- en morfodynamiek. Voor een echt positief effect op hydro-en morfodynamiek moeten de nieuwe oevers zo veel mogelijk vrij zijn van stortsteen en kribben. Het is niet duidelijk hoe realistisch dit is. Vanwege de potentie wordt de score '**++**' toegekend voor de (Boven-)IJssel.

Verruwen van de Waalbochten
Het verruwen van de Waalbochten heeft nauwelijks effect op de voor natuur geschikte diversiteit in hydro- en morfodynamiek. Scores '**0**'.

Tabel 5.9 Samenvatting effectbepaling Natuur en ecologische waterkwaliteit, aspect hydro- en morfodynamiek

Traject voor effectbepaling	Versmallen Waal	Versmallen en ophogen Waal	Versmallen Waal en verbreden IJssel	Verruwen buitenbochten Waal
Waal	++	++	++	0
Pannerdensch Kanaal	0	0	0	0
Nederrijn-Lek	0	0	0	0
IJssel	0	0	++	0

Ruimte voor natuurontwikkeling
Voor het aspect ruimte voor natuurontwikkeling wordt ervan uitgegaan dat met het uitvoeren van de maatregel het maatregelgebied geschikter wordt voor natuur en natuurontwikkeling, en dat hierin een ontwerpopgave ligt. We voeren de beoordeling uit voor de gehele Rijntakken, omdat het grootste deel van de maatregelen zich bevindt in PAGW-hotspot 'Gelderse Poort'. In dit gebied is het doel veel meer hectare voor natuur en natuurontwikkeling te creëren.

De beoordelingsschaal is als volgt.

Tabel 5.10: Beoordelingsschaal Ruimte voor natuurontwikkeling. Omdat aangenomen wordt dat het gehele maatregelgebied geschikt wordt voor natuur kan de beoordeling niet negatief worden.

Beoordeling	Beoordelingsschaal Ruimte voor natuurontwikkeling.	
	Onderkant klasse	*Bovenkant klasse*
++++	> 3000 ha	n.v.t.
+++	1000 ha	3000 ha

++	500 ha	1000 ha
+	100 ha	500 ha
0	0 ha	100 ha

Versmallen Waal
Oevergeulen of geulen door de uiterwaard geven kansen voor natuur en natuurontwikkeling. Uitgaande van geulen van enkele tientallen meters breed en een lengte van 50 km is het areaal in de orde van enkele honderden hectares. Score '**+**'.

Versmallen Waal en ophogen Waalbodem
Het ophogen van de Waal geeft geen extra areaal. De score blijft '**+**'.

Versmallen Waal en verbreden Boven-IJssel
Het verbreden van de Boven-IJssel geeft enkele tientallen hectares aan areaal voor natuurontwikkeling. De score blijft '**+**'.

Verruwen van de Waalbochten
Het verruwen van de Waalbochten voegt geen areaal toe. Scores '**0**'.

Tabel 5.11 Samenvatting effectbepaling Natuur en ecologische waterkwaliteit, aspect ruimte voor natuurontwikkeling

Traject voor effectbepaling	Versmallen Waal	Versmallen en ophogen Waal	Versmallen Waal en verbreden IJssel	Verruwen buitenbochten Waal
Rijntakken	+	+	+	0

5.4 Kosten en uitvoerbaarheid

De maakbaarheid van de afvoerverdeling bij laagwater is sterk verbonden met of de voorziene maatregelen praktisch uitvoerbaar zijn en of de kosten acceptabel zijn. Ook is het relevant of de maatregelen goed faseerbaar en uitbreidbaar zijn (adaptief). Voor elk van de maatregelen geven we een beschouwing van de uitvoerbaarheid en de kosten. Voor een globale kosteninschatting maken we gebruik van het 'memo eenheidskosten IRM' (Kind et al., 2022) met prijspeil 2021.

Versmallen Waal
Het versmallen van de Waal met langsdammen en daarachter geulen is praktisch maakbaar gebaseerd op de pilot-langsdammen die al zijn uitgevoerd. Voor de faseerbaarheid (benedenstrooms of bovenstrooms beginnen) zijn de aanbevelingen uit de studie 'Uitwerking beleidskeuze Rivierbodemligging' leidend. Ten aanzien van laagwaterafvoerverdeling zijn langsdammen niet adaptief; een eenmaal gekozen ligging van de langsdammen kan niet eenvoudig gewijzigd worden. Regelknoppen als de hoogte en breedte van drempels zorgen maar voor beperkte adaptiviteit voor de afvoerverdeling. De eenheidskosten per strekkende kilometer

langsdam incl. (maximaal) 80 m brede oevergeul zijn 9,5 M€. Dit geeft aanlegkosten van orde 500 M€ (prijspeil 2021).

Versmallen Waal en ophogen Waalbodem

Het ophogen van de Waalbodem is op (zeer) lange termijn een mogelijkheid om meer afvoer naar de IJssel te krijgen. De bodem groeit met de benodigde maatregelen in langzaam tempo naar een hoger morfologisch evenwicht toe. Dit duurt naar verwachting tientallen jaren en geeft dus op korte termijn geen extra afvoer naar de IJssel. Met gericht suppleren kan er al wel iets extra afvoer naar de IJssel gerealiseerd worden. Dit is een adaptieve maatregelen, omdat hoeveelheden en locaties elke keer aangepast kan worden. Om op kortere termijn over een lange afstand een hogere Waalbodem te realiseren is een eenmalige megasuppletie nodig. Het benodigde volume is ca. 2,5 miljoen m^3. Het volume is dermate groot dat het moeilijk uitvoerbaar is, er moet immers voldoende geschikt sediment zijn. De kosten voor een eenmalige suppletie zijn orde 120 M€ uitgaande van eenheidskosten van €47 per m^3.

Versmallen Waal en verbreden Boven-IJssel

Het verbreden van de Boven-IJssel kent een belangrijke ontwerpopgave. In deze studie is de oever aan één zijde in z'n geheel richting de uiterwaard verschoven. Hiermee komt het in de knel met bestaande structuren en gebruik in de uiterwaard. Denk aan zomerkades, aanlegplaatsen, bomen en hoogwatervrije terreinen. In welke mate dergelijke locaties vermeden kunnen worden of hoe het inpasbaar is op dergelijke locaties bepaalt sterk hoe maakbaar de maatregel is. Dit is ook zeer bepalend voor de kosteninschatting. De eenheidskosten voor zomerbedverbreding zijn 0,35 M€ per meter verbreding per kilometer lengte. Dit geeft kosten in de orde van 50 M€[11]. Dit getal houdt slechts beperkt rekening met lastiger in te passen locaties.

Verruwen van de Waalbochten

Het verruwen van de Waalbochten is mogelijk geen duurzame, toekomstbestendige maatregel omdat het sterke morfologische ontwikkeling veroorzaakt. Als het verruwen via suppleties gebeurt, moet dit dus regelmatig herhaald worden. Het benodigde materiaal dient daarbij beschikbaar te zijn. De kosten zijn minimaal orde 30 M€ uitgaande van suppleren in de diepe buitenbochten[12].

[11] Als er in plaats van een zomerbedverbreding wordt gekozen voor een bypass door de Hondsbroeksche Pleij zijn de kosten orde 30 M€, uitgaande van eenheidskosten van €43 per m^3 vergraving, en dimensies L x B x h van 4 km x 50 m x 3,5 m

[12] We hebben het suppletievolume bepaald t.o.v. het referentievlak OLR-4,5 m zoals deze in de aanvullende analyse in paragraaf 4.4.2 is gebruikt.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In deze studie is onderzocht in hoeverre met maatregelen in het splitsingspuntengebied de wenselijke afvoerverdeling bij laagwater is te realiseren en wat de consequenties zijn voor het bovenrivierengebied en de rivierfuncties. Van een viertal basismaatregelen is het effect bepaald waarnaar in diverse aanvullende analyses beter inzicht is verkregen in de bandbreedte van het effect van de maatregelen.

De door Deltaprogramma Zoetwater voorlopig meegegeven gewenste afvoerverdeling bij laagwater is conform (in grote lijnen) de 2e Nota Waterhuishouding. Dit houdt in dat dat bij afnemende afvoeren op de Rijn zo lang mogelijk, tot een afvoer van 1300 m^3/s bij Lobith, minimaal 285 m^3/s via de IJssel en 30 m^3/s via de Nederrijn wordt afgevoerd. Dat is bij deze Lobithafvoer ca. 57 m^3/s extra naar de IJssel t.o.v. de huidige situatie.

De resultaten (Tabel 6.1) tonen dat een combinatie van maatregelen nodig is om het doelbereik te halen. Het enkel versmallen van de Waal levert bij een Lobithafvoer van 1300 m^3/s ongeveer 40 m^3/s extra afvoer naar de IJssel op. Het verbreden van de IJssel levert 20 m^3/s op waarmee in combinatie met het versmallen van de Waal het doelbereik gehaald wordt. Het verruwen van de Waalbochten, door het opvullen van de diepe bochten met ruw materiaal of het aanleggen van bodemkribben, geeft tot maximaal 20 m^3/s extra naar de IJssel. Het effect neemt echter waarschijnlijk in de tijd af door morfologische ontwikkelingen.

Tabel 6.1: Conclusie resultaten

Maatregel	Extra IJsselafvoer naar IJssel bij afvoer Lobith 1020 m^3/s	Extra IJsselafvoer bij afvoer Lobith 1300 m^3/s	Afvoer Lobith waaronder stuw Driel volledig gesloten is
Referentie	-	-	1590 m^3/s
Versmallen Waal (30m)	+34 m^3/s	+40 m^3/s	1380 m^3/s
Versmallen (30m) en ophogen (20cm) Waal	+49 m^3/s	+56 m^3/s	1310 m^3/s
Versmallen Waal (30m) en verbreden IJssel (15m)	+52 m^3/s	+60 m^3/s	1290 m^3/s
Minimaal -Maximaal Verruwen Waalbochten	+10-21 m^3/s	+11-23 m^3/s	1520 - 1460 m^3/s

De aanvullende analyses hebben aangetoond dat:

- de effecten van individuele maatregelen optelbaar zijn; los doorgerekend leveren ze nagenoeg hetzelfde op als dat ze samen worden doorgerekend.

- 1D modelberekeningen qua orde grootte hetzelfde resultaat opleveren als 2D modelberekeningen. 1D modelberekeningen zijn daarom een geschikte methode om het effect van maatregelen te verkennen
- de sturing van stuw Driel het effect sterk beïnvloed. Rekenen zonder stuwsturing is aanbevolen om de effecten van maatregelen te bepalen
- de lateralen de effecten van maatregelen nauwelijks beïnvloeden. Het rekenrooster mag ook grof zijn mits de maatregel redelijk goed op het rooster te projecteren is
- afvoer door de oevergeul bij lage afvoeren de effectiviteit van het versmallen van de Waal sterk reduceert. Afvoer door de oevergeul is gewenst vanuit ecologie, maar dit geeft dus een tegenstrijdig belang met de gewenste extra afvoer naar de IJssel.
- extra afvoer door de Nederrijn-om zoutindringing in West-Nederland tegen te gaan, voor ca. 1/3 ten koste gaat van de afvoer naar de IJssel, maar dat maatregelen om extra afvoer naar de IJssel te trekken even effectief blijven.

Voor de effecten op de rivierfuncties zijn diverse ontwerpkeuzes rondom de maatregel 'versmallen Waal' van belang. Ten behoeve van hoogwaterveiligheid is de dimensionering van de oevergeul achter de langsdam van groot belang. Een grote, ruime oevergeul levert tot zeker 10 cm waterstandsdaling op in het traject langs de langsdammen. Met een geschiktere inrichting van de oevergeul voor natuur wordt waterstandsdaling ingeleverd, maar komt er wel veel areaal voor natuur beschikbaar en kan voor natuur geschiktere hydro- en morfodynamiek langs de Waal gerealiseerd worden. De versmalling van de Waal bij lage afvoeren stuwen de laagwaterstanden op, waarmee de bevaarbare diepte voor scheepvaart toeneemt.

Het verbreden van de IJssel resulteert bij hoge afvoeren ook voor een daling van de hoogwaterstanden en geeft ook kansen voor natuur als de nieuwe oevers natuurlijk worden ingericht. Mits de maatregel gecombineerd wordt met het versmallen van de Waal, komt er voldoende extra afvoer naar de Waal om negatieve effecten op de waterdiepte te mitigeren. Het ophogen van de Waal en het verruwen van de Waal beïnvloeden de rivierfuncties met name via de verandering van de afvoerverdeling, zowel bij hoog- als bij laagwater. Op de trajecten die opgehoogd of verruwd worden gaan de hoogwaterstanden omhoog.

6.2 Aanbevelingen

Met de resultaten van de doorgerekende maatregelen bevelen we aan om te onderzoeken of met de maatregelen het doelbereik ten aanzien van zoetwatervoorziening en de vulling van het IJsselmeer kan worden gerealiseerd. Om de afvoerverdeling zoals afgeleid uit de 2^{e} Nota Waterhuishouding te bereiken, is enkel het versmallen van de Waal niet voldoende. Toch lijkt dit de meest kansrijke maatregel, waarbij het verbreden van de IJssel mogelijk nog extra afvoer naar de IJssel kan trekken. De verbreding van de IJssel is echter nog niet in vergelijkbaar detailniveau onderzocht als het versmallen van de Waal. Zo is nog niet duidelijk hoe deze in de praktijk ingepast kan worden. Ook het optimaliseren van de verbreding ten aanzien van alle rivierfuncties is belangrijk.

7 Referenties

Asselman N, Maas B, Sloff K, 2025.
Maakbaarheid afvoerverdeling Rijntakken laagwater. Deltares: 11210367-002-ZWS-0007.

Becker A, 2021
Slim suppleren Boven-Waal. Deltares: 11206792-014-ZWS-0001

Gensen MRA, Warmink JJ, Huthoff F, Hulscher SJMH, 2020.
Feedback Mechanism in Bifurcating River Systems: the Effect on Water-Level Sensitivity. Water 12(7), artikel 1915.

Hydrologic, 2022.
Evaluatie stuwprogramma Driel. P1342.

Kind J, Barneveld H, Gensen M, 2020
Memo Eenheidskosten IRM. Bijlage B van Kengetallen kosten-batenanalyse Integraal Riviermanagement.

Sieben A, 2014
Schatting alluviale ruwheid in binnenbochten met constructies, Arjan Sieben 18-03-2005, met aanvulling vaste laag Boven-Rijn d.d. 26-03-2014 (Word document)

Bijlagen

A Vergelijking met vereffende afvoerverdeling

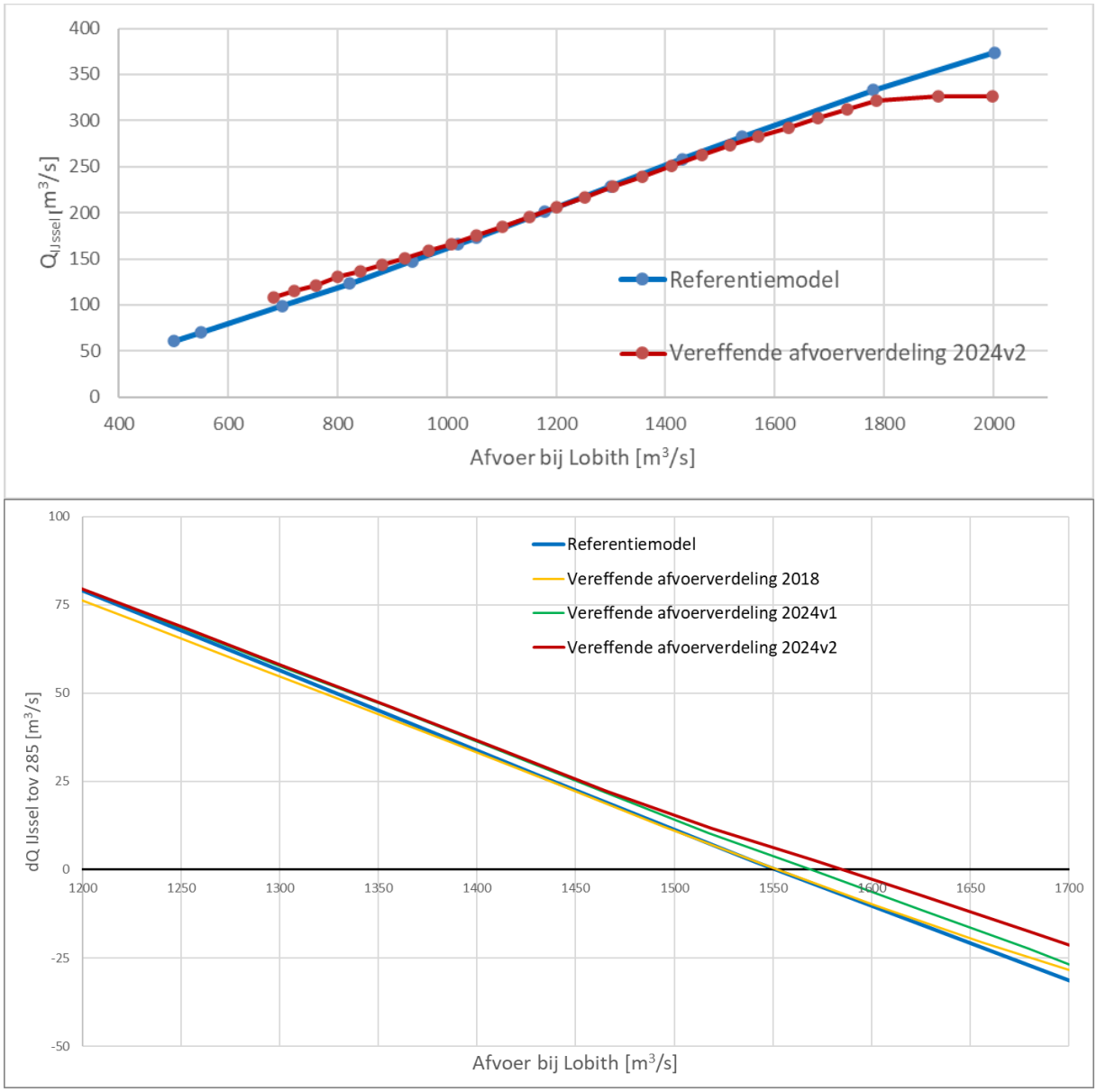
Als gewenste afvoerverdeling wordt voorlopig de formulering in het POW IRM (2023) gebruikt: vanaf 1300 m^3/s Boven-Rijn minimaal 285 m^3/s naar IJssel en 30 m^3/s naar de Nederrijn. Wanneer wordt uitgegaan van de huidige afvoerverdeling (2024v2) is gesteld dat er bij 1300 m^3/s circa 55 m^3/s extra naar de IJssel moet gaan. Dit is daarmee het beoogde effect van de maatregel(en).

Dit beoogde effect wordt echter niet altijd bereikt met de verschillende maatregelen. In die gevallen is het wel goed om te weten bij welke afvoer Boven-Rijn dit wel wordt bereikt. Hierover is afgesproken dat RWS informatie aanlevert welke afvoerveranderingen voor de IJssel gelden bij andere afvoeren op de Boven-Rijn. In 2024 waren er ontwikkelingen rondom de vereffende afvoerverdelingen, waardoor er twee verschillende versies zijn. De eerste versie is in een eerdere fase van het project al gebruikt bij de 1D-gevoeligheidsanalyses en hieruit is het beoogde effect van 55 m^3/s afgeleid. De tweede versie is ontwikkeld als verbeteringsslag waarbij afvoerwaardes o.b.v. varende stroomsnelheidsmetingen zijn meegenomen.

Er is een vergelijking uitgevoerd [13] tussen de vereffende afvoerverdeling van 2018, 2024 v1 en 2024 v2 (Figuur A.1). Uit deze vergelijking blijkt dat de dQ (het verschil t.o.v. 285 m^3/s naar de IJssel) iets groter is in beide 2024 versies t.o.v. de afvoerverdeling 2018. Dit is naar verwachting aangezien de bodemdaling in de Boven-Waal ervoor zorgt dat er steeds meer afvoer naar de Waal gaat en minder naar de IJssel. 285 m^3/s naar de IJssel wordt bereikt bij afvoeren tussen 1550 (2018) en 1590 m^3/s (2024 v2).

De resultaten van het referentiemodel komen goed overeen met de vereffende afvoerverdeling 2024 v2 (Figuur A.1), ondanks de gedane aannames voor de modellering (geen lateralen, geen stuwsturing, bodem 2021).

[13] Excel-bestand toegestuurd door Susanne Quartel (RWS-WVL)



Figuur A.1: Boven: vergelijking IJsselafvoer bij de vereffende afvoerverdeling 2024 v2 en de resultaten van het referentiemodel. Onder: vergelijking afvoerverschil IJssel t.o.v. 285 m^3/s voor de vereffende afvoerverdelingen 2018, 2024 v1, 2024 v2 en het referentiemodel

B Baselinemaatregelen t.b.v. referentie

Rivierklimaatpark IJsselpoort:
ij_ijsseld_b1
ij_velp_a1
ij_koppenw_a1
ij_rheder_e1
rt_zbhgt21_a1
wl_zbhgt20_a1
wl_vlnym21_a1
wl_bkerl20_a1
ij_klimprf_b1
ij_ijdwrd_v11
ij_ijdwrd_v12
ij_ijdwrd_v13
ij_rheder_v10
ij_rheder_v11
ij_rheder_v12
ij_klimprf_c1

Havikerwaard Zuid:
ij_havref_d1
ij_havikrw_d1
ij_havik_v01
ij_havik_v12
ij_havik_v16
ij_havzuid_a1
ij_hw8an1a_a1
ij_havik_v17
ij_havik_v18
ij_havik_v19
ij_havik_v20
ij_havik_v21
ij_havik_v22

Reparatiemaatregel:
ij_klimprf_d1

Maatregelen Neder-Rijn
nr_dvsarnh_b1
nr_konpley_a1

Maatregel voorkeursalternatief RKP (W+B):
ij_rkpvka_wb3_a1

C Baseline schematisaties

C.1 Versmalling van de Waal met 30 m

Maatregel “rt_versmwl_a1” bestaat uit de schematisatie van langsdammen tussen rivierkilometers 867,2 en 911,7. Dit is vanaf de Pannerdense Kop en sluit aan op de langsdam bij Wamel.

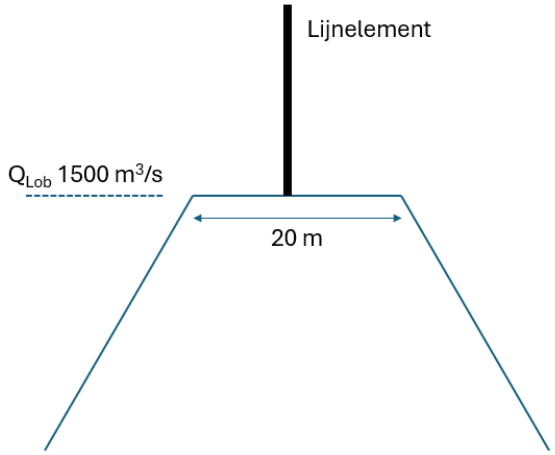
De as van de langsdam ligt parallel aan de oeverlijn op een afstand van 30 m (Figuur C.1). Tussen rivierkilometer 867,2 en 822,3 liggen de langsdammen in de binnenbochten van Hulhuizen, Erlecom en Doornik. Vanaf Nijmegen ligt de langsdam volledig langs de linkeroever, ondanks dat de rivier licht slingert. Naar verwachting is het effect op de afvoerverdeling klein omdat dit traject ver van het splitsingspunt af ligt. De uiteindes van de langsdammen zijn aangesloten op de bestaande oevers, waardoor de geul achter de langsdammen bij het afvoerbereik binnen deze studie afgesloten is van de hoofdgeul.



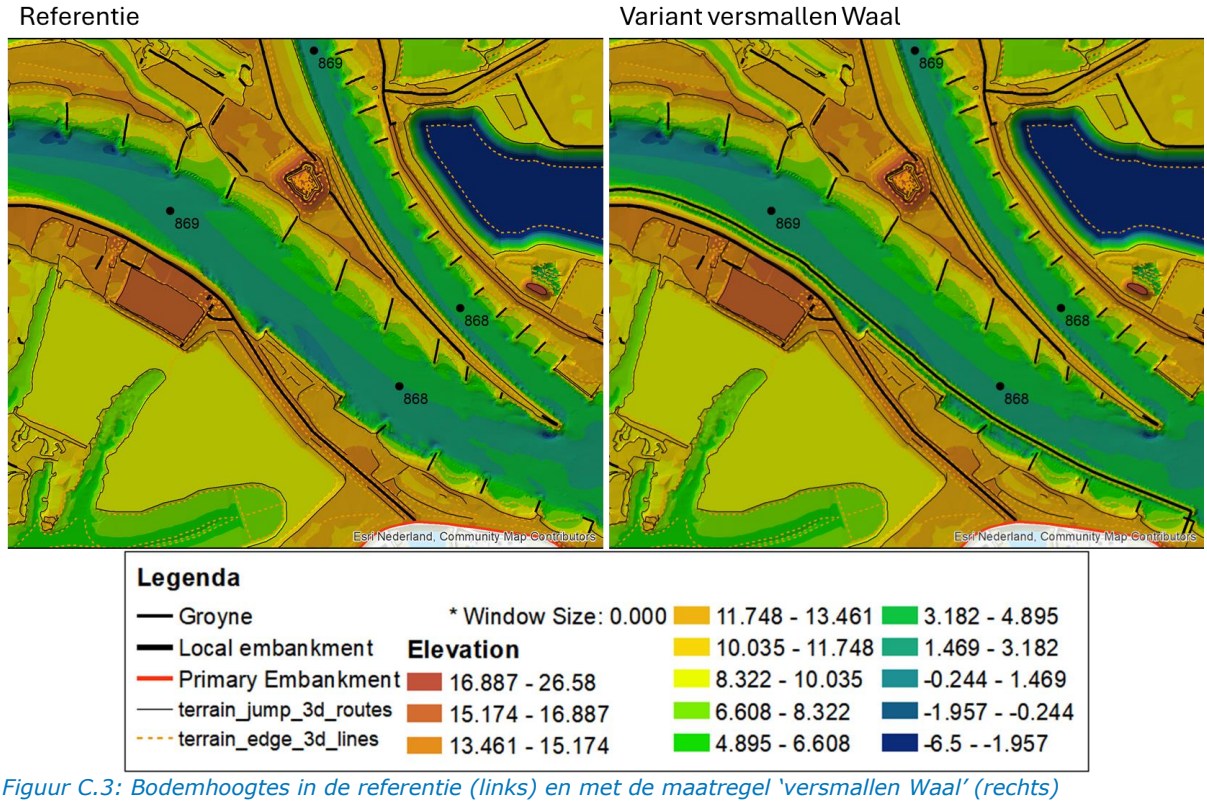
Figuur C.1: Ligging van de langsdammen

Schematisatie

De as van de langsdam is geschematiseerd met een “*elevated_line*” als type “*Local embankment*” met een kruinhoogte van 9999. Daarnaast is een deel van het grondlichaam meegenomen in het bodemhoogtemodel (Figuur C.2). Hiervoor is langs een bufferlijn op 10 m vanaf de as een “*edge_line*” ingetekend. Aan deze lijn is de hoogte toegekend die correspondeert met de waterstand bij een Lobithafvoer van 1500 m^3/s. Daarnaast zijn de bodemhoogtepunten binnen een buffer van 20 m rondom de langsdam verwijderd. Een voorbeeld van het resulterende bodemhoogtemodel staat in Figuur C.3. Er zijn geen aanpassingen gedaan aan de ruwheids- of kalibratiepolygonen. Ook zijn geen aanpassingen gedaan aan bestaande kribben en oevergeometrie.



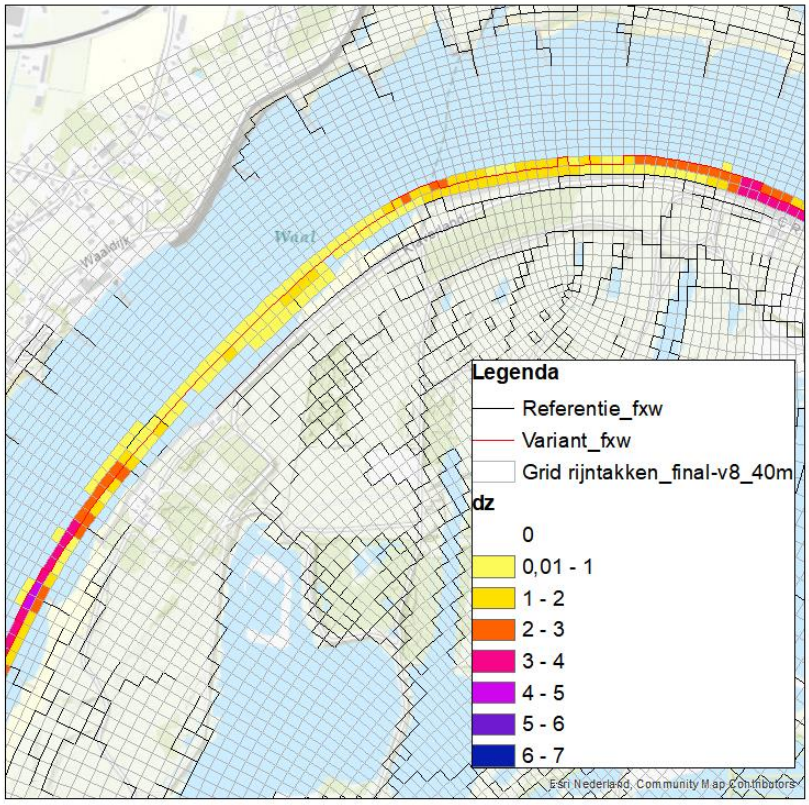
Figuur C.2: Boven: Dwarsdoorsnede langsdamschematisatie welke overeenkomt met de schematisatie van de bestaande langsdammen.



Figuur C.3: Bodemhoogtes in de referentie (links) en met de maatregel 'versmallen Waal' (rechts)

Resultaat schematisatie op het rooster

Figuur C.4 toont hoe de schematisatie op het 40m grid terecht komt. De 'elevated line' wordt verplaatst naar de celranden als 'fixed weir' (fxw). Grotendeels komt deze op ca. 20 m van de rand van de hoofdgeul te liggen. Op enkele segmenten komt die verder de rivier in en ligt de fixed weir op 40 m van de rand van de vaargeul. De bodemhoogtes komen vrij consistent op het rooster. Ca. 40 m vanaf de rand van hoofdgeul komt de bodem omhoog.

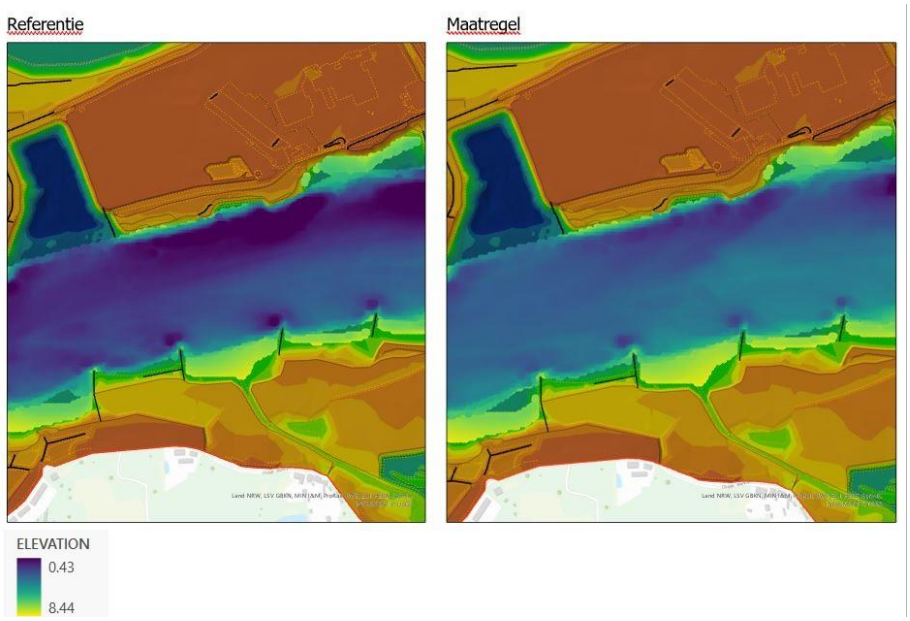


Figuur C.4: Voorbeeld van hoe de 'elevated line' op het rooster geprojecteerd wordt en wat de bodemhoogteverschillen zijn per cel ten opzichte van de referentie.

C.2 Ophoging van de Waalbodem met 20 cm

Schematisatie

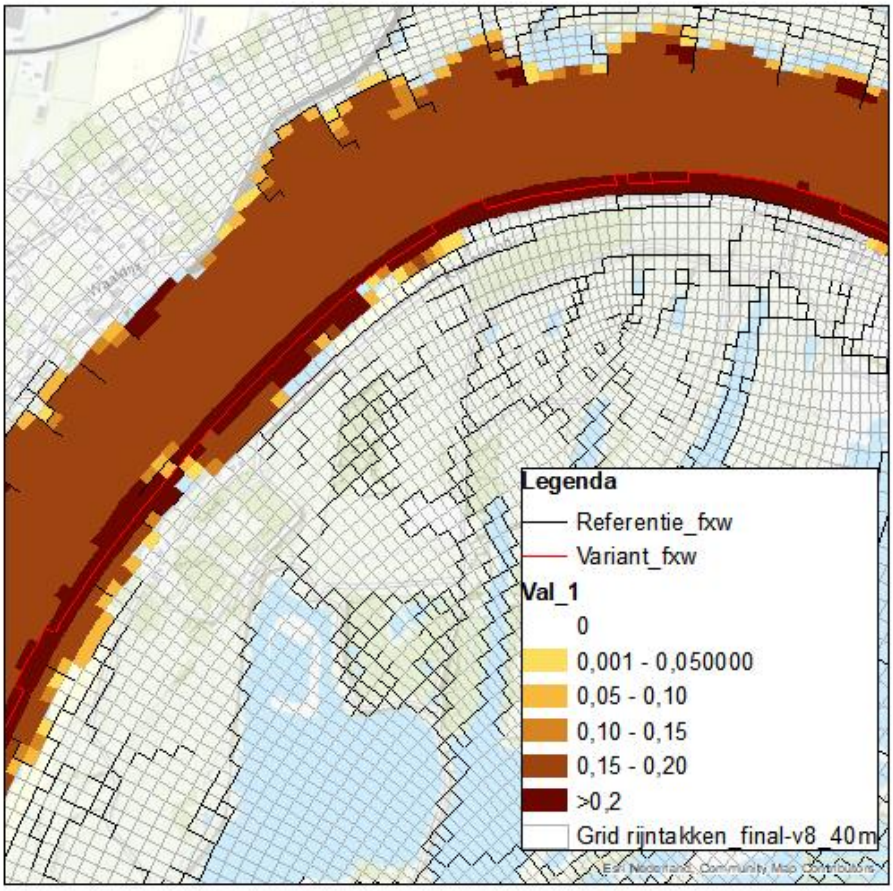
Voor deze maatregel zijn alle 'bed elevation points' met 20 cm opgehoogd. Het resultaat (ingemixt) is te zien in Figuur C.5.



Figuur C.5: Voorbeeld van de bodemhoogtes in baseline.

Resultaat schematisatie op het rooster

De 20 cm hogere bodem komt goed op het rooster terecht (Figuur C.6).



Figuur C.6: Bodemhoogtes van de versmalling van de Waal en de ophoging van de Waalbodem ten opzichte van de referentie geprojecteerd op het rekenrooster.

C.3 Verbreding van de IJssel met 15 m

Schematisatie

Tussen kilometers IJ_879 en IJ_889 is de IJssel op de linkeroever met 15 meter verbreed. Hiervoor zijn bestaande objecten 15 meter t.o.v. de rand van het zomerbed landinwaarts verplaatst. Lijnen die verplaatst en of verwijderd worden, bevinden zich alleen rondom de oever.

Objecten die verplaatst zijn:

- Breuklijnen
- Hoogteverschillijnen
- Zomerbedhoogten
- Kribben
- Sectiebestand
- Ruwheid

Figuur C.7 toont hoe de verplaatsing[14] van *3d edge lines* (breuklijnen) en *jump lines* (hoogteverschillijnen) in zijn werk gaat.

Verplaatsing '3d edge lines' / breuklijnen



De grijze lijnen zijn de ligging van breuklijnen in de referentie situatie. Deze zijn 15 meter landinwaarts verplaatst en worden de nieuwe oranje lijnen. De omcirkelde grijze lijn uit de referentie is niet verplaatst, maar verwijderd.

Verplaatsing 'terrain jump lines' / hoogteverschillijnen

[14] Verplaatsen gebeurt middels een mix van Arcgis functionaliteiten 'copy parallel' en 'move' naar inzicht van de modelleur. Er wordt hierbij gestreefd naar een realistische verplaatsing 15 m landinwaarts.

	Voor de hoogteverschillijnen zijn de blauwe lijnen verplaatst en zijn de rode lijnen geworden.

Figuur C.7 Voorbeeld van verplaatsing van breuk- en hoogteverschillijnen

Figuur C.8 toont hoe de verplaatsing van kade- en kriblijnen en zomerbedhoogten in zijn werk gaat.

Verplaatsing 'elevated lines' / kades en kribben	**Verplaatsing 'bed level points' / bodemhoogtepunten**
	
De gele lijnen zijn de ligging van de kade en/ of kriblijnen in de referentie situatie. Deze zijn 15 meter landinwaarts verplaatst en worden de nieuwe zwarte lijnen. De kriblijnen zijn hier ~15 meter waardoor de lijn exact in zijn geheel verplaatst wordt, maar bij langere lijnen is dit niet het geval.	Op de oeverlijn zijn elke 2.5 meter een dwarsprofiel aangemaakt. De dwarsprofielen hebben aan weerszijden een lengte van 20 meter. Vanaf de oeverlijn zijn alleen de oranje punten beschouwd. Dit zijn punten die 15 meter verplaatst en verwijderd zijn. Deze punten zijn aan dichtstbijzijnde dwarsprofiellijn gekoppeld en over die lijn zijn de punten 15 meter verplaatst en resulteren in de groene punten. De rode punten blijven intact.

Figuur C.8: Voorbeeld van verplaatsing van kade- en kriblijnen en zomerbedhoogten

Figuur C.9 toont hoe de verplaatsing van kade- en kriblijnen en zomerbedhoogten in zijn werk gaat.

Aanpassing secties	**Aanpassing ruwheid**



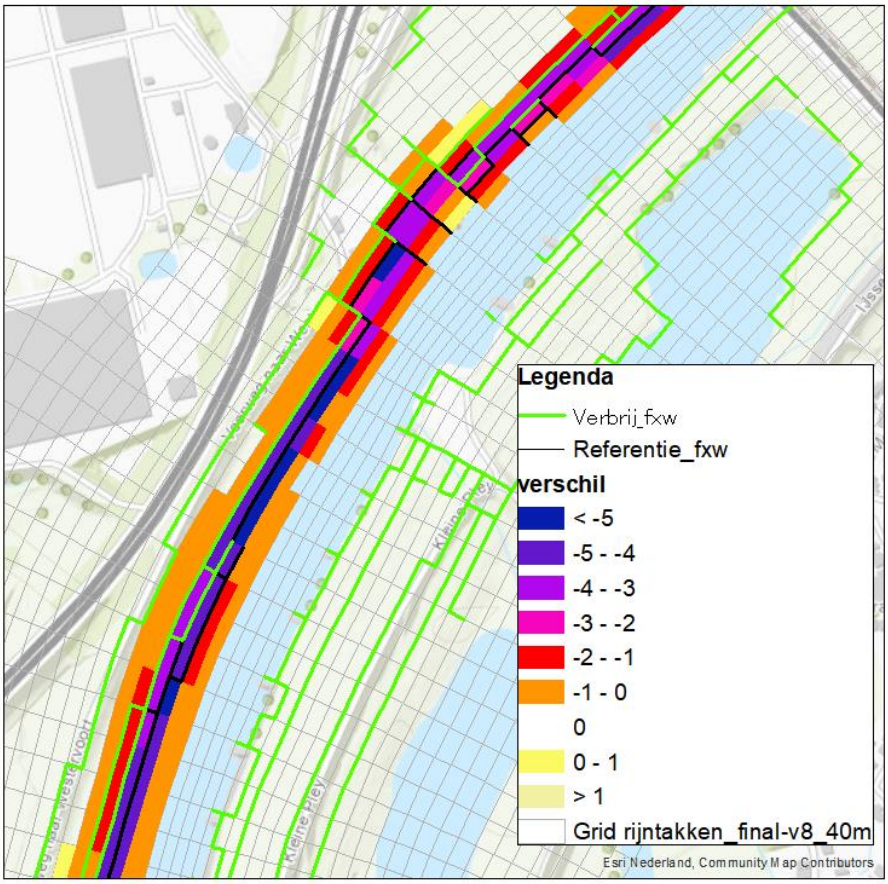


Alles wat rechts van de oeverlijn ligt wordt water. Alles wat links van de oeverlijn wordt opgevuld zoals het was. Voor de maatregel betekent dat bestaande vlak aangepast (geüpdatet) wordt met nieuwe sectie 1 en 2 vlakken.	Voor de ruwheid geldt hetzelfde als het sectie bestand, behalve dat er geen secties gewijzigd worden, maar ruwheidscode. De uitbreiding van het zomerbed krijgt code 2025 en de verplaatsing van de kribvakken 201 (conform huidige situatie)

Figuur C.9: Aanpassing secties en ruwheid

Resultaat schematisatie op het rooster

Figuur C.10 laat zien het de maatregel op het rooster geprojecteerd wordt. De meeste 'fixed weirs' verplaatsen met 20 m, iets meer dan de beoogde 15 m. In een breed vlak rondom de oeverlijn worden de bodemhoogtes beïnvloed.

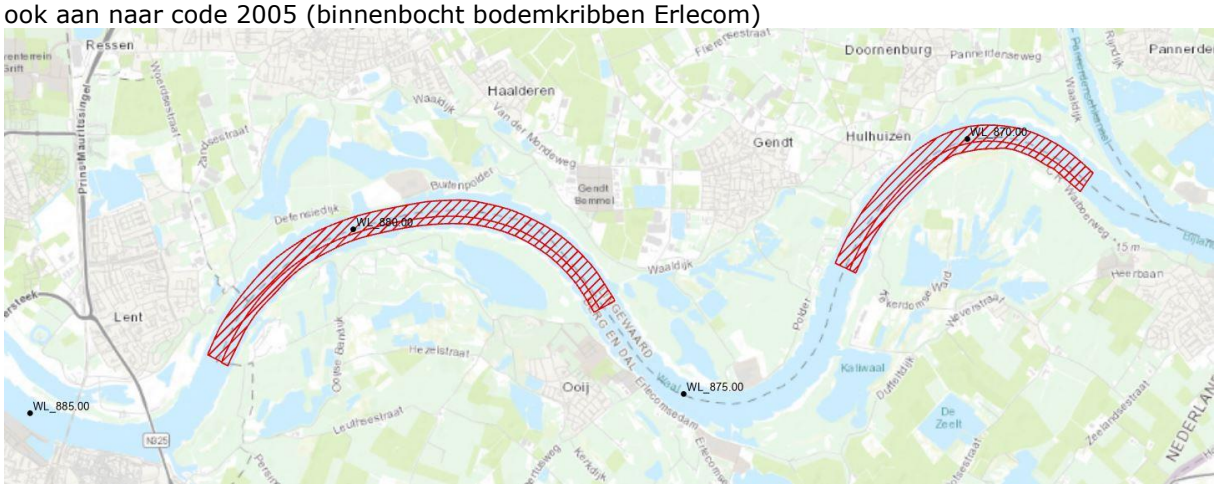


Figuur C.10: Voorbeeld van verschil in bodemhoogtes tussen de referentie en de variant en de ligging van 'fixed weirs'.

C.4 Verruwing van de Waalbochten

Schematisatie

We passen de ruwheidsvlakken in het zomerbed aan (Figuur C.11). Over een breedte van 2/3e van de zomerbedbreedte veranderen we ruwheidscode naar die van Erlecom (code 2004) in de variant met maximale verruwing en naar die van St. Andries (code 2012) in de variant met minimale verruwing. In de variant met maximale verruwing passen we de ruwheidscode van de binnenbocht ook aan naar code 2005 (binnenbocht bodemkribben Erlecom)



Figuur C.11: Schematisatie van de langsdammen. Boven: trajecten waarin de ruwheid is aangepast. Onder: overgangsgebieden waarin de ruwheid niet is aangepast.

D Resultaten in tabellen

	Afvoer Waal [m³/s]					Afvoer IJssel [m³/s]				
Afvoer	Referentie	Versmallen Waal	Versmallen en ophogen Waal	Versmallen Waal / Verbreden IJssel	Maximaal verruwwl	Referentie	Versmallen Waal	Versmallen en ophogen Waal	Versmallen Waal / Verbreden IJssel	Maximaal verruwwl
S__500	410	393	383	383	397	60	77	87	87	73
S__550	450	432	421	421	437	70	88	99	99	83
S__700	571	549	536	533	556	99	121	134	137	114
S__823	670	643	629	625	652	123	150	164	168	141
S__937	760	728	714	710	740	147	179	193	197	167
S_1020	825	791	775	772	804	165	199	215	218	186
S_1054	851	816	801	798	830	173	208	223	226	194
S_1179	948	910	894	891	925	201	239	254	258	224
S_1301	1042	1002	987	982	1019	229	269	284	289	252
S_1430	1142	1100	1084	1079	1119	258	300	315	321	281
S_1540	1227	1185	1171	1164	1204	282	325	339	347	306
S_1780	1417	1376	1362	1350	1397	333	374	388	400	353
S_2003	1599	1554	1539	1524	1579	374	419	434	449	394

	Extra afvoer naar de IJssel [m³/s]			
Afvoer	Versmallen Waal	Versmallen en ophogen Waal	Versmallen Waal en verbreden IJssel	Maximaal verruwen Waal
S__500	17	27	27	12
S__550	18	28	29	13
S__700	23	35	38	15
S__823	27	41	45	18
S__937	31	46	50	20
S_1020	34	49	52	21
S_1054	35	50	54	22
S_1179	38	53	57	22
S_1301	40	56	60	23
S_1430	42	57	63	23
S_1540	43	57	64	23
S_1780	41	54	67	20
S_2003	45	60	76	20

E Memo ruwheidswaardes en polygonen voor varianten “verruwen Waal”

Voor de studie BOA-Laagwater, berekent HKV de effecten van onder andere het verruwen en ophogen van de Waalbodem op de afvoer door de IJssel. Om een beeld bij de gevoeligheid van deze maatregelen te krijgen gaan we extra berekeningen uitvoeren met ophogen (en verruwen) van diepe buitenbochten in de Boven-Waal en het minder verruwen van de hele buitenbocht. In dit memo lichten wij de voorstellen voor de op te vullen polygoon en de ruwheidswaarde verder toe.

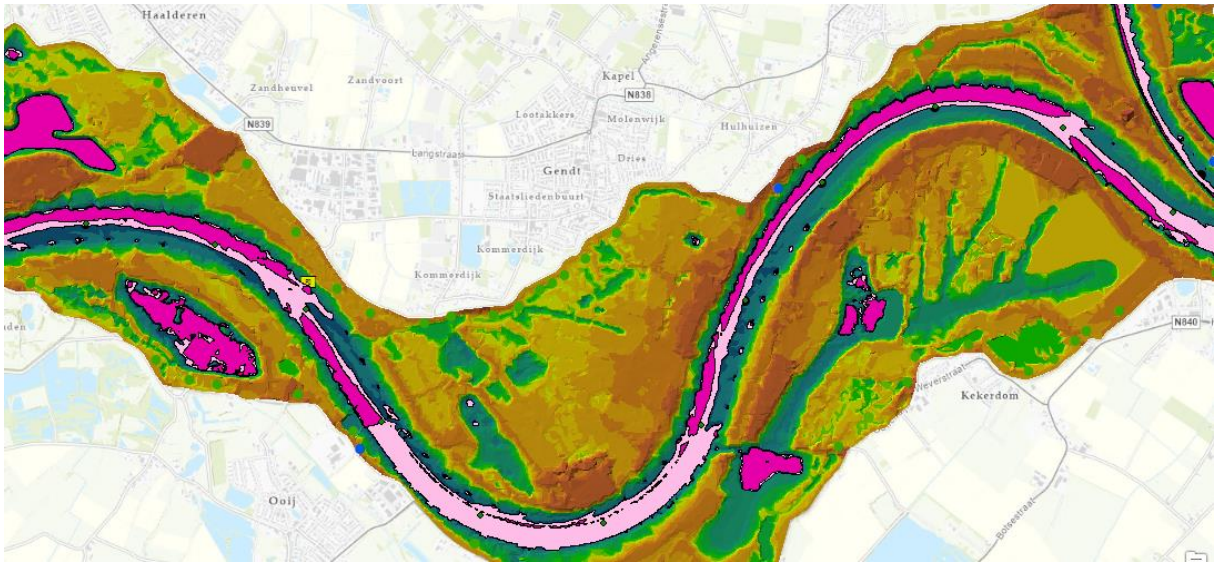
Bepaling vlakken voor ophogen buitenbochten Waal (+verruwen)

De variant ophogen buitenbochten Waal een variant die aansluit op het rapport “Slim Suppleren Boven-Waal” (Becker, 2021). Hierin zijn twee hoofdvarianten beschreven:

1. Opvullen van de diepe buitenbocht Hulhuizen tot OLR-3.5 m
2. Profielvolgend opvullen van de buitenbocht Hulhuizen met een laagdikte van 1 m tot maximaal OLR-4.5 m

Het effect op de afvoerverdeling op de Pannerdense Kop was berekend op 7 tot 9 m^3/s ten gunste van het Pannerdensch Kanaal bij OLA in het eerste jaar na suppleren. Dit effect dempt uit zodra de suppletie erodeert. Wanneer met een vaste laag wordt gerekend, is het effect enkele m^3/s groter. Het initiële effect op de waterstand op de Waal is orde 2,5 en 2,0 cm voor resp. variant 1 en 2. Hierbij moet wel rekening gehouden worden met het feit dat deze varianten met het DVR-model zijn doorgerekend, inclusief morfologische ontwikkeling.

Als we variant 1 toepassen op de hele Boven-Waal tot Nijmegen zien we zeer grote polygonen (lichtroze) waar er opgevuld moet worden (Figuur 1), ruim groter dan beschreven in Becker (2021). Deels komt dit door keuzes in Becker (2021), waar gekozen is voor een deel van de buitenbocht waar de suppletie wordt aangebracht. Dit lijkt een ietwat arbitrair ontwerp. De gehele Boven-Waal ophogen tot OLR-3.5 m lijkt niet realistisch, ook omdat het bodemkribbentraject onder OLR-3.5 m ligt. Geheel opvullen tot -4.5 m geeft een realistischer beeld van de diepe delen die opgevuld kunnen worden (donkerroze): buitenbochten en de erosiekuil achter de bodemkribben. We stellen dus voor om voor BOA-laagwaterafvoerverdeling de gehele Boven-Waal op te vullen tot OLR-4.5 m. Dat is een alsnog groter oppervlak dan in Becker (2021). De polygonen zijn hieronder weergegeven.



Bepaling ruwheid van voor de variant Verruwen Waal

Ruwheid van de bestaande vaste lagen cq. bodemkribben

De ruwheid van de eerste variant voor "verruwen Waal" is uitgegaan van een bodemkribben concept, zoals ook aanwezig bij Erlecom. Daarom zijn de ruwheidswaardes van de bocht bij Erlecom voor de ruwere trajecten overgenomen. Bij Erlecom heeft circa 2/3e van de breedte van het zomerbed heeft de ruwheid van de bodemkribben gekregen. In het overige 1/3e deel van het zomerbed is morfologische activiteit mogelijk. In dit morfologisch vrije deel is de amplitude van de bodemvormen, hoger dan in het overige deel van het riviertraject zonder bodemkribben.

De vaste laag cq. bodemkribben hebben een nikuradse ruwheidshoogte terwijl in het reguliere zomerbed de ruwheid berekend wordt met de versimpelde Van Rijn formule:

$$k = ah^{0.7}\left[1 - e^{-bh^{-0.3}}\right]$$

Waarin a en b de calibratie waardes zijn en h de waterdiepte.

De ruwheid van de bodemkribben/vaste laag is in de volgende stappen afgeleid (Sieben, 2014):

- Op basis van verhang en stroomsnelheidsmetingen is de ruwheidswaarde (k) van de vaste laag St. Andries bepaald (riza werkdocument 2002.202x).
- De ruwheidswaarde van de vaste laag Nijmegen en de bodemkribben Erlecom zijn afgeleid op basis van de verhouding in de ruimtelijke standaardafwijking van de bodemhoogte tussen de vaste laag st. Andries en Nijmegen/Erlecom (o.b.v. riza werkdocument 2004.186x).

De ruwheid van het morfologisch vrije deel van het dwarsprofiel (1/3e binnenbocht) is gebaseerd op de verhouding tussen de bodemvormamplitude in het deel van het traject zonder vaste laag ten opzichte van de binnenbocht bij de vaste laag cq. bodemkribben. De verhoudingen zijn als volgt (Sieben, 2014):

$$a_{Erlecom} = 1.27\ a_{traject\ Erlecom}$$
$$a_{Nijmegen} = 1.05\ a_{traject\ Nijmegen}$$
$$a_{St.Andries} = 1.37\ a_{traject\ St.Andries}.$$

Onderstaande geeft een overzicht van de ruwheidswaardes van de binnen- en buitenbocht bij de vaste lagen. Daarbij is voor een vergelijking de k-waarde van de binnenbocht bepaald voor een waterdiepte van 4,5 m.

Locatie	Ruwheids-code	Ruwheids-formule	Parameters	$k\,[m]$ bij $h = 4.5$ m
Erlecom buitenbocht	2004	White-Colebrook	$k = 0.68\ m$	
Erlecom binnenbocht	2005	Simpl. Van Rijn	$a = 0.100\ m^{0.3}$ $b = 2.5\ m^{0.3}$	0.23
Nijmegen buitenbocht	2007	White-Colebrook	$k = 0.63\ m$	
Nijmegen binnenbocht	2008	Simpl. Van Rijn	$a = 0.058\ m^{0.3}$ $b = 2.5\ m^{0.3}$	0.13
St. Andries buitenbocht	2012	White-Colebrook	$k = 0.34\ m$	
St. Andries binnenbocht	2013	Simpl. Van Rijn	$a = 0.070\ m^{0.3}$ $b = 2.5\ m^{0.3}$	0.16

Overwegingen voor de op te leggen ruwheid

Aansluiten bij de ruwheid van de bodemkribben bij Erlecom is op basis van bovenstaande tabel de meest "ruwe" variant. Om beeld te krijgen bij de gevoeligheid van de resultaten moet de variant waarbij de bochten "minder verruwd" worden, bijvoorbeeld met stortsteen of grof grind, een lagere ruwheid krijgen. Daarnaast is het vanuit modelleeroogpunt het beste om aan te sluiten bij reeds bestaande ruwheidscodes. Daarom stellen we voor om voor deze variant aan te sluiten bij de ruwheid van de vaste lagen Nijmegen of St. Andries. De k-waarde van St. Andries ligt tussen de ruwheidswaarde van de bodemkribben en de gekalibreerde binnenbochtruwheid bij Erlecom in. De k-waarde van de vaste laag bij Nijmegen is bijna gelijk aan die van de bodemkribben Erlecom en zal naar verwachting weinig verschil geven in de waterstanden en afvoerverdeling. Conclusie, we nemen de k-waarde van St. Andries voor de delen die we willen verruwen, maar niet zo drastisch als in de eerdere variant. Deze ruwheid gebruiken we voor de vlakken uit de eerdere variant (2/3e van de buitenbochten) en voor de polygonen die we opvullen.

Voor de binnenbocht met 'bodemkribben' houden we niet meer rekening met een toename van de morfologische activiteit (die wel te verwachten is) om de bandbreedte van het effect te kunnen bepalen. De oorspronkelijke ruwheden (kalibratiewaarden) worden dus gebruikt. In de variant 'opvullen bochten' geldt hetzelfde voor de vlakken die niet opgevuld worden, we houden de oorspronkelijke ruwheden aan. Ook hier is een toename van morfologische activiteit te verwachten, maar er is niet te voorspellen hoeveel en hoeveel ruwheid dit geeft.

Literatuur

Becker, A. (2021). Slim suppleren Boven-Waal. Deltares Rapport 11206792-014-ZWS-0001, Versie 0.1, 21 december 2021. In opdracht van Rijkswaterstaat WVL.

Sieben, A. (2014). Schatting alluviale ruwheid in binnenbochten met constructies, Arjan Sieben 18-03-2005, met aanvulling vaste laag Boven-Rijn 2013 d.d.26-03-2014 (Word document)

HKV lijn in water BV

Locatie Lelystad
Botter 11-29
8232 JN Lelystad

Locatie Delft
Informaticalaan 8
2628 ZD Delft

Locatie Amersfoort
Berkenweg 7
3818 LA Amersfoort

0320 294242
info@hkv.nl
www.hkv.nl