

Maakbaarheid afvoerverdeling Rijntakken laagwater



Maakbaarheid afvoerverdeling Rijntakken laagwater

Auteur(s)

Nathalie Asselman

Bart Maas

Kees Sloff

Maakbaarheid afvoerverdeling Rijntakken laagwater

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Wim Werkman
Referenties	-
Trefwoorden	Afvoerverdeling Rijntakken, laagwater

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	07-04-2025
Projectnummer	11210367-002
Document ID	11210367-002-ZWS-0007
Pagina's	74
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Nathalie Asselman Bart Maas Kees Sloff	

Samenvatting

Inleiding

De Rijn is de belangrijkste bron van zoetwater voor Nederland. Het Rijnwater verdeelt zich over Noord-Nederland (IJssel) en West-Nederland (Nederrijn en Waal) op de splitsingspunten in de rivier: Pannerdensche Kop en IJsselkop. De verdeling wordt grotendeels bepaald door de geometrie van de rivieren benedenstrooms van deze verdeelpunten.

Door ongelijke bodemerrosie in de Rijntakken benedenstrooms van de splitsingspunten is de geometrie veranderd. Hierdoor is de IJsselafoer bij laagwater sinds de jaren '80 afgenomen. Bij een lage afvoer van 1.300 m³/s te Lobith bedraagt deze afname ongeveer 55 m³/s. Deltaprogramma Zoetwater onderzoekt welke afvoerverdeling 'wenselijk' is om zo goed mogelijk aan de watervraag te kunnen voldoen. Vanuit het programma Integraal Riviermanagement (IRM)¹ wordt onderzocht of de gewenste afvoerverdeling ook 'maakbaar' is. Omdat nog niet bekend is hoe de 'wenselijke' afvoerverdeling er precies uit moet komen te zien, worden twee zaken beschouwd, te weten 1) de uitspraak in het POW IRM, waarbij is aangegeven dat bij afnemende afvoeren (tot een afvoer van 1.300 m³/s te Lobith) zo lang mogelijk minimaal 285 m³/s via de IJssel en 30 m³/s via de Nederrijn moet worden afgevoerd en 2) de afvoerverdeling zoals deze zich rond 1980 manifesteerde waarbij ook bij lagere afvoeren dan 1.300 m³/s te Lobith een groter aandeel naar de IJssel stroomde (de focus ligt hierbij op de Overeengekomen Lage Afvoer, OLA²). Bij een afvoer van ongeveer 1.000 m³/s te Lobith zou de IJsselafoer met ongeveer 30 m³/s toe moeten nemen.

Het onderzoek naar de maakbaarheid van de afvoerverdeling laagwater wordt uitgevoerd in meerdere fasen. Voorliggend rapport gaat over de eerste twee fasen waarin 1) een brede inventarisatie heeft plaats gevonden van maatregelen die de afvoerverdeling kunnen beïnvloeden en 2) waarbij met behulp van een 1D hydraulisch model een eerste verkenning is uitgevoerd naar de effectiviteit van maatregelen waarbij sprake is van aanpassing van het doorstroomprofiel.

Typen maatregelen

Om de afvoerverdeling bij laagwater zo te wijzigen dat meer water via de IJssel naar het noorden wordt afgevoerd is het nodig om de waterstanden op de Boven-Waal bij lage afvoeren te verhogen (er wordt dan meer water naar het Pannerdensch Kanaal gestuwd), en/of de waterstanden op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel te verlagen (zodat deze takken meer water gaan trekken).

Het effect van maatregelen op de afvoerverdeling laagwater

Eerder uitgevoerde studies en enkele indicatieve berekeningen wijzen op de volgende verschuivingen in de afvoerverdeling:

- Waterstanden op de Waal kunnen worden verhoogd door de bodem van het zomerbed op te hogen. Uit eerdere studies blijkt dat er (bij een Bovenrijnafvoer tussen de 600 en 1900 m³/s) per 10 cm bodemophoging ongeveer 6 m³/s extra afvoer naar het Pannerdensch Kanaal en de IJssel gaat.

¹ Sinds november 2024 gaat dit programma verder onder de naam Ruimte voor de Rivier 2.0 (RvR2.0). In dit rapport houden we echter nog de term IRM aan.

² Dit is de afvoer die tijdens een langjarige periode over een gemiddelde van twintig dagen per jaar zonder ijsgang wordt onderschreden

- Versmalling van het zomerbed van de Waal door langsdammen of kribverlenging leidt ook tot een verschuiving van de laagwaterafvoerverdeling. Afhankelijk van de manier waarop de maatregel wordt uitgevoerd leidt versmalling met 20 m over een afstand van 10 km (startend bij het splitsingspunt dan wel 10km benedenstrooms van het splitsingspunt) tot 7 à 15 m³/s extra IJsselafvoer bij een afvoer van 1020 m³/s te Lobith.
- De aanleg van een regelwerk in het zomerbed van de Waal nabij het splitsingspunt heeft beperkt effect op de afvoerverdeling en heeft bovendien ongewenste neveneffecten. Uit berekeningen blijkt dat wanneer een dam de helft van het zomerbed afsluit, dit bij een Bovenrijnafvoer van 1020 m³/s, maar tot 12 m³/s extra afvoer op de IJssel leidt. De enorme versmalling van het zomerbed over korte afstand leidt echter tot zeer hoge stroomsnelheden en erosie.
- De aanleg van een meestromende nevengeul onder het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij zou een 'vergelijkbaar effect' kunnen hebben als een regelwerk. Een meestromende nevengeul kan flexibel inzetbaar zijn, met mogelijk minder negatieve neveneffecten, maar dat moet nog worden onderzocht.

Dimensionering en effectiviteit maatregelen

Bij de eerder uitgevoerde studies is het effect van een maatregel vaak bekeken bij een beperkt aantal afmetingen van de maatregel en voor een beperkt aantal rivierafvoeren. Om een beter beeld te krijgen van de te verwachten effecten is onderzoek gedaan naar de invloed van verschillende mate van versmalling en/of ophoging van het zomerbed van de Waal en verbreding van het zomerbed van het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel op de afvoerverdeling bij laagwater. Hiervoor is gebruik gemaakt van een 1D hydraulisch model.

Voor de Waal is gerekend met een versmalling van het zomerbed die varieert van 30 tot 100 m. Er is gevarieerd met de lengte waarover de versmalling is gerealiseerd (1, 5, 10, 20 of 50 km lengte) en de locatie waar de versmalling start (splitsingspunt, bodemkribben Erlecom, vaste laag Nijmegen). Versmalling is het meest effectief wanneer deze wordt uitgevoerd over grote lengte en startend bij het splitsingspunt. In dat geval zou een versmalling met 30 m leiden tot ongeveer 20 m³/s extra afvoer naar de IJssel. Bij versmalling met 50 m neemt dit toe tot 30 à 40 m³/s (zie ook onderstaande samenvattende tabel).

Verbreding van het Pannerdensch Kanaal met 30 m leidt slechts tot 5 m³/s extra IJsselafvoer, omdat het verhang op het Pannerdensch Kanaal beperkt is vanwege stuwwerking. Verbreding van de Boven-IJssel lijkt effectiever: enkele tientallen m³/s extra afvoer naar de IJssel.

Nog grotere effecten zijn haalbaar wanneer meerdere maatregelen worden gecombineerd (zie Tabel 1-1).

De gewenste afvoerverdeling is maakbaar, maar vergt grootschalige maatregelen op de Waal en mogelijk ook de Boven-IJssel

De conclusie van voorliggend onderzoek is dat het (bij handhaving van de huidige rivierbodempligging) mogelijk is om de afvoerverdeling bij laagwater terug te brengen naar de verdeling zoals deze was ten tijde van de tweede nota waterhuishouding, maar dat dat grootschalige ingrepen vergt op zowel de Waal als de IJssel. Te denken valt daarbij aan versmalling van de Waal met 50 m, of een versmalling met 30 m in combinatie met een verbreding van de IJssel met 15 m, beide over een lengte van 50 km. Dit is echter een eerste inschatting die met een 2D hydraulisch model geverifieerd moet worden³.

³ Dit gebeurt in de volgende fase van deze studie.

Versmalling van de Waal over grote lengte heeft als voordeel dat het effect op de afvoerverdeling groot is, maar ook dat de afname van de Waalafvoer daardoor alleen benedenstrooms leidt tot lagere waterstanden en een afname van de waterdiepte. Wanneer versmalling alleen nabij het splitsingspunt wordt uitgevoerd, leidt de lagere Waalafvoer tot geringere waterdieptes, onder meer bij de vaste laag bij Nijmegen, waar reeds een knelpunt voor de scheepvaart is bij lage afvoeren.

Opgemerkt wordt dat veranderingen in het doorstroomprofiel van het zomerbed effect hebben op de afvoerverdeling bij een range aan afvoeren te Lobith. Het is niet mogelijk om de afvoerverdeling bij één afvoerniveau te Lobith te wijzigen. Wanneer vaste maatregelen in het zomerbed van de rivier leiden tot een toename van de IJsselafvoer bij een afvoer van 1.300 m³/s te Lobith, dan zal de IJsselafvoer ook bij lagere Rijnaafvoeren toenemen (ten koste van de Waal).

Tabel 1-1 Toename van de IJsselafvoer door verschillende typen maatregelen en bij verschillende afvoeren te Lobith, zoals berekend in deze studie met een 1D hydraulisch model

Maatregel (uitgevoerd over een lengte van 20 tot 50 km startend bij de Pannerdensche Kop)	indicatie effect bij verschillende afvoeren te Lobith		opmerking
	1000 m ³ /s	1.300 m ³ /s	
Bodem ophogen Waal met 20 cm	11-12	11-13	In overeenstemming met vuistregel afgeleid uit analyses nulalternatief: 6 m ³ /s extra IJsselafvoer per 10 cm bodemophoging Waal
bodem ophogen Waal met 50 cm	28-31	29-34	
versmallen Waal met 30 m	17-20	20-23	
versmallen Waal met 50 m	30-35	37-43	
versmallen Waal met 100 m	80-90	85-105	
verbreden Pannerdensch Kanaal met 30 m	5	5	
verbreden Boven-IJssel met 15 m	18-20	23-26	
verbreden Boven-IJssel met 30 m	30-35	40-47	
versmallen Waal met 30 m en ophogen met 20 cm	28-32	32-37	effect van losse maatregelen lijkt redelijk optelbaar (geldt voor meerdere combinaties)
versmallen Waal met 50 m en ophogen met 50 cm	60-68	68-78	
versmallen Waal 30 m en verbreden IJssel 15 m	36-41	45-52	
versmallen Waal 30 m, ophogen met 10 cm en verbreden IJssel met 15 m	42-48	50-60	
versmallen Waal met 30 m, ophogen met 20 cm en verbreden IJssel met 15 m	48-57	56-68	

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Achtergrond	9
1.2	De wenselijke afvoerverdeling	10
1.3	Onderzoek maakbaarheid afvoerverdeling laagwater	10
1.4	Dit rapport	10
2	Inventarisatie mogelijke maatregelen	11
2.1	Inleiding	11
2.2	Opties op hoofdlijnen	11
2.3	Veranderingen in rivierbodempligging	12
2.3.1	Ophogen rivierbodem	12
2.3.2	Opvullen erosiekuilen Waal	16
2.4	Veranderingen in breedte van het zomerbed Waal	17
2.4.1	Verkleining doorstroomprofiel Waal met langsdammen	17
2.4.2	Verkleining doorstroomprofiel Waal door kribverlenging	19
2.4.3	Afzinken van duwbakken Waal	19
2.4.4	Regelwerk zomerbed Waal nabij Pannerdensche Kop	20
2.5	Vergroten doorstroomprofiel Pannerdensch Kanaal en IJssel	21
2.5.1	Meestromende nevengeul bij Hondsbroeksche Pleij	22
2.6	Verandering bodemruwheid	23
3	Dimensionering en effectiviteit maatregelen	25
3.1	Inleiding	25
3.2	Modelaannames	25
3.3	Maatregelen Boven-Waal	26
3.3.1	Versmallen	26
3.3.2	Bodem ophogen	30
3.3.3	Combinatie van versmallen en bodemophoging	32
3.4	Maatregelen Pannerdensch Kanaal en Boven-IJssel	34
3.4.1	Doorgerekende maatregelen	34
3.4.2	Verbreden Pannerdensch Kanaal	35
3.4.3	Verbreden Boven-IJssel	36
3.5	Combinatie maatregelen Boven-Waal en Boven-IJssel	36
3.6	Verandering waterstand en waterdiepte	40
3.6.1	Verandering in waterstand en waterdiepte als functie van de afvoer te Lobith	40
3.6.2	Verandering in waterstand en waterdiepte in de lengterichting van de rivier	45
3.7	Effect sturing stuw Driel	48
3.8	Korte beschouwing op onzekerheden	49

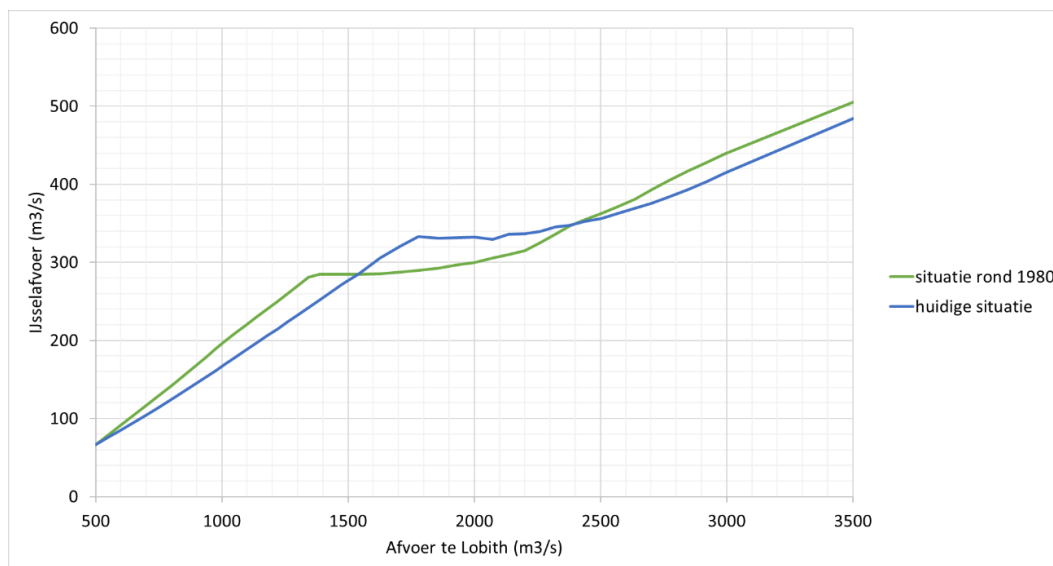
3.9	Conclusies van 1D analyse	51
4	Conclusies	53
4.1	Doel van deze studie	53
4.2	Is de 'gewenste' afvoerverdeling maakbaar?	53
4.3	Gedetailleerder overzicht bevindingen literatuurstudie en 1D modelsimulaties	54
5	Referenties	57
A	Methode aanpassing 1D-profielbreedte	58
B	Effectiviteit maatregelen	60
B.1	Bodemophoging Waal	60
B.2	Versmalling Waal	61
B.3	Combinatie bodemophoging en versmalling Waal	62
B.4	Verbreding Pannerdensch Kanaal	65
B.5	Verbreding Boven-IJssel	66
B.6	Versmalling Waal en verbreding Boven-IJssel	67
B.7	Sturing stuw Driel	68
C	Efficiëntie van de maatregelen	70
D	Effect huidige sturing stuw Driel over het afvoerbereik	72

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Sinds 2019 werken het Rijk, provincies, waterschappen en gemeenten samen aan het programma Integraal Riviermanagement (IRM)⁴. Dit programma heeft tot doel het Nederlandse riviereengebied toekomstbestendig te maken. Klimaatverandering en de respons van het riviersysteem op eerder menselijk ingrijpen (vanaf de bedijking van de rivier) zetten het functioneren van de rivieren en de functies en waarden die de rivieren voor de maatschappij hebben steeds meer onder druk. IRM streeft naar een toekomstbestendig riviersysteem dat meervoudig bruikbaar is, goed functioneert en aldus de door de maatschappij gevraagde diensten duurzaam kan leveren. Voor de (her)inrichting en het beheer van het riviereengebied betekent dit dat interventies onderdeel moeten uitmaken van een logisch geheel, passend bij het gedrag van de rivier en ondersteunend aan de diverse rivierfuncties. Een van deze functies is gerelateerd aan de zoetwaterbeschikbaarheid in Nederland.

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 Pannerdensch Kop en IJsselkop. Door ongelijke bodemerrosie in de Rijntakken nabij de splitsingspunten is de IJsselafvoer bij OLA (afvoer te Lobith = 1020 m³/s) sinds stabilisatie van het stuwprogramma (1977), vrij kort na de aanleg van stuw Driel (1970) circa 30 m³/s afgenomen ten gunste van de Waal (Figuur 1-1). Zonder verder ingrijpen zet deze trend zich door en zal in het jaar 2050 de IJsselafvoer bij OLA nog eens 25 m³/s minder ontvangen (Asselman et al., 2022a). Deze ontwikkeling is negatief voor de zoetwatervoorziening van gebieden die afhankelijk zijn van IJssel en IJsselmeer (ongeveer de helft van Nederland).



Figuur 1-1 Verschuiving van de afvoerverdeling sinds de jaren '80 (gebaseerd op Quartel, in prep).

⁴ Sinds november 2024 gaat dit programma verder onder de naam Ruimte voor de Rivier 2.0 (RvR2.0). In dit rapport houden we echter nog de term IRM aan.

Het project 'Afvoerverdeling over de splitsingspunten Rijntakken bij lage afvoeren' richt zich op de maakbaarheid van de 'gewenste' afvoerverdeling bij laagwater. De 'gewenste' afvoerverdeling staat (nog) niet vast. Om deze te bepalen loopt een gezamenlijk spoor met onder andere het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW). DPZW richt zich op de vraag wat vanuit de verschillende watervragers de optimale verdeling zou zijn. IRM kijkt vooral naar de 'maakbaarheid' van deze gewenste verdeling en wat dit betekent voor het riviersysteem zelf.

1.2 De wenselijke afvoerverdeling

De wenselijke afvoerverdeling wordt op dit moment door Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) onderzocht. Omdat nog niet bekend is hoe de wenselijke afvoerverdeling er precies uit moet komen te zien, wordt in deze studie allereerst gekeken naar het doel zoals beschreven in het POW IRM: 'Bij afnemende afvoeren wordt er zo lang mogelijk, tot een afvoer van 1.300 m³/s te Lobith, minimaal 285 m³/s via de IJssel en 30 m³/s via de Nederrijn afgevoerd'. Dit betekent dat bij een afvoer van 1.300 m³/s te Lobith ongeveer 55 m³/s extra via de IJssel moet worden afgevoerd. Echter, bij de afvoerverdeling zoals deze zich rond 1980 manifesteerde werd ook bij lagere afvoeren dan 1.300 m³/s te Lobith een groter aandeel naar de IJssel afgevoerd (Figuur 1-1). Eerder is vanuit DPZW de wens uitgesproken om voor lagere afvoeren de verdeling rond de tijd van de 2^e Nota waterhuishouding (2^e nota WHH, 1984) te realiseren. Deze verdeling komt min of meer overeen met de verdeling rond 1980 in Figuur 1-1. Daarom is in deze studie niet alleen gekeken naar de mate waarin de gewenste verdeling bij een afvoer van 1.300 m³/s te Lobith gerealiseerd kan worden, maar ook bij lagere afvoeren. De focus ligt hierbij op de Overeengekomen Lage Afvoer, OLA een Rijn-afvoerniveau van circa 1020 m³/s. Bij deze afvoer zou ongeveer 30 m³/s meer naar de IJssel moeten worden afgevoerd (Figuur 1-1).

1.3 Onderzoek maakbaarheid afvoerverdeling laagwater

De vraag die in dit onderzoek centraal staat is:

In hoeverre is de wenselijke afvoerverdeling over de splitsingspunten bij lage rivierafvoeren maakbaar?

Om deze vraag te beantwoorden zijn de volgende deelvragen geformuleerd:

- Welke maatregelen kunnen worden ingezet om de afvoerverdeling te beïnvloeden?
- Hoe effectief zijn de verschillende maatregelen?
- Met welke (combinatie van) maatregelen kan de wenselijke verdeling gerealiseerd worden?
- Wat zijn globaal de voor- en nadelen van de verschillende maatregelen (effecten op rivierfuncties, kosten, uitvoerbaarheid, flexibiliteit)?

Bij dit onderzoek worden alleen maatregelen onderzocht die geen systeemverandering ten gevolge hebben (dus bijvoorbeeld geen stuwen in de Waal en geen nieuwe riviertakken).

1.4 Dit rapport

Het onderzoek wordt uitgevoerd in meerdere fasen. Voorliggend rapport gaat over de eerste twee fasen waarin:

- een brede inventarisatie heeft plaats gevonden van maatregelen die de afvoerverdeling kunnen beïnvloeden (zie hoofdstuk 2) en
- met behulp van een 1D hydraulisch model een eerste verkenning is uitgevoerd naar de effectiviteit van een aantal maatregelen (hoofdstuk 3).

2 Inventarisatie mogelijke maatregelen

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van typen maatregelen die genomen zouden kunnen worden in de Rijntakken om de afvoerverdeling bij laagwater te wijzigen. Om een eerste indruk te krijgen van de mogelijke effectiviteit wordt gebruik gemaakt van eerder uitgevoerde modelberekeningen aangevuld met enkele korte principeberekeningen. Veel van deze berekeningen hadden een ander doel. Denk bijvoorbeeld aan een verkenning naar de effectiviteit van langsdammen om de erosie van het zomerbed af te remmen. De resultaten worden nu dus met een iets andere bril bekeken. Een overzicht van het beschouwde gebied en gebruikte naamgeving is weergegeven in Figuur 2-1.



Figuur 2-1 Rivierindeling Rijntakken met de naamgeving als gebruikt in deze studie o.b.v. de IRM-indeling. Ter referentie zijn om de 10 kilometer de rivierkilometerpunten weergegeven.

2.2 Opties op hoofdlijnen

Om de afvoerverdeling bij laagwater zo te wijzigen dat meer water via de IJssel naar het noorden wordt afgevoerd is het nodig om:

1. de waterstanden op de Boven-Waal bij lage afvoeren te verhogen, of
2. de waterstanden op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel bij lage afvoeren te verlagen.

Immers, wanneer de waterstanden op de Boven-Waal worden verhoogd, leidt dat tot opstuwung bij de Pannerdensch Kop waardoor er meer water naar het Pannerdensch Kanaal stroomt. Verlaging van de waterstanden op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel heeft een vergelijkbaar effect. Het verhang naar het noorden neemt toe en er zal meer water in noordelijke richting worden afgevoerd.

De waterstanden op de Waal kunnen bij lage afvoeren worden verhoogd door:

- de rivierbodem over een voldoende lang riviertraject op te hogen (de waterstanden gaan dan mee omhoog), of
- het doorstroomprofiel over voldoende lengte te versmallen (afhankelijk van hoe de versmalling wordt gerealiseerd zijn dan wel aanvullende maatregelen nodig om erosie te voorkomen)
- de rivierbodem over voldoende lengte te verruimen.

Omgekeerd kunnen de waterstanden op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel worden verlaagd door:

- de rivierbodem daar over een voldoende lang traject te verlagen (dan wel minder op te hogen dan de rivierbodem op de Boven-Waal), of
- het zomerbed te verruimen over voldoende lengte.

Bij deze opties is een aantal kanttekeningen te plaatsen:

- Bij laagwater leiden deze maatregelen tot een grotere afvoer via de IJssel. Ze kunnen er echter ook voor zorgen dat bij hoogwater meer water via het noorden wordt afgevoerd. Vanuit het huidige beleid is dit niet wenselijk. Uit eerdere studies blijkt namelijk dat we bij de huidige inrichting van het splitsingspuntengebied en de huidige regelwerken al moeite hebben om afvoeren van 17.000 m³/s of meer te Lobith 'zoals gewenst' (conform het huidige beleid) te verdelen. Bij dergelijke hoge afvoeren stroomt nu al te veel water via het Pannerdensch Kanaal naar het noorden. Als de waterstanden op de Boven-Waal ook bij hoogwater hoger worden, dan zal dit nog moeilijker worden. Er zullen dan in de Boven-Waal extra verruimende maatregelen moeten worden uitgevoerd die alleen actief worden bij hoge afvoeren. Daarbij valt te denken aan het verwijderen van zomerkades, maar ook aan dijkverleggingen en bypasses.
- Versmalling van het doorstroomprofiel leidt tot hogere waterstanden (en grotere waterdieptes), maar kan, zeker bij hogere afvoeren, ook leiden tot meer erosie. Daarom is aanvullende verruiming nodig om bij midden- en hoge rivierafvoeren de stroomsnelheden te beperken. Bij langsdammen kan dit met brede oevergeulen achter de langsdam. Verlaging van uiterwaarden en de aanleg van nevengeulen zou mogelijk ook kunnen helpen, maar de mogelijkheden hiervoor zijn in de Boven-Waal beperkt.
- Verlaging van de waterstanden op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel door verruiming van het zomerbed kan leiden tot kleinere waterdieptes bij lage afvoeren en daarmee tot problemen voor de scheepvaart.

De afvoerverdeling kan niet alleen worden beïnvloed met de genoemde aanpassingen in het dwarsprofiel, maar ook met (aanpassingen in) de sturing van met name stuw Driel. Bij lage afvoeren is stuw Driel gesloten. De enige optie zou zijn om de stuw eerder te openen. Dit zou tot gevolg hebben dat de afvoer naar de IJssel nog verder afneemt in plaats van toeneemt zoals beoogd. Meer informatie over de werking van stuwsturing is te vinden in Bijlage B.7.

2.3 Veranderingen in rivierbodempligging

2.3.1 Ophogen rivierbodem

Principe

De geleidelijke verschuiving van de afvoerverdeling die de afgelopen decennia heeft plaatsgevonden, is veroorzaakt door de ongelijkmatige erosie van het zomerbed van de Rijntakken in het splitsingspuntengebied: de erosie op de Waal is groter dan de erosie op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel.

Hierdoor dalen de waterstanden op de Boven-Waal meer dan op de andere takken en gaat de Waal meer water trekken. Om deze verschuiving van de afvoerverdeling ongedaan te maken kan de rivierbodempligging terug worden gebracht naar bijvoorbeeld de ligging in de jaren '80. Dit is echter een enorme opgave, omdat de benodigde verhoging van het zomerbed varieert van 25 cm op de IJssel tot 80 cm op het Pannerdensch Kanaal en 1 m op de Boven-Waal.

Wanneer ophoging van het zomerbed vooral tot doel heeft om de afvoerverdeling terug te brengen naar de verdeling in de jaren '80, is het niet nodig om alle takken op deze manier te verhogen. Het belangrijkste is dat we het *verschil* in erosie tussen de takken compenseren. Sinds de jaren '80 is de bodem op de Boven-Waal met 1 m gezakt. Op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel bedroeg de erosie 0,8 en 0,25 m. Voor de afvoerverdeling is de absolute erosie niet relevant. Zo lang de erosie op alle takken even groot is zal de erosie geen gevolgen hebben voor de afvoerverdeling. Echter, omdat de bodem van de Boven-Waal ongeveer 20 cm meer is gedaald dan de bodem op het Pannerdensch Kanaal en 75 cm meer dan op de Boven-IJssel, is deze tak meer afvoer gaan trekken. Wanneer we de rivierbodempligging op de Boven-IJssel en het Pannerdensch Kanaal niet verhogen, zouden we in theorie kunnen volstaan met een ophoging van enkele decimeters op de Waal⁵. Het verschil in bodempligging tussen Waal en Pannerdensch Kanaal kan ook worden gerealiseerd door de rivierbodempligging van de Waal te handhaven en toe te staan dat het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel verder eroderen. Dit laatste is onwenselijk vanuit andere functies (zie ook de beleidsbeslissing hierover in het POW IRM), maar het is wel een mogelijke maatregel om de afvoerverdeling te beïnvloeden.

Bevindingen Ottevanger (2015)

Volgens Delft3D-berekeningen uitgevoerd door Ottevanger (2015) leidde een 10 cm hogere bodempligging over de eerste 10 km van de Boven-Waal bij een Lobith-afvoer van 2250 m³/s tot ongeveer 15 m³/s (1%) minder afvoer over de Waal. Een aantal aanvullende analyses is te zien in Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Verschuiving afvoerverdeling bij een afvoer van 2250 m³/s te Lobith als gevolg van ophoging van de bodem op de Boven-Waal (verschillende diktes en over verschillende lengtes)

ophoging (cm)	lengte ophoging (km)	m3 zand	opstuwing splitsingspunt (cm)	Indicatie extra afvoer PK (m3/s)
10	10	260.000	2,6	15
10	20	520.000	6,9	40
20	10	520.000	6,5	38
100	2	520.000	6,7	39

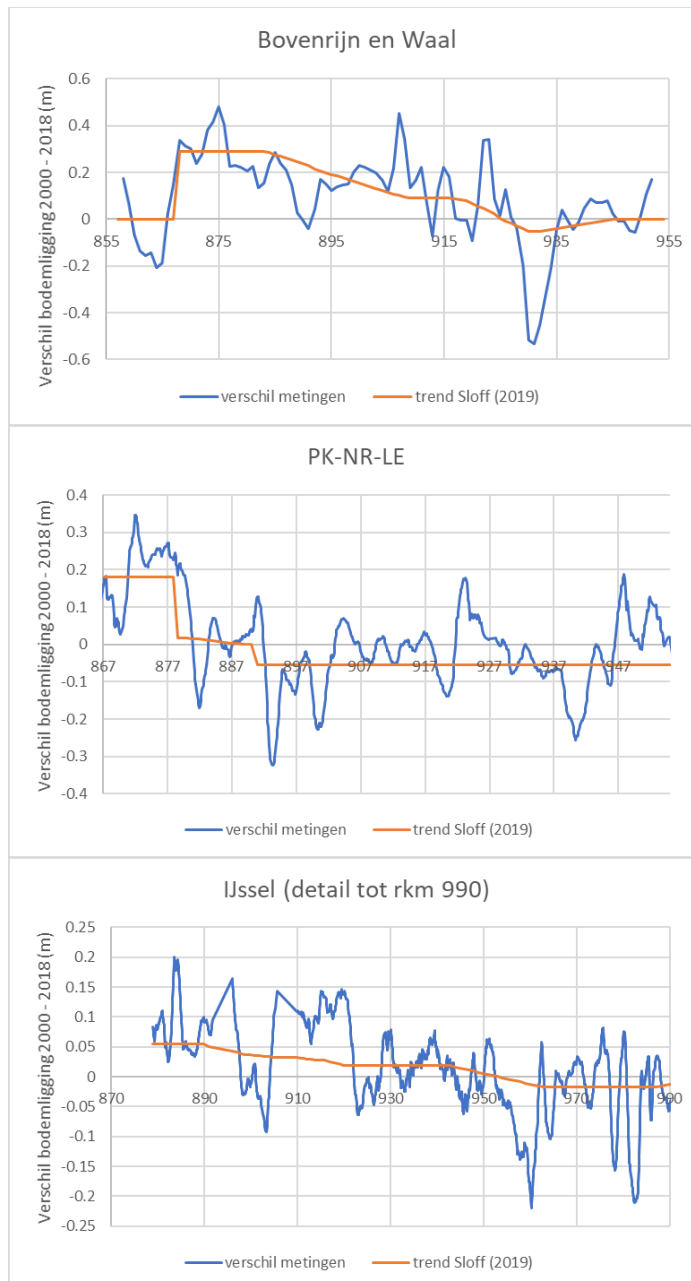
Bevindingen effectbepaling nulalternatief IRM

In het kader van het nulalternatief IRM is een aantal rivierbodempliggingen hydraulisch doorgerekend (Asselman et al., 2022a en 2022b). Figuur 2-2 toont het verschil in rivierbodempligging langs de Rijntakken tussen het jaar 2000 en het jaar 2018.

De bodem op de Boven-Waal lag in 2000 ongeveer 30 cm hoger, terwijl het verschil op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel maximaal ongeveer 20 cm en 5 cm betrof.

⁵ We spreken hier bewust over ophogen van de Waal, want wanneer alleen de Boven-Waal zou worden verhoogd, leidt dit wel tot een verschuiving van de afvoerverdeling, maar zal dit ook leiden tot meer erosie. Ophogen van de bodem van enkel de Boven-Waal leidt immers tot een steiler verhang en daarmee tot hogere stroomsnelheden en erosie. Dit leidt bovendien tot geringere waterdieptes op het bovenstroomse traject, wat nadelig is voor de scheepvaart. Om dit te voorkomen moeten ook de waterstanden op de Middenwaal worden verhoogd, bijvoorbeeld door ook daar de bodem te verhogen.

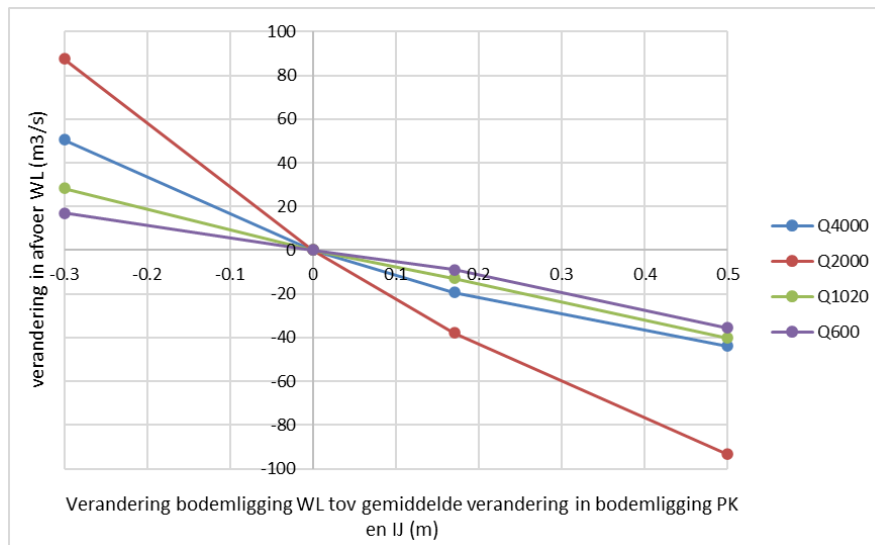
De verschillende bodemliggingen zijn door Asselman et al. (2022a, 2022b) hydraulisch doorgerekend.



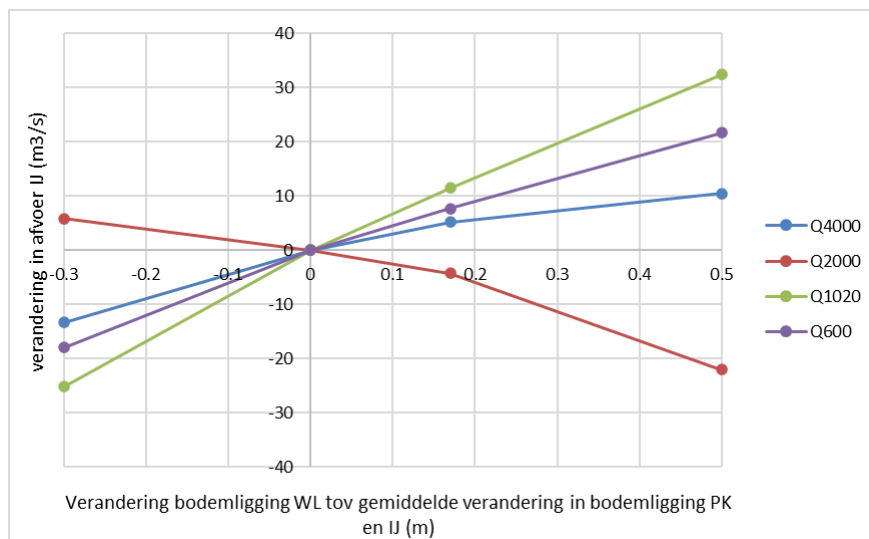
Figuur 2-2 Opgelegde aanpassing van de rivierbodempligging voor het jaar 2000 (ten opzichte van de situatie in het jaar 2018). De veranderingen zoals bepaald met behulp van metingen zijn geplot ter vergelijking. Een positieve waarde betekent dat de bodem in 2000 hoger ligt dan in 2018 (bron: Asselman et al., 2022b).

Omdat waterstandsveranderingen volgens een stuwkromme worden opgebouwd zijn niet alleen de veranderingen in bodempligging direct bij het splitsingspunt van belang, maar ook die over een bepaalde lengte benedenstrooms. En zoals uit Figuur 2-2 blijkt waren de veranderingen in rivierbodempligging niet uniform over de hele lengte van de rivier. Om die reden is niet alleen gekeken naar de verandering op de Waal ten opzichte van het Pannerdensch Kanaal maar ook ten opzichte van de Boven-IJssel.

De verandering in de afvoer op de Waal als functie van het verschil in bodemligging van de Boven-Waal enerzijds en de *gemiddelde*⁶ bodemligging op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel anderzijds is te zien in Figuur 2-3⁷. Figuur 2-4 toont de verandering in IJsselafvoer als gevolg van veranderingen in bodemligging.



Figuur 2-3 Verandering in afvoer over de Waal als functie van de verandering in rivierbodemligging op de Waal ten opzichte van de gemiddelde verandering op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel. Veranderingen bij een afvoer van 2000 m³/s te Lobith zijn minder betrouwbaar omdat veranderingen in stuwsturing een grote invloed hebben.



Figuur 2-4 Verandering in afvoer over de IJssel als functie van de verandering in rivierbodemligging op de Waal ten opzichte van de gemiddelde verandering op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel. Veranderingen bij een afvoer van 2000 m³/s te Lobith zijn minder betrouwbaar omdat veranderingen in stuwsturing een grote invloed hebben.

⁶ Wanneer het Pannerdensch Kanaal 20 cm hoger komt te liggen en de Boven-IJssel met 4 cm wordt opgehoogd dan is de gemiddelde verandering gelijk gesteld aan 12 cm. Er is geen gewogen gemiddelde bepaald waarbij de verandering dicht bij het splitsingspunt zwaarder weegt.

⁷ Bij de afname van de bodemhoogte op de Waal had in deze figuren moeten worden gecorrigeerd voor het feit dat de vaste lagen niet in hoogte afnemen. Die correctie is hier niet uitgevoerd, maar dit kan wel effect hebben op de berekende afvoerverdelingen. Ofwel: in het hydraulische model is de hoogteligging van de vaste laag niet aangepast. Dit kan resulteren in een andere afvoerverdeling dan wanneer de bodemligging over de hele Boven-Waal was aangepast.

Wanneer de Boven-Waal 0,3 m lager ligt dan de gemiddelde bodemligging op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel, leidt dit tot een toename van de afvoer op de Waal met 20 tot 90 m³/s (afhankelijk van de afvoer bij Lobith, zie Figuur 2-3). Dit gaat deels ten koste van de afvoer op de IJssel: de afvoer neemt hier met 12 tot 25 m³/s af (Figuur 2-4).

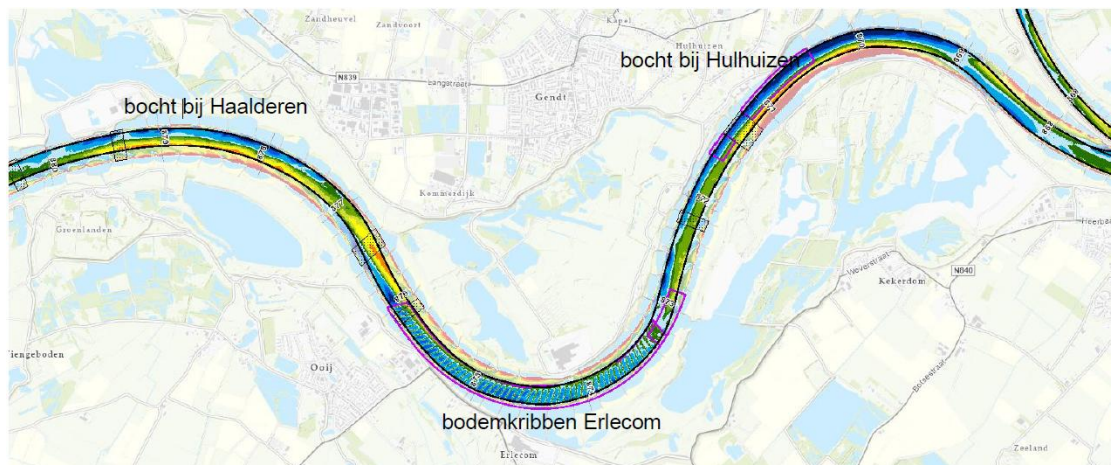
Wat opvalt is dat de effecten bij een afvoer van ongeveer 2000 m³/s te Lobith veel groter en in de figuur voor de IJssel zelfs tegengesteld zijn aan het effect bij de andere door gerekende afvoeren. Dit komt doordat de verandering in rivierbodemligging effect heeft op de waterstanden te Lobith en daarmee op de sturing van stuw Driel. De veranderingen bij dit afvoerniveau zijn daarmee een resultaat van de andere rivierbodemligging én het stuwbeheer, en daardoor niet representatief als puur het effect van een andere bodemligging.

Conclusie

Door de ooghalen heen kijkend zou men kunnen concluderen dat voor iedere 10 cm dat de Waal hoger komt te liggen ten opzichte van het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel er (bij lage afvoeren) ongeveer 6 m³/s à 10 m³/s meer afvoer naar de IJssel gaat. Dit is echter nadrukkelijk een eerste grove indicatie die, zeker bij grotere verandering in bodemligging, nader moet worden onderzocht. Opgemerkt wordt dat de sturing van stuw Driel een grote rol speelt. Wanneer stuw Driel ook bij een afvoer van 2000 m³/s te Lobith gesloten is, zal het effect van de extra afvoer naar de IJssel ook bij deze afvoer merkbaar zijn.

2.3.2 Opvullen erosiekuilen Waal

Er is een onderzoek uitgevoerd naar het opvullen van vaak diepe kuilen in de buitenbochten van de Waal (Becker, 2021). Dit kan worden gezien als een variant op het ophogen van de rivierbodem zoals hiervoor besproken. Figuur 2-5 toont de diepe buitenbochten op de Boven-Waal waarop de studie van Becker (2021) betrekking heeft.

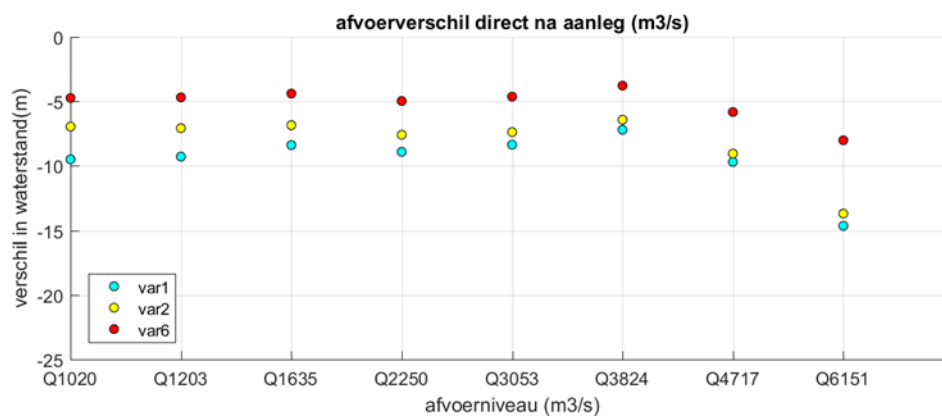


Figuur 2-5 Diepe buitenbochten Boven-Waal. De zwarte polygoon toont de vaargeul, de paarse polygoon zijn niet-stortlocaties, en de met stippels gevulde polygoon zijn niet-baggerlocaties. (Bron: Waterdieptekaarten Rijntakken (RWS-ON) overgenomen uit Becker, 2021)

Becker (2021) heeft het effect van zes suppletievarianten berekend:

- variant 1) buitenbocht Hulhuizen – opgevuld tot OLR-3,5 m, samenstelling zoals natuurlijk sediment (volume 214.449 m³)
- variant 2) buitenbocht Hulhuizen – profielvolgend, dikte 1 m (tot max. OLR-4,5 m), samenstelling zoals natuurlijk sediment (volume 222.930 m³)
- variant 3) als 1), maar dan als niet erodeerbare (vaste) laag
- variant 4) als 1), maar dan met grover materiaal
- variant 5) als 4), maar dan met gebruik van het nieuwe semi-vaste-lagenmodule in Delft3D (dus geen andere suppletievariant, maar andere wijze van effectbepaling)
- variant 6) opvullen van de erosiekuil benedenstrooms van de bodemkribben bij Erlecom in combinatie met een profielvolgende suppletie van 1 m dikte in de buitenbocht bij Haalderen (volume 171.623 m³)

Figuur 2-6 toont de afname van de Waalafvoer als gevolg van de verschillende suppletievarianten. Het volledig opvullen van de kuil in de eerste buitenbocht bij Hulhuizen heeft het meeste effect op de afvoerverdeling (iets minder dan 10 m³/s). Wanneer de kuil minder ver wordt opgevuld neemt het effect af tot ongeveer 7 m³/s. Varianten 3 t/m 5 hebben hetzelfde effect als variant 1 omdat ze dezelfde geometrie hebben⁸.



Figuur 2-6 Verschil in Waal-afvoer direct na aanleg van de suppletie. Varianten 3 t/m 5 hebben hetzelfde effect als variant 1 omdat ze dezelfde geometrie hebben (bron: Becker, 2021)

Huthoff & Vieira da Silva (2019) hebben gekeken naar het effect van opvullen van het erosiegat dat zich aan de benedenrand van de vaste laag bij Nijmegen heeft gevormd. Bij afvoeren van 1020 tot 2000 m³/s werden de waterstanden op de Pannerdensche Kop tot 1 cm opgestuwd. De auteurs schatten dat hierdoor de afvoer naar het Pannerdensch Kanaal met 5 m³/s toenam.

2.4 Veranderingen in breedte van het zomerbed Waal

2.4.1 Verkleining doorstroomprofiel Waal met langsdammen

Langsdammen worden veel genoemd als optie om het doorstroomprofiel te verkleinen en zo de waterstanden bij lage afvoeren te verhogen.

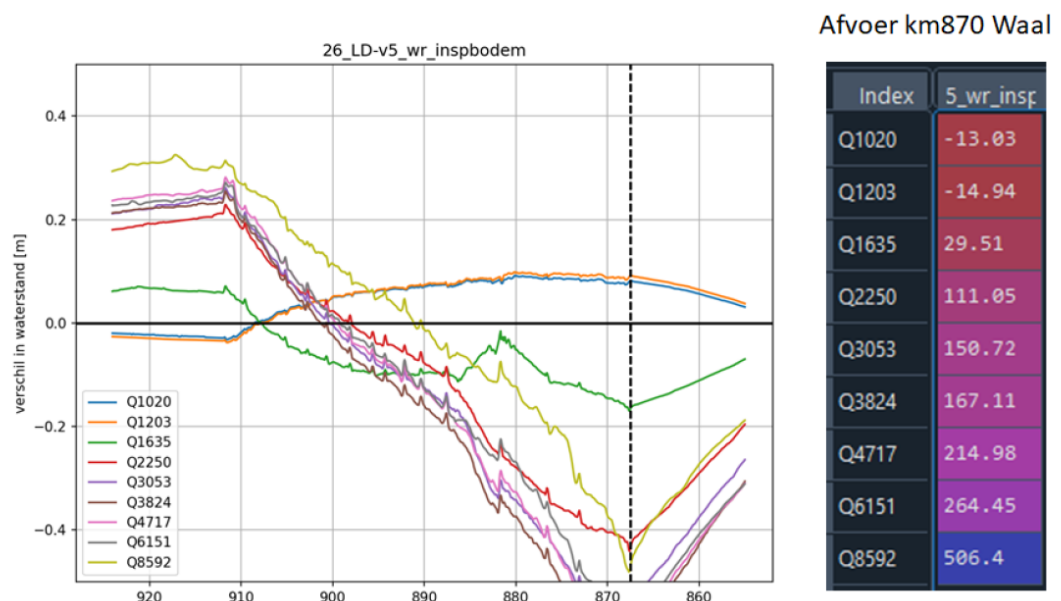
⁸ Becker (2021) heeft echter ook onderzocht of het effect in de tijd verandert. Uit haar modelberekeningen blijkt dat binnen een jaar al veel materiaal uit de buitenbocht verdwijnt wanneer gebruik wordt gemaakt van natuurlijk sediment. Binnen 1 jaar is het effect van variant 1 afgenomen tot ongeveer 6 m³/s. Bij variant 3 is het effect constant.

Eerste verkenningen uitgevoerd met D-Hydro gerapporteerd in Sloff et al. (2023) tonen aan dat een versmalling van de hoofdgeul van de Waal (over een lengte van ongeveer 25 km vanaf het splitsingspunt tot voorbij Nijmegen) met circa 20 m de waterstanden bij lage afvoeren met 2 tot 3 dm opstuwt en de afvoer naar het Pannerdensch Kanaal met circa 20 m³/s verhoogt.

Aanvullend zijn door Sloff et al. (2023) meer gedetailleerde berekeningen uitgevoerd met Delft 3D, waarbij de schematisatie van de overlaten is verbeterd. De resultaten staan in Figuur 2-7. Het volgende valt op:

- Bij lage afvoeren (1020 m³/s tot iets meer dan 1203 m³/s te Lobith) nemen de waterstanden op de Boven-Waal met 10 cm toe. Dit leidt tot 13 à 15 m³/s meer afvoer naar het Pannerdensch Kanaal.
- Bij hogere afvoeren gaan de oevergeulen meestromen (dit is nodig om erosie te voorkomen). Dit leidt tot lagere waterstanden op de Boven-Waal en daarmee tot een toename van de afvoer over de Waal. Bij een afvoer van 1635 m³/s te Lobith gaat er bijna 30 m³/s meer water naar de Waal. Bij hogere afvoeren neemt dit verder toe tot zelfs meer dan 500 m³/s⁹.

Het effect van de langsdammen op de afvoerverdeling wordt dus sterk beïnvloed door het moment waarop de oevergeulen mee gaan stromen. Om erosie te voorkomen moet dit al bij relatief lage afvoeren gebeuren (in deze studie vanaf een afvoer van 1635 m³/s te Lobith). De Waal gaat dan zelfs meer afvoer trekken dan in de situatie zonder langsdammen. Het is de vraag of dat vanuit zoetwaterbeschikbaarheid problemen oplevert.



Figuur 2-7 Effect van meerdere stroomgeulen op waterstand in hoofdgeul bij vrije afvoerverdeling op de Pannerdensch Kop, zonder morfologische veranderingen, bij verschillende Lobith-afvoeren (1.020 – 8.592 m³/s). De tabel rechts geeft de verandering van de afvoer op het splitsingspunt (negatief = meer water naar het Pannerdensch Kanaal). (bron: Sloff et al., 2023)

⁹ Er zijn geen berekeningen uitgevoerd bij zeer hoge afvoeren. Bekend is echter dat het effect van dit soort maatregelen veelal het grootst is bij middelhoge afvoeren. Bij nog hogere afvoeren stroomt meer water door de uiterwaarden, waardoor ingrepen in of nabij het zomerbed relatief minder invloed hebben op de waterstand.

Er zijn geen berekeningen uitgevoerd voor zeer hoge afvoeren (16.000 m³/s te Lobith of meer), maar wanneer de huidige beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling gehandhaafd blijft, kan de aanleg van langsdammen mogelijk gunstig uitpakken voor de afvoerverdeling bij hoogwater. Bij afvoeren van 17.000 m³/s of hoger te Lobith is het moeilijk om voldoende water naar de Waal te 'persen'. Om bij een afvoer van 18.000 m³/s aan de beleidsmatige verdeling te blijven voldoen zou de Boven-Waal moeten worden verruimd (of de bodem moeten worden verlaagd). Omdat de langsdammen voor lagere waterstanden zorgen zal de Waal meer debiet trekken. Op dit moment is niet bekend of dit voldoende effectief is om bij een afvoer van 18.000 m³/s te Lobith aan de beleidsmatig vastgestelde verdeling te kunnen voldoen.

Opgemerkt wordt dat de berekeningen in deze figuur betrekking hebben op een situatie waarbij de huidige rivierbodempligging gehandhaafd wordt. Afhankelijk van relatieve veranderingen in rivierbodempligging tussen Waal en Pannerdensch Kanaal kan de verschuiving in de afvoerverdeling anders uitpakken.

2.4.2 Verkleining doorstroomprofiel Waal door kribverlenging

Kribverlenging zorgt ook voor versmalling van het doorstroomprofiel en leidt daardoor tot hogere waterstanden bij lage afvoeren. Door de kribben naast te verlengen ook te verlagen kan worden voorkomen dat hoogwaterstanden toenemen.

Kribben kunnen tijdelijk worden verlengd door gebruik te maken van *Xstream blocks* (kleine betonnen blokken met een tetraëdrische vorm). Deze worden ook toegepast bij de flexibele kribben van het programma SSRS¹⁰. In theorie zouden deze blokken voor het hoogwaterseizoen kunnen worden verwijderd. Bij kribverlenging kan niet worden volstaan met het verlengen van 1 of 2 kribben. Omdat het waterstandseffect zich via een stuwkromme opbouwt moet deze maatregelen mogelijk over enkele tientallen kilometers worden uitgevoerd om voldoende effectief te zijn. Daarbij moet rekening worden gehouden met de grote porositeit van deze constructies, waardoor de opstuwende werking minder is dan die van een traditionele krib.

Een eerste verkenning naar het effect van deze maatregel is uitgevoerd door Van den Hoek (2024). Haar bevindingen staan in Tabel 2-2.

Tabel 2-2 Overzicht van extra afvoer naar de IJssel door de kribverlenging op de Waal met 20 m over de aangegeven trajecten, berekend bij een Bovenrijnafvoer van 1020 m³/s (bron: Van den Hoek, 2024).

Maatregel	Extra afvoer naar de IJssel t.o.v. situatie zonder maatregel [m ³ /s]
Verlengen kribben Waal rkm 870-880	7,3
Verlengen kribben Waal rkm 880-890	2,2

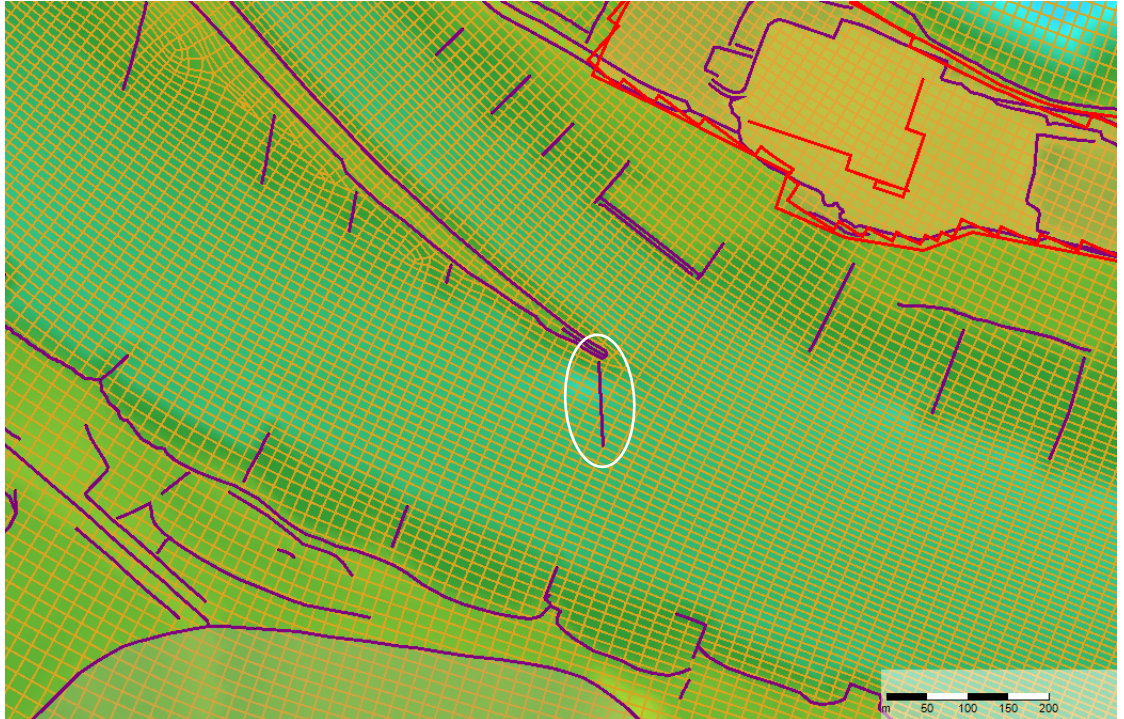
2.4.3 Afzinken van duwbakken Waal

Een vergelijkbaar effect kan ook worden verkregen door duwbakken af te zinken. Dit wordt momenteel beproefd middels een pilot in de Oostenrijkse Donau. Deltares heeft een voorstel gedaan om deze optie ook voor de Rijntakken te verkennen. Het effect op de afvoerverdeling is nu nog niet onderzocht.

¹⁰ Zie <https://www.magazinesrijkswaterstaat.nl/zakelijkeninnovatie/2022/04/nieuws-flexibele-kribben> voor een impressie

2.4.4 Regelwerk zomerbed Waal nabij Pannerdensche Kop

Van den Hoek (2024) heeft het effect van een regelwerk in het zomerbed van de Waal nabij de Pannerdensche Kop (een soort 'flipper') berekend. Daarvoor is een dam of lange krib aangelegd bij het splitsingspunt in de Waal. De hoogte van de krib is zo gekozen dat deze niet overstroomt bij een afvoer van 1020 m³/s bij Lobith. De krib is dusdanig lang gemaakt (ongeveer 100 m), dat hij ongeveer de helft van het zomerbed blokkeert om zo een maximaal effect te bepalen (zie Figuur 2-8).



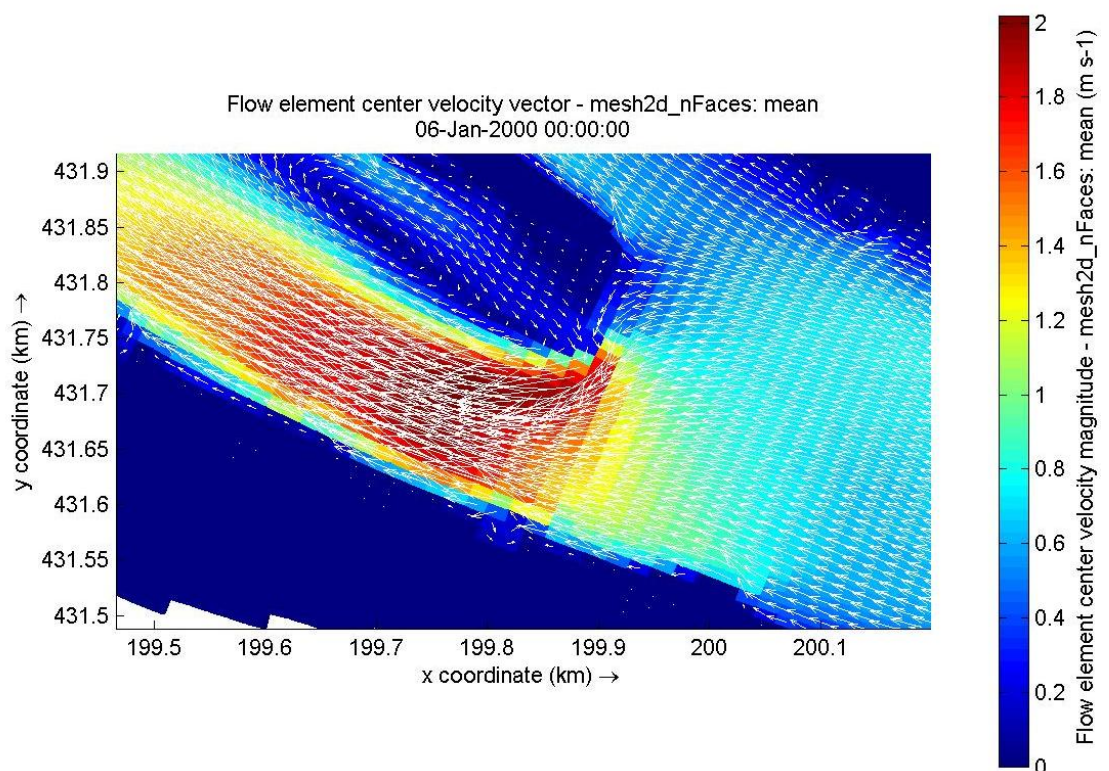
Figuur 2-8 Schematisatie van het regelwerk op de Pannerdensche Kop/flipper (wit omcirkeld) (bron: Van den Hoek, 2024).

In de simulatie met regelwerk gaat er zo'n 12 m³/s extra naar de IJssel (bij een afvoer van 1020 m³/s te Lobith). Ondanks dat de breedte van het zomerbed bijna halveert is het effect op de afvoerverdeling dus beperkt. Dit komt doordat de versmalling slechts over korte afstand wordt gerealiseerd, waardoor de stuwkromme zich niet goed op kan bouwen.

Echter, omdat het regelwerk bijna de helft van het doorstroomprofiel weg neemt, leidt deze zelfs bij relatief lage afvoeren tot hoge stroomsnelheden (zie Figuur 2-9). Bij het regelwerk zien we lokaal snelheden van 2 m/s (ten opzichte van normaal = 1 m/s). Daar zal dus een grote ontgrondingskuil ontstaan. Dit zal een deel van het berekende effect tenietdoen (de Waal gaat hierdoor weer wat meer afvoer trekken). Benedenstrooms van deze kuil zal aanzanding plaatsvinden, wat kan leiden tot een scheepvaartknelpunt.

Bij een riviersplitsing kunnen geen sprongen in de waterspiegel optreden. De afvoer verdeelt zich dusdanig over de twee afstromende takken dat de waterstand voor beide takken op de splitsing gelijk is. De waterstand in die afstromende takken wordt vervolgens bepaald door de geometrie en ruwheid over lengtes van tientallen kilometers door stuwkrommes. De afvoerverdeling kan dus alleen worden beïnvloed door ingrepen die de waterstand in de benedenstroomse takken opstuwen of verlagen.

Deze studie toont¹¹ dat opstuwen van de waterstand bijvoorbeeld kan met een versmalling of weerstandsverhoging, maar dat dit wel vraagt om ingrepen over een forse lengte van de tak (bijvoorbeeld meer dan 10 km). Dit komt doordat de invloed op de waterstand door de stuwkrommes slechts geleidelijk stroomopwaarts opbouwt (of afneemt). Een lokale aanpassing op de splitsing zelf kan alleen effect hebben als er een significante weerstand (energieverlies) wordt geïntroduceerd, bijvoorbeeld een overlaat over de volle breedte van de Waal. Uit de modelberekeningen voor bovenstaand regelwerk volgt bijvoorbeeld dat insnoering van de Waal over de helft van de Waal-breedte door een constructie op de Pannerdensche Kop slechts een kleine tijdelijke bijdrage kan leveren aan de afvoerverdeling. Die geeft namelijk enige extra weerstand en dus opstuwing, maar slechts in geringe mate ondanks de enorme impact op scheepvaart en morfologie. De erosie die naast de constructie optreedt zal dit effect op de afvoerverdeling snel teniet doen. Ook andere vormen van een scheidingsdam op de splitsing zullen niet veel effect kunnen hebben op afvoerverdeling omdat de waterstanden nog steeds worden bepaald door geometrie en ruwheid van de stroomafwaartse trajecten, en niet de lokale situatie op de splitsing. De invloed op lokale morfologie (bijvoorbeeld ontstaan van erosiekuilen) is wel in belangrijke mate bepaald door de vorm van de splitsing.



Figuur 2-9 Stroomsnelheden rond de Pannerdensche Kop voor de simulatie met regelwerk (bron: Van den Hoek, 2024).

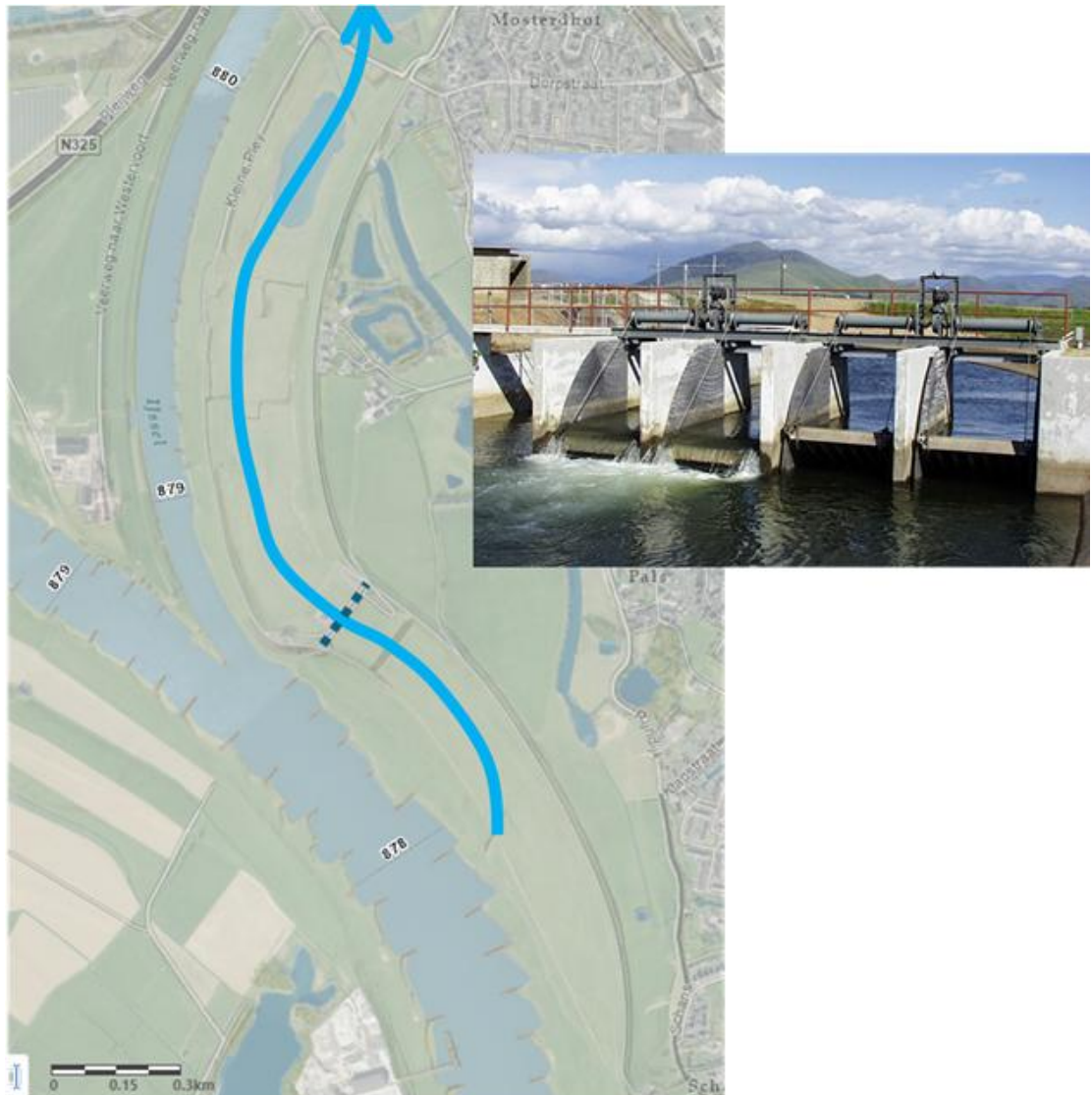
2.5 Vergroten doorstroomprofiel Pannerdensch Kanaal en IJssel

Lagere waterstanden op het Pannerdensch Kanaal en de IJssel kunnen worden gerealiseerd door het doorstroomprofiel te verruimen. Men kan hierbij denken aan het verbreden van het zomerbed, maar ook aan het aanleggen van meestromende nevengeulen. In deze paragraaf gaan we in op de mogelijke maatregel 'aanleg van een meestromende nevengeul bij de Hondsbroeksche Pleij'.

¹¹ Zie ook de berekeningen in hoofdstuk 3

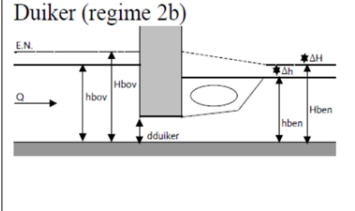
2.5.1 Meestromende nevengeul bij Hondsbroeksche Pleij

Een meestromende nevengeul door de overlaat bij de Hondsbroeksche Pleij kan leiden tot een toename van de IJsselafvoer. Deze maatregel heeft als voordeel dat het debiet door de nevengeul regelbaar is. Indien nodig kan de nevengeul (tijdelijk) worden afgesloten. De Hondsbroeksche Pleij heeft als locatie het voordeel dat de nevengeul in de binnenbocht komt te liggen en daarmee een relatief groot verval heeft. De nevengeul is goed inpasbaar wanneer de breedte van de nevengeul overeenkomt met de breedte van de doorstroomopeningen in het bestaande regelwerk. Figuur 2-10 geeft een indruk van de mogelijke locatie en vormgeving van een meestromende nevengeul.



Figuur 2-10 Mogelijke locatie en vormgeving meestromende nevengeul bij Hondsbroeksche Pleij.

Wanneer een meestromende nevengeul wordt aangelegd door de Hondsbroeksche Pleij met een duiker onder het regelwerk, heeft deze geul een verval van ongeveer 21 cm. Elk segment van de bestaande overlaat in regelwerk in de Hondsbroeksche Pleij is 4 m breed. Deze breedte zou ook aangehouden kunnen worden voor de duiker (dan hoeft maar een element aangepast te worden). Met behulp van onderstaande formules is een eerste indicatieve berekening uitgevoerd naar het mogelijke effect van deze maatregel tijdens laagwater.

<p>Duiker (regime 2b)</p> 	$\Delta h = \Delta h_{in} + \Delta h_{uit} + i_{vr} L$ $\Rightarrow \Delta h = c_{in} \frac{u^2}{2g} + c_{uit} \frac{u^2}{2g} + \frac{u^2}{K_{20}^2 R^{1/3}} L$ $\Rightarrow \Delta h = \left(\frac{q}{d_{duiker}} \right)^2 \left(\frac{c_{in} + c_{uit}}{2g} + \frac{L}{C^2 R} \right)$	$0,1 < c_{in} < 0,5$ $0,2 < c_{uit} < 1,0$ $0,82 \leq \sqrt{\frac{1}{c_{in} + c_{uit}}} \leq 1,83$
---	---	--

Aangenomen is dat verliescoëfficiënten $c_{in}=0,1$ en $c_{uit}=0,2$, de hoogte van de duiker 2 m is (d_{duiker}) en C is de Chézy-waarde voor de hydraulische ruwheid ($m^{1/2}/s$). Bij een verval van 0,1 m over het kunstwerk (ongeveer de helft van die 21 cm, omdat het volledige verval van 21 cm niet over de duiker staat; er is immers ook een verval over de lengte van de nevengeul boven en benedenstrooms van de duiker) en een lengte (L) van 10 m levert dit een afvoer per eenheid van breedte op (q) van 4,14 m²/s en een stroomsnelheid in de duiker van 2,1 m/s. Indien de breedte van de duiker 4 m bedraagt, geeft dit een extra afvoer van 17 m³/s door de duiker.

Weer uitgaande van 0,1 m verval over een 10 m lange duiker, maar met iets andere waarden $c_{in}=0,5$ en $c_{uit}=1$, en $d_{duiker}=2$ m, levert dat een afvoer per eenheid van breedte van 2,23 m²/s. Dat levert een debiet van 9 m³/s als de duiker 4 m breed is. Dit resultaat is lager door de grotere verliescoëfficiënten c_{in} en c_{uit} .

Een meestromende nevengeul met een 2 m hoge en 4 m brede duiker zou dus bij de hier gehanteerde uitgangspunten 9 tot 17 m³/s af kunnen voeren. Hogere afvoeren zijn mogelijk wanneer de duiker breder wordt gemaakt. Hierbij wordt aangenomen dat de bodem van het bovenstroomse deel van de nevengeul voldoende laag genoeg is om ook bij lage waterstanden op het Pannerdensch Kanaal voldoende water in te laten stromen. Daarmee wordt voorkomen dat de nevengeul (bijna) droogvalt en zijn functie verliest.

2.6 Verandering bodemruwheid

Waterstanden worden niet alleen bepaald door de hoogteligging van het rivierbed en het doorstroomprofiel, maar ook door de bodemruwheid. Een ruwere rivierbodem op de Boven-Waal zou tot hogere waterstanden leiden en daarmee tot een verschuiving van de afvoerverdeling richting het Pannerdensch kanaal.

Bij lage afvoeren is mogelijk vooral de bijdrage van korrelruwheid van belang als beddingvormen afvlakken en hun bijdrage aan de ruwheid deels verdwijnt. Door suppleties of bestorting met grover sediment neemt de korrelruwheid toe, wat bij lagere afvoeren kan leiden tot hogere waterstanden. Bij hoogwater zijn juist de duinen belangrijker dan de korrelruwheid. Onbekend is of grover materiaal bij hoge afvoeren leidt tot lagere duinen en daarmee tot een lagere ruwheid. Als dat zo is, en als er geen duinen van fijner materiaal over deze grover laag heen gaan lopen, zou deze maatregel als positief neveneffect kunnen hebben dat de hoogwaterstanden lager worden. Er is echter te weinig kennis van deze processen om deze effecten op ruwheid bij hoge en lage afvoeren te kwantificeren.

Voor zover bekend zijn nog geen berekeningen uitgevoerd om het effect van een hogere korrelruwheid op de laagwaterafvoerverdeling te kwantificeren.

Douben (1997) heeft echter wel gekeken naar het effect van de bodemkribben bij Erlecom op de ruwheid en de afvoerverdeling. Hij deed dit op basis van waargenomen veranderingen in waterstanden en Qh-relaties, voor en na aanleg van de bodemkribben. Douben (1997) geeft aan dat de alluviale ruwheid (k-waarde) 0,2 m bedraagt bij lage afvoeren. Bij OLA is de Chézy waarde ongeveer 40,5 m^{0.5}/s.

De ruwheid van de bodemkribben zoals berekend door Douben is hoger ($k=0,7$ m en $C=37,5$ $m^{0.5}/s$ bij OLA). Dit zorgt voor extra opstuwing op de Boven-Waal en een verschuiving in de afvoerverdeling van 17 m^3/s bij OLA.

3 Dimensionering en effectiviteit maatregelen

3.1 Inleiding

Zoals uit voorgaande overzicht blijkt is het effect van een maatregel sterk afhankelijk van de omvang van de maatregel (mate van ophoging van de bodem) en van de lengte waarover de maatregel wordt uitgevoerd (dit in verband met de lengte die nodig is voor het opbouwen van de stuwkromme). Ook de locatie waarop de maatregel wordt gerealiseerd heeft invloed op het effect. Om meer inzicht te krijgen in de invloed van de dimensionering en de locatie van de maatregel op de afvoerverdeling is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met een 1D hydraulisch model (*sobek-rijn-j24_6-v1a1* (Maas, 2024)). De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd voor de volgende typen maatregelen:

- Versmalling van de Boven-Waal
- Bodemophoging van de Boven-Waal
- Combinatie van versmallen en bodemophoging van de Boven-Waal
- Verbreding van het Pannerdensch Kanaal en/of de Boven-IJssel
- Combinatie van versmallen en bodemophoging van de Boven-Waal en verbreding van de Boven-IJssel.

Wanneer wordt besloten om terug te gaan naar de afvoerverdeling uit de tweede nota waterhuishouding, dan moet er bij een afvoer van 1.300 m³/s te Lobith ongeveer 55 m³/s extra afvoer naar de IJssel. Bij een afvoer van ongeveer 1000 m³/s te Lobith is de benodigde extra afvoer iets kleiner; ongeveer 30 m³/s (Figuur 1-1). Bij het beschrijven van de resultaten wordt met name gefocust op de verandering in de afvoerverdeling bij een afvoer rond de 1000 m³/s te Lobith. Hierbij wordt uitgegaan van een gewenste toename van de IJsselafvoer met 30 m³/s.

In dit hoofdstuk worden eerst de effecten van de losse maatregelen per riviertak besproken, bijvoorbeeld enkel versmallen op de Boven-Waal, waarna ook de combinatie van versmallen, verbreden en bodemophoging op verschillende riviertakken gepresenteerd wordt. Door de hoeveelheid van gedraaide sommen worden in de hoofdtekst enkel de meest relevante figuren gepresenteerd. De overige resultaten zijn bij oplevering van dit rapport gedeeld als digitale bijlage.

3.2 Modelaannames

De berekeningen zijn uitgevoerd met een 1D hydraulisch model voor een range aan afvoeren die (semi-stationair) oplopen van 500 m³/s tot maximaal 2000 m³/s. De maximale afvoer van 2000 m³/s is ingegeven door de keuze om te werken met een alternatieve stuwsturing van stuw Driel. Om te voorkomen dat veranderingen in afvoerverdeling (deels) komen door veranderingen in stuwsturing (afhankelijk van het effect dat de ingreep heeft op de waterstand bij Lobith verandert de stuwsturing) wordt uitgegaan van een dichte stuw Driel waarbij er altijd 30 m³/s naar de Nederrijn-Lek gaat bij afvoeren van 2000 m³/s te Lobith of lager¹². De IJsselafvoer is dan de resultante. Met andere woorden: de focus in dit onderzoek gaat naar het Rijnafvoerniveau (knikpunt) waarbij (conform 2^e nota waterhuishouding) 285 m³/s over de IJssel gestuurd kan worden met behoud van 30 m³/s over de Nederrijn. Bij hogere Rijnafvoeren zal stuw Driel in werking treden.

¹² Om enkel het effect van de maatregelen te kunnen vergelijken is de RTC-sturing van stuw Driel uitgeschakeld in het model. De stuw staat voor het gehele afvoerbereik dicht en met behulp van lateralen boven- en benedenstrooms van de stuw wordt er een constante afvoer van 30 m³/s op de Nederrijn gegarandeerd.

Hoe de afvoerverdeling er bij hogere afvoeren uitziet is regelbaar met stuw Driel: hier is dan voldoende handelingsperspectief. De aandacht gaat dus uit naar de hoogte van dit knikpunt en de afvoerverdeling bij Rijnafoeren lager dan dit knikpunt (wanneer stuw Driel gesloten is).

3.3 Maatregelen Boven-Waal

Voor maatregelen op de Boven-Waal zijn vele combinaties van maatregelen mogelijk die leiden tot een kleiner doorstroomprofiel. Er zijn voor deze studie vier parameters gekozen om de maatregel te definiëren:

1. Versmallen van het zomerbed. De versmalling wordt over de gehele lengte van de maatregel uniform toegepast op de 1D profielen.
2. Bodemophoging van het zomerbed. De bodemophoging wordt over de gehele lengte van de maatregel uniform toegepast op het zomerbed.
3. Lengte waarover de maatregel wordt uitgevoerd.
4. De startlocatie van de maatregel.

Alle parameters zijn weergegeven in Tabel 3-1. In totaal zijn er 240 combinaties doorgerekend voor de Boven-Waal. Er is gekozen om een range aan mogelijke veranderingen door te rekenen om de werking van het systeem beter te begrijpen en om hoekpunten te verkennen. Er is bewust gekozen om niet enkel realistische waardes te gebruiken voor de mate van bodemophoging en versmalling. Om diezelfde reden zijn er drie startlocaties voor de ingrepen verkend: 1) Splitsingspunt Pannerdensche Kop, 2) Bodemkribben Erlecom en 3) de Vaste laag bij Nijmegen¹³.

Tabel 3-1 Combinatie van maatregelparameters. Elke unieke combinatie is doorgerekend. In totaal zijn er 240 combinaties doorgerekend.

Versmallen zomerbed (m)	Bodemophoging (m)	Lengte maatregel (km)	Startpunt (Rkm)
0	0	1	Splitsingspunt (PK) (868)
30	0.1	5	Bodemkribben Erlecom (874)
50	0.2	10	Vaste laag Nijmegen (884)
100	0.5	20	
		50	

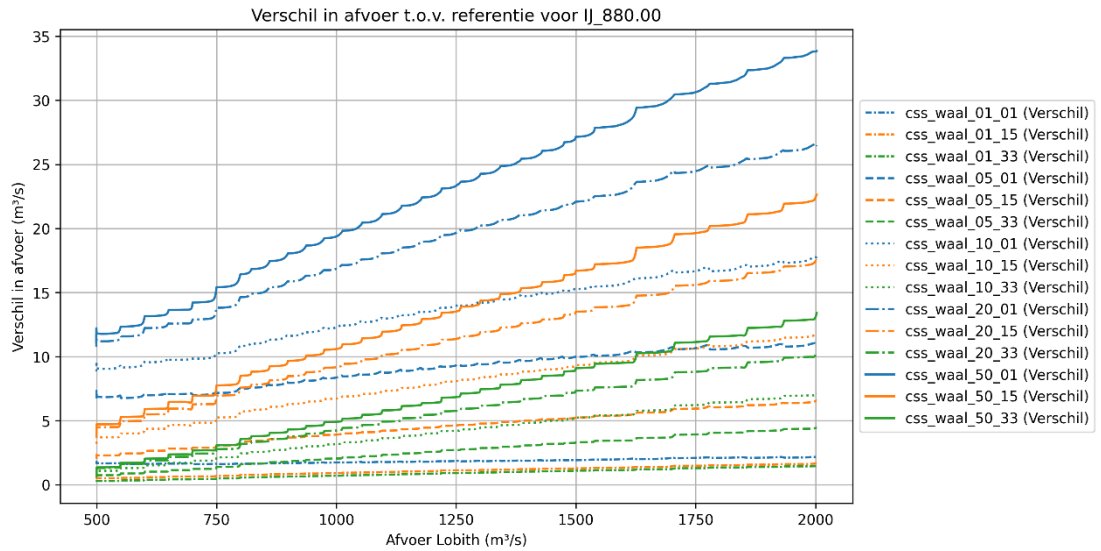
3.3.1 Versmallen

De maatregel waarvan wordt verwacht dat deze het meeste effect zal hebben is het versmallen van het zomerbed op de Boven-Waal. De huidige breedte van het zomerbed op de Boven-Waal (tussen de kribkoppen) varieert tussen de 275 en 300 m. Het verkleinen van het doorstroomprofiel zorgt voor opstuwing bovenstrooms, waardoor meer water in de richting van het Pannerdensch Kanaal en IJssel wordt gestuwd en daar de afvoer toeneemt. De keuze voor de toegepaste methode voor het aanpassen van de 1D profielen is toegelicht in bijlage A.

¹³ De laatste twee locaties zijn locaties waar ingrepen in het rivierengebied vanuit het huidige beheer logisch zijn. Hier zijn namelijk lokale "vaste" maatregelen aangebracht op het rivierbed die problemen veroorzaken (met name voor scheepvaart).

Hoe groter de versmalling hoe meer afvoer er extra naar de IJssel wordt gestuwd. In Figuur 3-1, Figuur 3-2 en Figuur 3-3 is het effect van een versmalling van respectievelijk 30, 50 en 100 m weergegeven voor verschillende combinaties van lengte en startpunt. In deze figuren valt het volgende op:

1. Naarmate het zomerbed smaller wordt, neemt de afvoer richting de IJssel toe. Zo zien we in de onderstaande figuren een verdubbeling van de extra IJssel-afvoer wanneer de versmalling van 30 m naar 50 m gaat en zelfs meer dan een verdubbeling wanneer de Waal met 100 m in plaats van 50 m wordt versmald.
2. Hoe dichtbij het splitsingspunt de maatregel wordt uitgevoerd, des te groter het effect is. In de onderstaande figuren worden de startlocaties weergegeven met verschillende kleuren: Pannerdensch Kop (blauw), Bodemkribben Erlecom (oranje) en vaste laag Nijmegen (groen). De startlocaties liggen 0,5 km, 7,5 km en 17 km benedenstrooms van het splitsingspunt.
3. Hoe langer de lengte waarover de maatregel wordt toegepast, des te groter het effect is. Wanneer over een langer traject het doorstroomprofiel wordt verkleind zorgt dat voor meer opstuwning bovenstrooms. De opgebouwde stuwkromme is terug te zien in Figuur 3-4. Daarom zien we voor de maatregelen over een lengte van 1 km dat bij een versmalling van 30 m er bijna geen effect ($< 2 \text{ m}^3/\text{s}$) is, oplopend tot 10 a 11 m^3/s bij 100 m versmalling. De lengte van 1 km is vergelijkbaar met het principe van de zogenaamde “flipper”. Het effect van de 100 m versmalling is vergelijkbaar met het gevonden effect door de Versmalling in Van der Hoek (2024), maar de mate van versmallen is vrij extreem en daarom minder realistisch. Het effect bij een meer realistische versmalling is te beperkt en daarom minder bruikbaar om tot voldoende extra afvoer naar de IJssel te komen. Omdat het uitvoeren van de maatregel over 1 km nauwelijks effect heeft is deze lijn bij de overige figuren weggelaten. Daarnaast geeft Figuur 3-4 weer dat vanaf een lengte van 20 km de extra afvoer per toenemende lengte van de maatregel gering is. Dit is logisch gezien de halveringslengte op de Waal. Bij lage afvoeren bedraagt de halveringslengte ongeveer 15 km. Dat betekent dat een ingreep over een lengte van 15 km resulteert in een waterstandseffect dat 50% bedraagt van het maximaal haalbare effect. Een maatregellengte van 30 km of 45 km resulteert in respectievelijk 75% en 88% van het maximale effect. Dit principe zien we ook terug in de resultaten. Een toename van de maatregellengte van 20 naar 50 km is een grotere toename van de lengte dan het verschil tussen 1 en 20 km, maar het effect neemt minder sterk toe: de stuwkromme vlakt af.

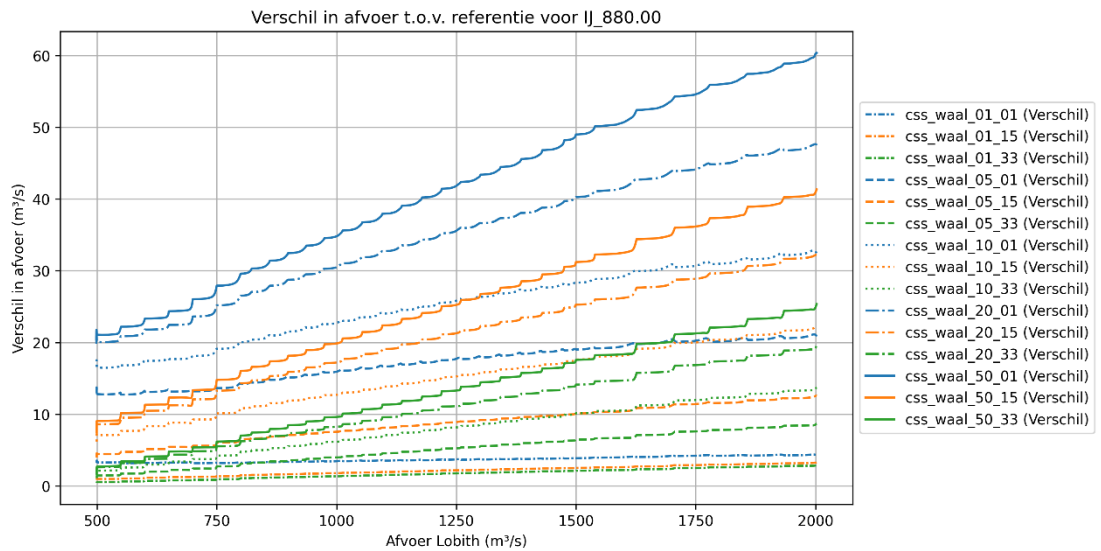


Uitleg van maatregelcode:

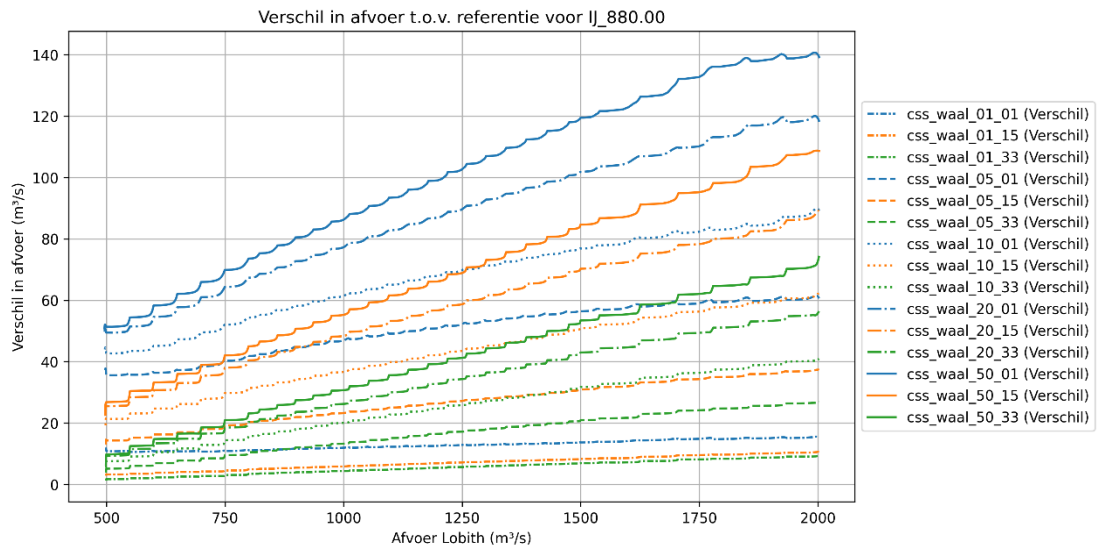
- “waal” → riviertak van de ingreep, hier Waal
- “_01” → lengte van de ingreep, hier 1 km
- “_15” → Startlocatie van de ingreep gebaseerd op de dwarsprofielen op de sobek-tak:

Startpunt	Nummer
Splitsingspunt (PK)	01
Bodemkribben Erlecom	15
Vaste laag Nijmegen	33

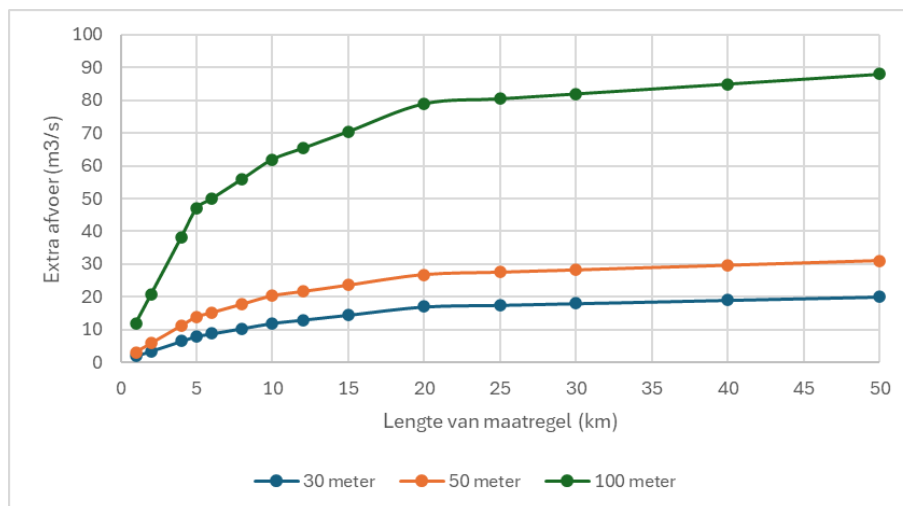
Figuur 3-1 Extra afvoer naar de IJssel bij een versmalling van 30 m van het zomerbed van de Waal. De getrapte vorm van de lijnen is terug te voeren op de overgang tussen de stationaire afvoerniveaus in de gebruikte randvoorwaarde in het model. De maatregelcode is van toepassing op alle figuren.



Figuur 3-2 Extra afvoer naar de IJssel met een versmalling van 50 m van het zomerbed van de Waal. Voor de nummering van de startlocaties zie Figuur 3-1.



Figuur 3-3 Extra afvoer naar de IJssel met een versmalling van 100 m van het zomerbed van de Waal. Voor de nummering van de startlocaties zie Figuur 3-1.



Figuur 3-4 Extra afvoer naar de IJssel als functie van de lengte van de maatregel bij een afvoer van 1000 m³/s te Lobith. De opbouw van de stuwkromme is zichtbaar voor verschillende mate van versmalling.

Uit deze resultaten komt naar voren dat het het meest effectief is om zoveel mogelijk te versmallen, het startpunt zo dicht mogelijk bij het splitsingspunt te leggen en de maatregel door te voeren over een zo groot mogelijke lengte. Door het combineren van deze drie parameters is het in theorie mogelijk om het gestelde doel van 30 m³/s extra naar de IJssel te realiseren bij een afvoer van 1000 m³/s te Lobith (Tabel 3-2). Wel is het dan nodig om te versmallen met 50 m of meer ongeacht de lengte van de maatregel. De vraag is of dit acceptabel is in verband met bevaarbaarheid. Een versmalling met 30 m wordt realistischer geacht. In dat geval is een combinatie van maatregelen nodig om het doel te behalen. Hier wordt verder op ingegaan in paragrafen 3.3.3 en 3.5.

Tabel 3-2 Extra afvoer naar de IJssel (in m³/s) bij een afvoer van 1000 m³/s te Lobith met verschillende mate van versmalling (het eerste cijfer in de maatregelnaam duidt op de lengte van de maatregel, het tweede cijfer geeft het profielnummer waar de maatregel start)

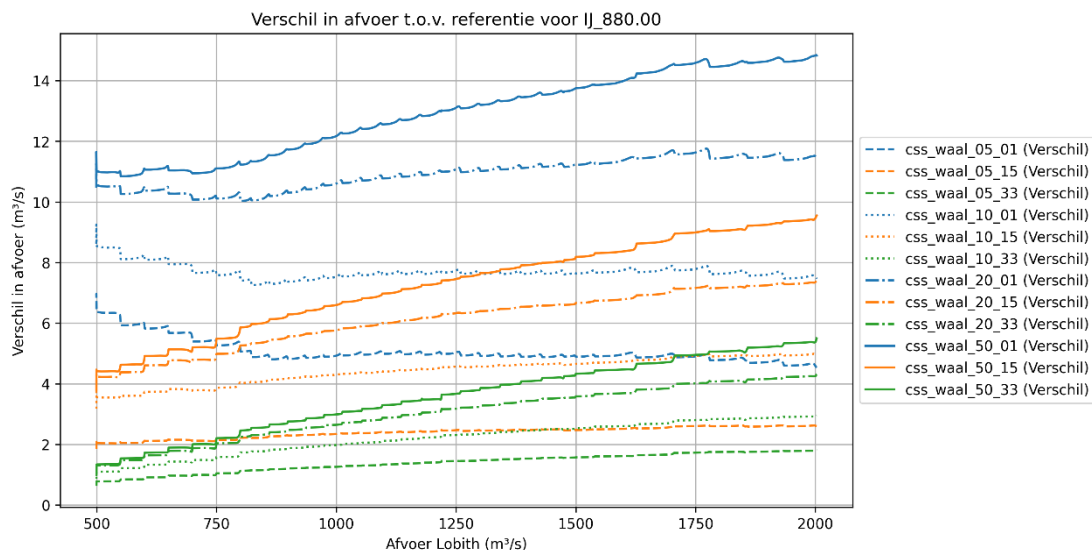
Maatregel	Versmalling 30 m	Versmalling 50 m	Versmalling 100 m
css_waal_01_01	2	3	12
css_waal_01_15	1	2	6
css_waal_01_33	1	1	5
css_waal_05_01	8	16	47
css_waal_05_15	4	8	24
css_waal_05_33	2	4	14
css_waal_10_01	12	23	62
css_waal_10_15	7	13	38
css_waal_10_33	3	6	21
css_waal_20_01	17	31	79
css_waal_20_15	9	18	50
css_waal_20_33	4	9	27
css_waal_50_01	20	36	88
css_waal_50_15	11	21	57
css_waal_50_33	5	10	32

3.3.2 Bodem ophogen

De afgelopen decennia heeft er zich op de Boven-Waal bodemerosie van meerdere decimeters voorgedaan waardoor de Waal meer afvoer is gaan trekken bij lage afvoeren (zie Figuur 2-2 en Figuur 2-3). Het ophogen van de bodem op de Boven-Waal kan ervoor zorgen dat het Pannerdensch Kanaal weer meer afvoer gaat trekken. Om een beeld te krijgen van het effect van bodemophoging op de Boven-Waal is gekozen om drie opties door te rekenen: ophoging met 10, 20 en 50 cm uniform over de gehele breedte van het zomerbed en de aangegeven lengte van de maatregel (1 – 50 km). Figuur 3-5 toont het effect van 20 cm bodemophoging. De resultaten voor de overige berekeningen (10 en 50 cm ophoging) zijn te vinden in de bijlage B.

Het volgende valt op:

- Het effect van het ophogen van de bodem is minder afvoer-afhankelijk dan dat van versmallen. Dit blijkt uit het feit dat de lijnen in Figuur 3-5 meer horizontaal lopen. Dat wil zeggen dat de extra afvoer naar de IJssel niet of nauwelijks toeneemt wanneer de afvoer bij Lobith toeneemt.
- Het effect neemt wel toe naarmate de maatregel wordt uitgevoerd over een grotere lengte (de doorgetrokken lijnen lopen iets steiler dan de stippellijnen).
- Daarnaast zien we, net zoals bij versmallen, dat de maatregel effectiever wordt wanneer deze dichtbij het splitsingspunt start wordt toegepast.



Figuur 3-5 Effect bodemophoging met 0,2 m op de Boven-Waal over verschillende lengtes (1 tot 50 km) en verschillende startlocaties op de extra afvoer naar de IJssel. Voor de nummering van de startlocaties zie Figuur 3-1

De gewenste afvoertoe name op de IJssel van rond de 30 m³/s bij een afvoer van 1000 m³/s te Lobith wordt bij enkel 50 cm bodemophoging over meer dan 20 km gehaald. De maximale toename ligt rond 30 m³/s wanneer de bodem op de Boven-Waal vanaf het splitsingspunt over een lengte van 50 km met 50 cm wordt verhoogd, zie Tabel 3-3. Hieruit kunnen we concluderen dat enkel de bodem van de Boven-Waal ophogen niet voldoende effect heeft (of de ophoging moet meer dan 0,5 m bedragen). Wel kan ophoging in combinatie met versmallen op de Waal of verbreden van het Pannerdensch Kanaal of Boven-IJssel gebruikt worden om extra afvoer naar de IJssel te sturen.

Tabel 3-3 Extra afvoer naar de IJssel bij een afvoer van 1000 m³/s met verschillende maten van bodemophoging (het eerste cijfer in de maatregelnaam duidt op de lengte van de maatregel, het tweede cijfer geeft het profielnummer waar de maatregel start)

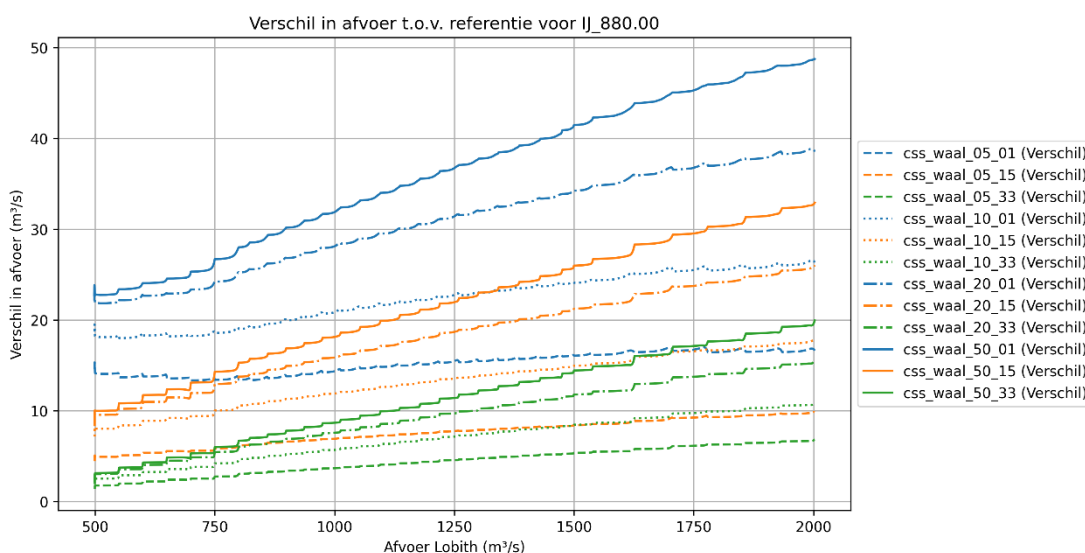
Maatregel	Ophoging 10 cm	Ophoging 20 cm	Ophoging 50 cm
css_waal_01_01	1	1	3
css_waal_01_15	0	0	1
css_waal_01_33	0	1	2
css_waal_05_01	2	5	14
css_waal_05_15	1	2	7
css_waal_05_33	1	1	4
css_waal_10_01	4	8	20
css_waal_10_15	2	4	12
css_waal_10_33	1	2	6
css_waal_20_01	5	11	28
css_waal_20_15	3	6	16
css_waal_20_33	1	3	8
css_waal_50_01	6	12	31
css_waal_50_15	3	7	18
css_waal_50_33	1	3	9

3.3.3 Combinatie van versmallen en bodemophoging

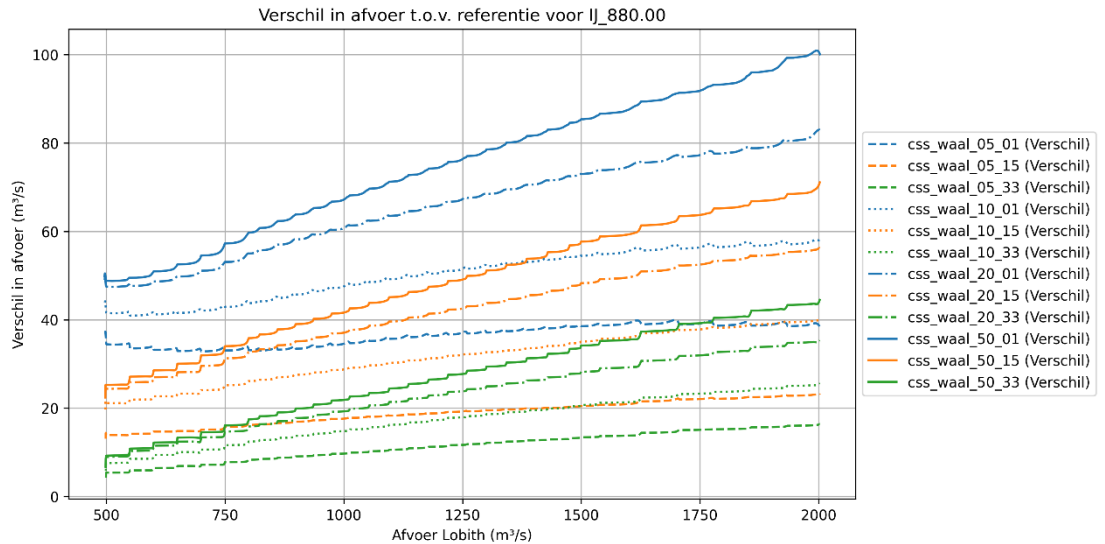
De combinatie van versmallen en het uniform ophogen van het zomerbed resulteert voor alle combinaties van lengte en startlocatie in een toename van de afvoer richting de IJssel. Voor twee combinaties zijn de resultaten weergegeven in Figuur 3-6 en Figuur 3-7. Dit zijn de combinatie van 30 m versmallen en bodemophoging 20 cm en de extremere combinatie van 50 m versmallen en bodemophoging met 50 cm.

De combinatie met 30 m versmallen en 20 cm bodemophoging haalt enkel over een lengte van 50 km en startlocatie Pannerdensche Kop bij een afvoer van 1000 m³/s te Lobith de 30 m³/s extra afvoer naar de IJssel. De maximale extra afvoer naar de IJssel die verwezenlijkt kan worden is 32 m³/s wanneer de maatregel over 50 km wordt uitgevoerd startend vanaf het splitsingspunt.

Door het zomerbed verder te versmallen en/of op te hogen kan 30 m³/s extra naar de IJssel wel door meerdere maatregelcombinaties gehaald worden. Dit is terug te zien in Figuur 3-7. Bij een combinatie van 50 m versmalling en 50 cm ophoging startend bij de Pannerdensche Kop is een lengte van 1 km al voldoende om 30 m³/s extra water naar de IJssel af te voeren (bij een afvoer van 1000 m³/s te Lobith). Om te voldoen aan de gewenste verdeling bij een afvoer van 1.300 m³/s te Lobith zou minimaal 55 m³/s extra naar de IJssel moeten worden afgevoerd. In dat geval zou de genoemde combinatie van versmallen en bodemophoging over 20 km moeten worden uitgevoerd.



Figuur 3-6 Effect van versmallen met 30 m en bodemophoging met 0,2 m op de Boven-Waal over verschillende lengtes (1 tot 50 km) en verschillende startlocaties op de extra afvoer naar de IJssel. Voor de nummering van de startlocaties zie Figuur 3.1

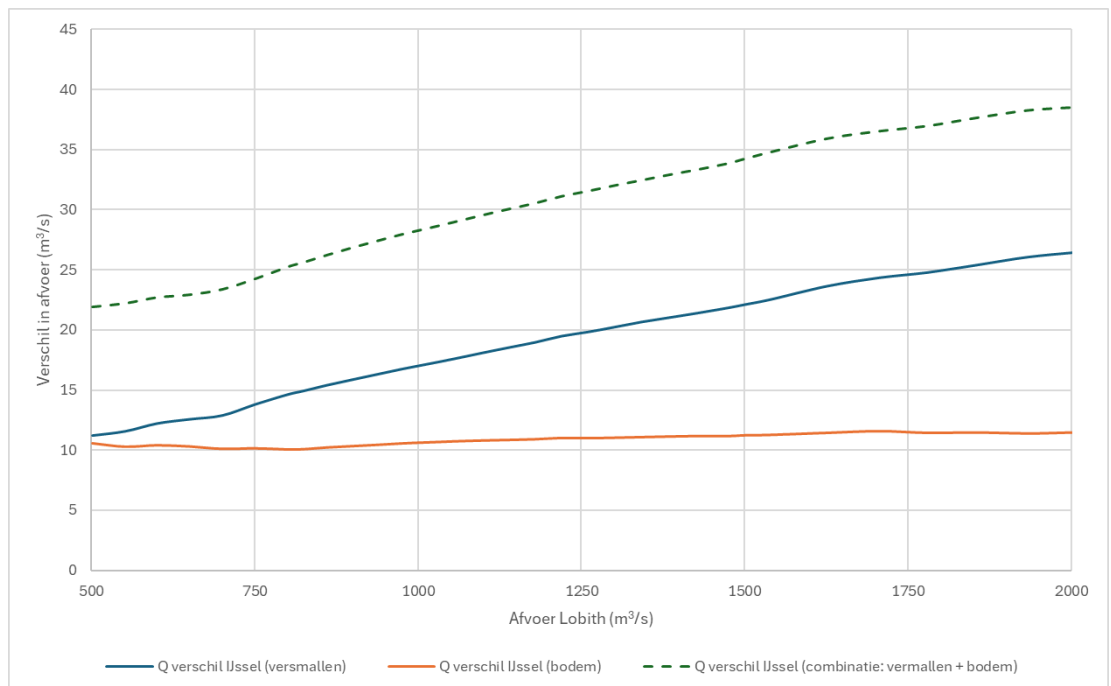


Figuur 3-7 Effect van versmallen met 50 m en bodemophoging met 0,5 m op de Boven-Waal over verschillende lengtes (1 tot 50 km) en verschillende startlocaties op de extra afvoer naar de IJssel. Voor de nummering van de startlocaties zie Figuur 3.1

Uit alle doorgerekende combinaties blijkt dat het gecombineerde effect in grote mate overeen komt met de som van het effect van de individuele maatregelen:

$$Q_{\text{extra-versmallen}} + Q_{\text{extra-bodemophoging}} \approx Q_{\text{extra-combinatie}}$$

Dit is geïllustreerd in Figuur 3-8.



Figuur 3-8 Effect van twee losse maatregelen en effect wanneer deze maatregelen worden gecombineerd. Deze figuur is een voorbeeld van de combinatie: 30 m versmallen op de Waal en bodemophoging van 20cm op de Waal.

Ook voor een versmalling van 30 m in combinatie met een groter bodemophoging dan 20 cm is het mogelijk om 30 m³/s extra naar de IJssel te krijgen bij een afvoer van 1000 m³/s te Lobith. Ter illustratie is een deel van de kruistabel voor de combinatie 30 m versmallen + 50 cm bodemophoging toegevoegd als Tabel 3-4. Hierin zien we dat deze maatregel uitgevoerd over een lengte van 10 km vanaf het splitsingspunt voldoende kan zijn. Wanneer verder benedenstrooms gestart wordt dient de maatregel langer te worden. Aanvullende figuren zijn te vinden in bijlage B.

Tabel 3-4 Uitsnede van kruistabel voor de combinatie 30 m versmallen en 50 cm bodemophoging. In groen gemarkeerd de combinaties van lengte en startlocatie die resulteren in voldoende extra afvoer naar de IJssel. De **dikgedrukte** getallen zijn berekend, de overige waardes zijn geïnterpoleerde waardes.

vanaf RKM	Locatie	Vanaf splitsingspunt (km)	Lengte Maatregel (km)							
			10	12	15	20	25	30	40	50
868	Pannerdensche kop	0	35	38	41	46	47	48	50	52
		2	31	33	36	41	42	43	44	46
		4	27	29	32	36	37	37	39	40
		6	23	25	27	30	31	32	33	34
874	Bodemkribben Erlecom	7	21	23	25	28	28	29	30	31
		8	20	21	23	26	27	27	29	30
		10	18	19	21	23	24	24	25	26
		12	15	16	18	20	21	21	22	23
		14	13	14	15	17	18	18	19	19
884	Vaste Laag Nijmegen	16	11	11	12	14	14	15	15	16

3.4 Maatregelen Pannerdensch Kanaal en Boven-IJssel

3.4.1 Doorgerekende maatregelen

Op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel is enkel gerekend met het verbreden van het zomerbed met 30 m om meer afvoer in noordelijke richting te trekken. De huidige breedte van het zomerbed op het Pannerdensch Kanaal varieert tussen de 125 en 150 m en op de Boven-IJssel tussen de 90 en 100 m. De uitgevoerde berekeningen zijn weergegeven in Tabel 3-5 en Tabel 3-6. Opgemerkt wordt dat bij verbreding van de Boven-IJssel geen verbreding is doorgevoerd op het Pannerdensch Kanaal. Dit is gedaan om gevoel te krijgen voor de effectiviteit van een maatregel op één riviertak.

Tabel 3-5 Combinatie van maatregelparameters voor het Pannerdensch Kanaal. Elke unieke combinatie is doorgerekend.

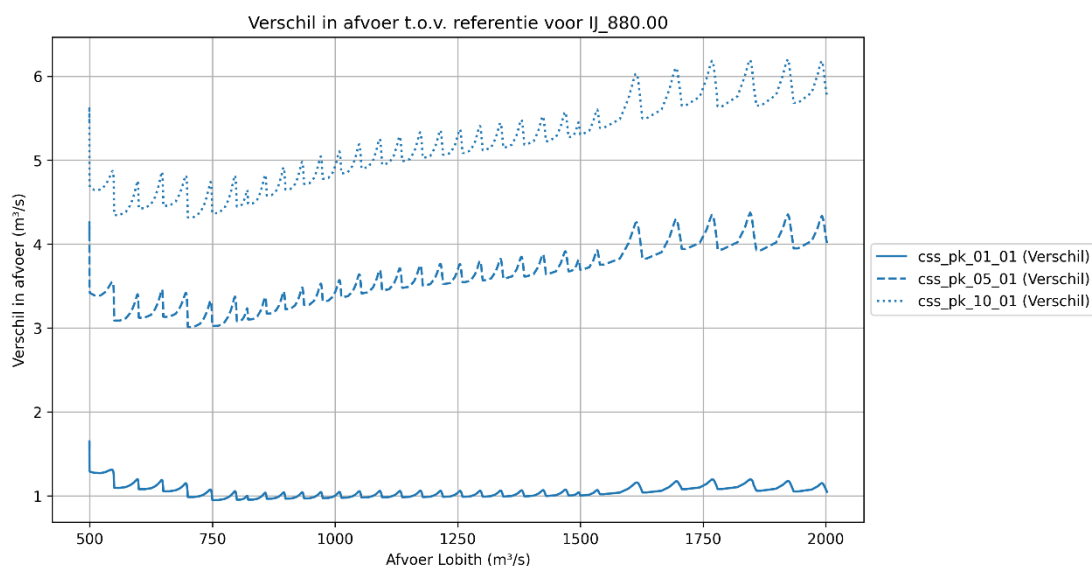
Verbreden zomerbed (m)	Lengte maatregel (km)	Startpunt (RKM)
30	1	Splitsingspunt (PK) (868)
	5	
	10	

Tabel 3-6 Combinatie van maatregelparameters voor de Boven-IJssel. Elke unieke combinatie is doorgerekend. De dikgedrukte variabelen worden het meest realistisch geacht. In totaal zijn er 10 combinaties doorgerekend.

Verbreden zomerbed (m)	Lengte maatregel (km)	Startpunt (RKM)
15	1	IJsselkop (IJK) (879)
30	5	
	10	
	20	
	50	

3.4.2 Verbreden Pannerdensch Kanaal

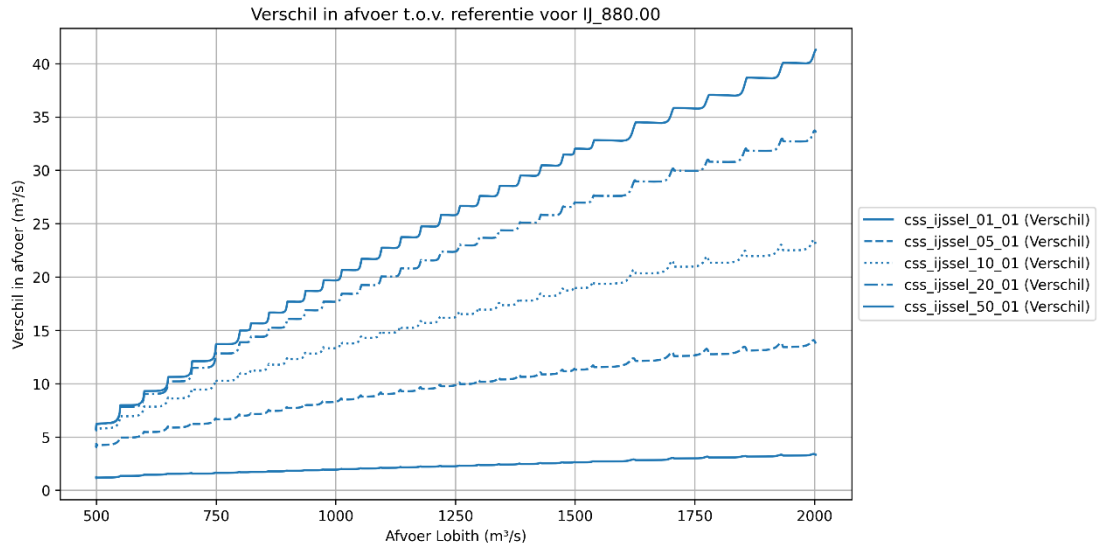
Het verbreden van het zomerbed van het Pannerdensch Kanaal sorteert weinig effect. Wanneer het gehele Pannerdensch Kanaal met 30 m wordt verbreed over een lengte van 10 km, zorgt dit bij een afvoer van 1000 m³/s te Lobith voor een toename van de IJsselafvoer met 5 m³/s (Figuur 3-9). Dat dit effect klein is kan worden toegeschreven aan het kleine verhang over het Pannerdensch Kanaal, doordat stuw Driel dichtstaat bij lage afvoeren. Hierdoor wordt er ondanks de toegenomen breedte nauwelijks extra afvoer getrokken wanneer de ander riviertakken onveranderd blijven.



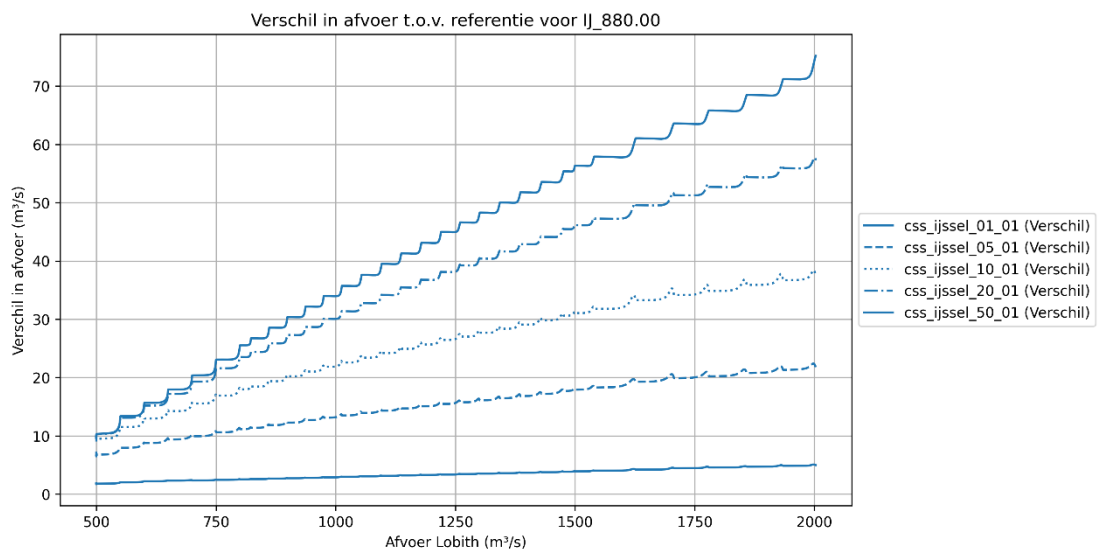
Figuur 3-9 Extra afvoer naar de IJssel met een verbreding van 30 m van het zomerbed van het Pannerdensch Kanaal. De fluctuaties worden veroorzaakt door de overgang van de stationaire afvoerniveaus in de gebruikte randvoorwaarden. Op moment dat bij Lobith de afvoer stijgt duurt het 2-3 uur voordat dit op het Pannerdensch Kanaal ook het geval is. De waarden die behoren bij de stationaire situatie zijn de laagste waarden na de piekjes.

3.4.3 Verbreden Boven-IJssel

Het verbreden van de Boven-IJssel lijkt effectiever dan het verbreden van het Pannerdensch Kanaal. Dit komt doordat de Boven-IJssel een groter verhang heeft dan het Pannerdensch Kanaal. Wel levert enkel het verbreden met 15 m (tot een zomerbed breedte van circa 105 m) nog niet de gewenste extra afvoer van 30 m³/s bij een afvoer van 1000 m³/s te Lobith op. Bij een verbreding van 30 m (tot circa 120 m breedte) wordt dit wel gehaald wanneer de maatregel langer is dan 20 km. Bij een verbreding van 15 m levert dit 20 m³/s extra op bij een maatregelengte van 50 km, bij verbreding met 30 m loopt dit op tot 36 m³/s.



Figuur 3-10 Extra afvoer naar de IJssel met een verbreding van 15 m van het zomerbed van de Boven-IJssel.



Figuur 3-11 Extra afvoer naar de IJssel met een verbreding van 30 m van het zomerbed van de Boven-IJssel.

3.5 Combinatie maatregelen Boven-Waal en Boven-IJssel

Wanneer wordt uitgegaan van realistische maatregelen blijkt uit de resultaten dat aanpassingen op één riviertak niet zorgen voor de gewenste hoeveelheid extra afvoer naar de IJssel.

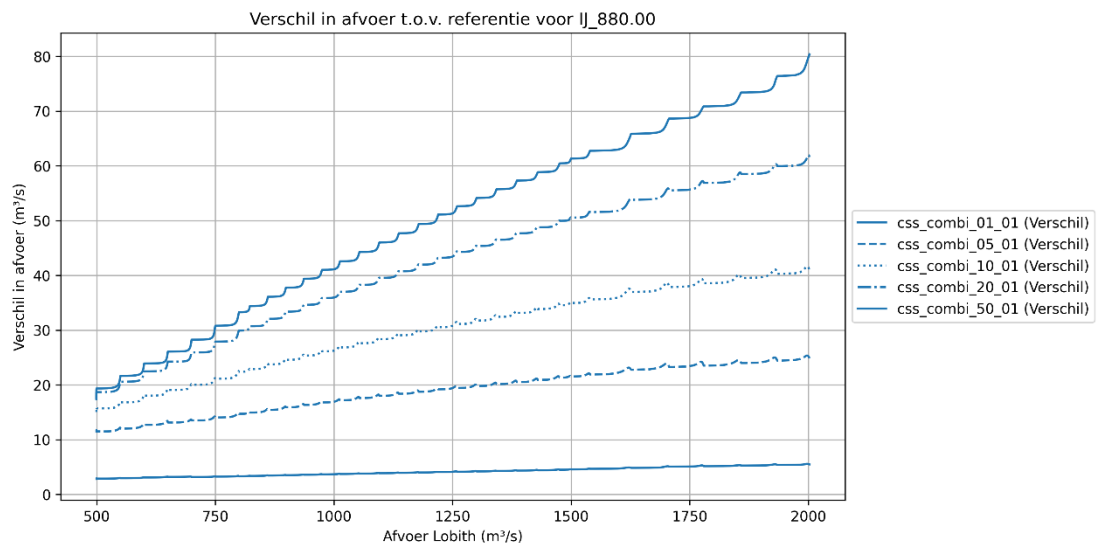
Om te bepalen of en wanneer de combinatie van 'realistische' ingrepen voldoende extra afvoer naar de IJssel kan sturen zijn drie combinaties doorgerekend, zie Tabel 3-7.

Tabel 3-7 Combinatie maatregelen Waal en Boven-IJssel

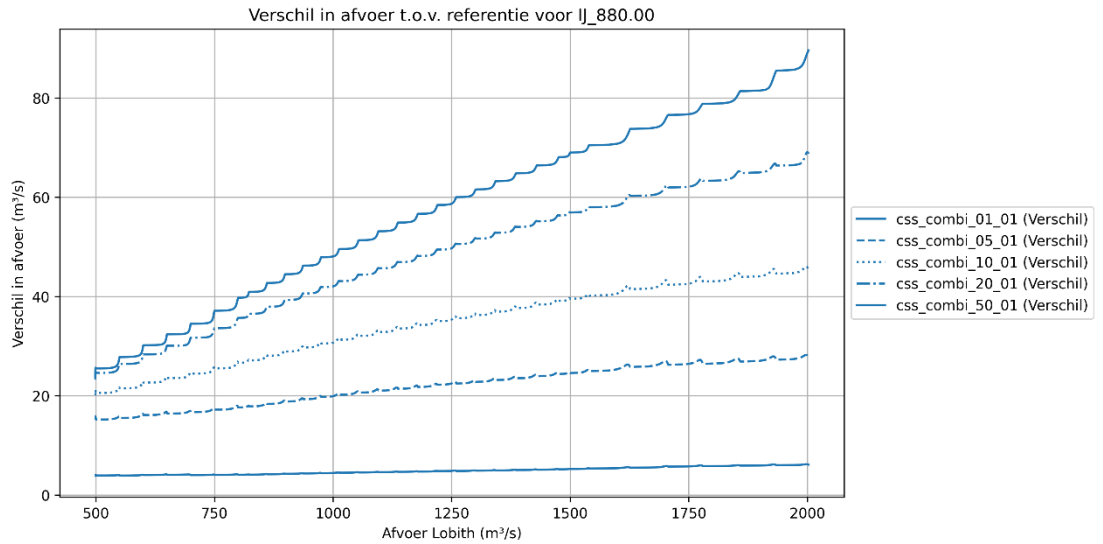
#	Versmalling Waal (m)	Bodemophoging Waal (m)	Verbreding Boven-IJssel (m)
1	30	0	15
2	30	0,1	15
3	30	0,2	15

De maatregelcombinaties zijn doorgerekend voor de maatregellengtes van 1, 5, 10, 20 en 50 km. De lengtes van de maatregel op de Waal en Boven-IJssel zijn steeds gelijk aan elkaar.

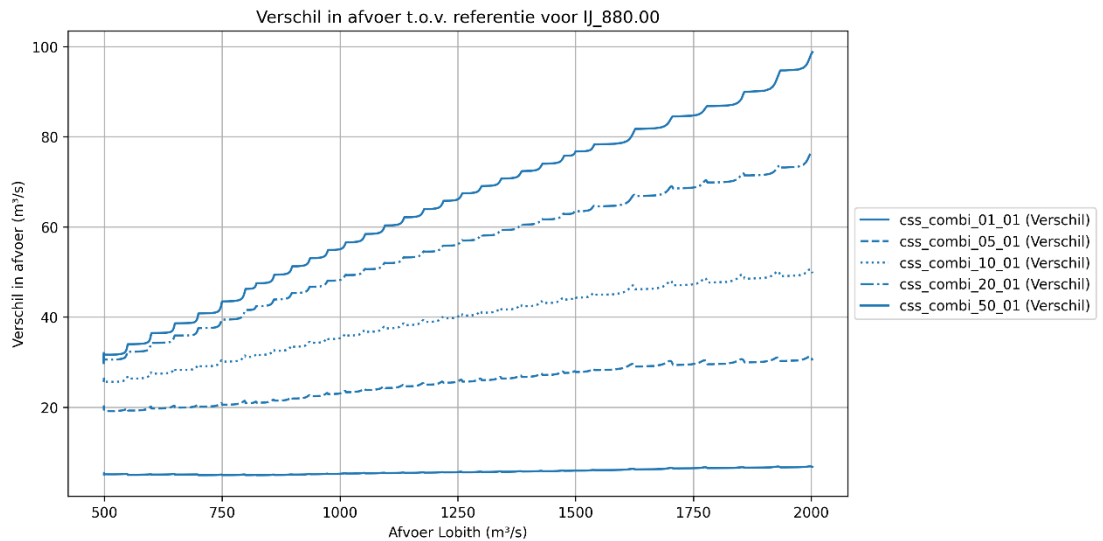
De combinatie van 30 m versmallen op de Boven-Waal en 15 m verbreden op de Boven-IJssel maakt het op basis van de berekende sommen mogelijk om 30 m³/s extra naar de IJssel te sturen bij een afvoer van 1000 m³/s te Lobith. Dit is terug te zien in Figuur 3-12, Figuur 3-13 en Figuur 3-14. Wanneer de bodem op de Boven-Waal niet wordt opgehoogd wordt 30 m³/s enkel gehaald wanneer de maatregel op zowel de Waal als de Boven-IJssel over 13 km wordt uitgevoerd (zie ook Tabel 3-8). Om ook bij een afvoer van 1.300 m³/s te Lobith aan de gewenste verdeling te voldoen is uitvoering over grotere lengte nodig (ongeveer 50 km). Wanneer de bodem wel wordt opgehoogd neemt de benodigde lengte af (Tabel 3-9).



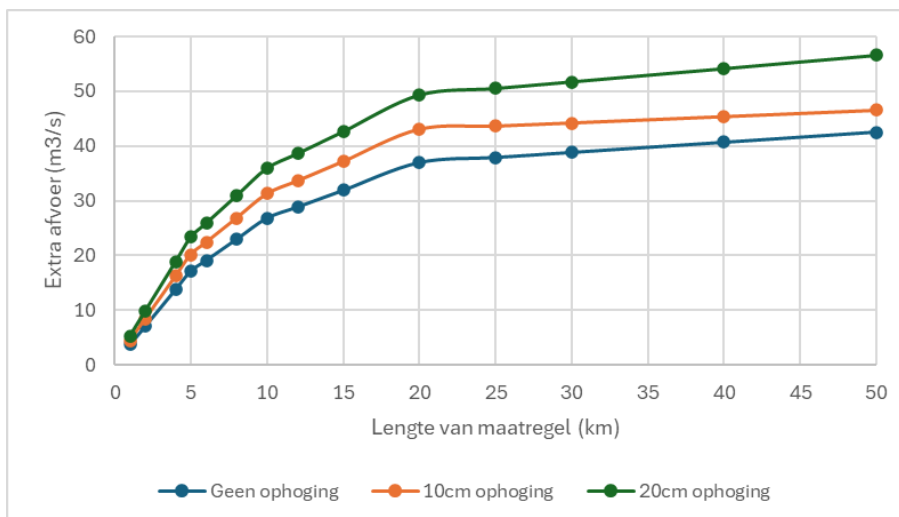
Figuur 3-12 Extra afvoer naar de IJssel met een versmalling van 30 m op de Waal, zonder bodemophoging en verbreding van 15 m van het zomerbed van de Boven-IJssel.



Figuur 3-13 Extra afvoer naar de IJssel met een versmalling van 30 m op de Waal, met bodemophoging van 10 cm en verbreding van 15 m van het zomerbed van de Boven-IJssel.



Figuur 3-14 Extra afvoer naar de IJssel met een versmalling van 30 m op de Waal, met bodemophoging van 20 cm en verbreding van 15 m van het zomerbed van de Boven-IJssel.



Figuur 3-15 Relatie bij een afvoer te Lobith van 1000 m³/s tussen de lengte van de maatregel en de extra afvoer richting de IJssel voor de gecombineerde maatregelen: 30 m versmallen Boven-Waal, 15 m verbreden Boven-IJssel en verschillende mate van bodemophoging.

Tabel 3-8 Extra afvoer naar de IJssel bij een afvoer van 1000 m³/s met verschillende mate van bodemophoging voor de gecombineerde maatregel waarbij de Waal 30 m wordt versmald en de IJssel 15 m wordt verbreed, uitgevoerd over verschillende lengtes. Combinaties die leiden tot een toename van minimaal 30 m³/s zijn groen gekleurd. De **dikgedrukte** getallen zijn berekend, de overige waarden zijn geïnterpoleerde waarden.

Lengte van maatregel (km)	Geen ophoging	Ophoging 10 cm	Ophoging 20 cm
1	4	5	5
2	7	8	10
4	14	16	19
5	17	20	23
6	19	22	26
8	23	27	31
10	27	31	36
12	29	34	39
13	30	35	40
14	31	36	41
15	32	37	43
16	33	38	44
17	34	40	45
18	35	41	47
19	36	42	48
20	37	43	49
25	38	44	51
30	39	44	52
40	41	45	54
50	43	47	57

Tabel 3-9 Extra afvoer naar de IJssel bij een afvoer van 1.300 m³/s te Lobith met verschillende mate van bodemophoging voor de gecombineerde maatregel waarbij de Waal 30 m wordt versmald en de IJssel 15 m wordt verbreed, uitgevoerd over verschillende lengtes. Combinaties die leiden tot een toename van ongeveer 55 m³/s zijn groen gekleurd.

Lengte van de maatregel (km)	Geen ophoging	Ophoging 10cm	Ophoging 20cm
5	19	22	26
10	31	36	40
20	45	51	58
50	54	61	69

Bij een combinatie van maatregelen op zowel de Waal als de IJssel lijkt het maakbaar om bij lage afvoeren voldoende extra afvoer richting de IJssel te sturen. De maatregelen zijn echter wel zeer omvangrijk en dienen over grote lengtes te worden gerealiseerd.

3.6 Verandering waterstand en waterdiepte

3.6.1 Verandering in waterstand en waterdiepte als functie van de afvoer te Lobith

Bij de beschrijving van de resultaten is voornamelijk gekeken naar het effect op de afvoerverdeling maar een verandering van de afvoerverdeling heeft ook invloed op de waterstand en de waterdiepte. De afvoer die in deze situatie extra naar de IJssel stroomt, gaat ten koste van de Waalafvoer. Afname van de waterstand en daarmee waterdiepte kunnen op de Waal zorgen voor verminderde bevaarbaarheid en lagere grondwaterstanden in de uiterwaarden wat nadelig is voor de natuur. Tegelijkertijd verkleint de versmallingsmaatregel het doorstroomprofiel wat weer zorgt voor een hogere waterstand. Dit tweede aspect heeft een groter effect op de waterstand over het traject waarover de maatregel is uitgevoerd: ondanks een afname in rivierafvoer nemen de waterstanden en waterdieptes hier iets toe. Benedenstreams van de maatregelen resulteert de lagere rivierafvoer in een afname van de waterstand en de waterdiepte. Dit is voor twee locaties op de Waal terug te zien in Tabel 3-10, bij de afvoeren van 1000 m³/s en 2000 m³/s. De effecten over het gehele afvoerbereik, voor de gecombineerde maatregel met en zonder bodemophoging zijn weergegeven in Figuur 3-17 t/m Figuur 3-19.

Tabel 3-10 Effect van de gecombineerde maatregelen (Waal + Boven-IJssel) over een lengte van 50 km met en zonder bodemophoging van 20 cm. De resultaten zijn weergegeven voor twee locaties op de Waal 1) nabij het splitsingspunt (rkm 868) en 2) 32 kilometer benedenstreams van het splitsingspunt op de Waal (rkm 900).

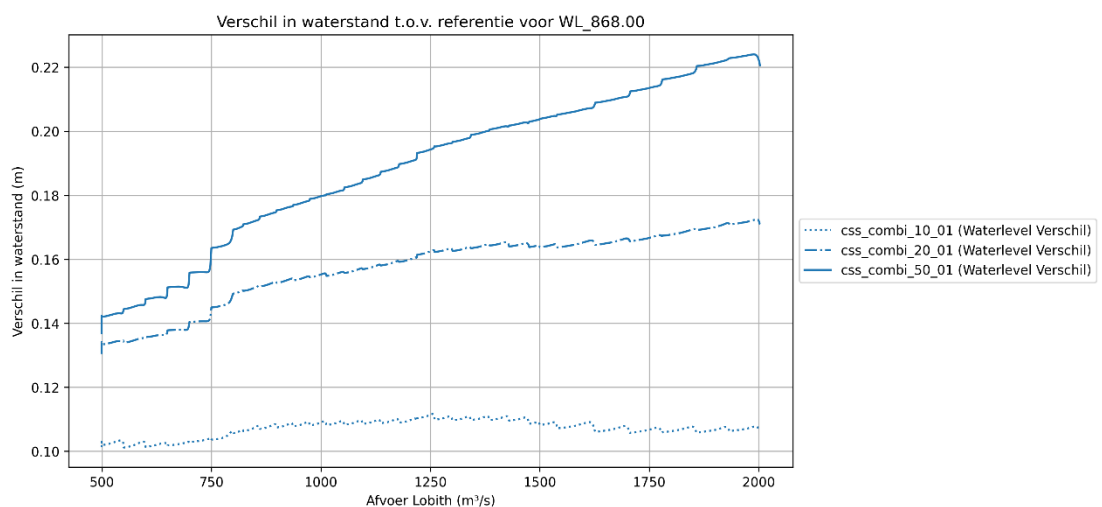
Locatie (rkm)	Verschil	Zonder bodemophoging		Met bodemophoging (20 cm)	
		1000 m ³ /s	2000 m ³ /s	1000 m ³ /s	2000 m ³ /s
868	Waterstand	18 cm	22 cm	33 cm	36 cm
	Waterdiepte	18 cm	22 cm	13 cm	16 cm
900	Waterstand	9 cm	10 cm	20 cm	18 cm
	Waterdiepte	9 cm	10 cm	0 cm	-2 cm

De maatregel met 20 cm bodemophoging over 50 km zorgt voor gemiddeld 14 cm extra waterstandsverhoging. Tegelijkertijd is de toename van de waterdiepte kleiner wanneer de bodem wordt opgehoogd. Daarnaast zien we dat wanneer de maatregel over korte afstand wordt uitgevoerd de waterstandstoename per toenemende afvoer afneemt (de lijn vlakt af). Bij een maatregellengte over 10 km neemt de absolute waterstandstoename zelfs af naarmate de afvoer te Lobith stijgt (zie onderste lijn in Figuur 3-17).

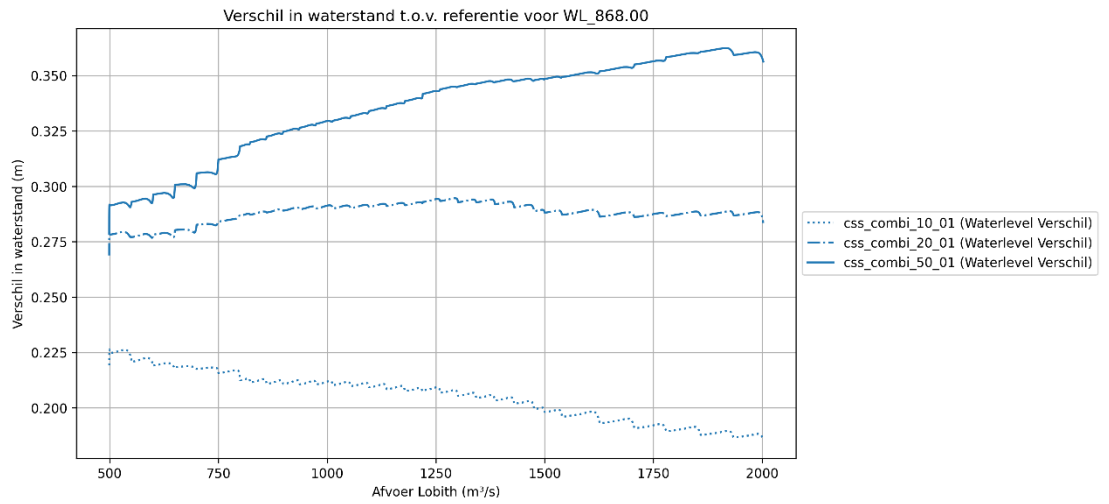
Benedenstrooms van de maatregel leidt de lagere afvoer tot een afname van de waterstand en daarmee van de waterdiepte (zie onderste lijnen in Figuur 3-18 en Figuur 3-19; het modeluitvoerpunt lag benedenstrooms van het traject waarop de maatregel is uitgevoerd). De bovenste lijn behoort bij een maatregellengte van 50 km. In dat geval is de maatregel dus nog van kracht op het gekozen modeluitvoerpunt. De toename van de waterstand bedraagt ongeveer 10 en 20 cm voor respectievelijk de maatregel zonder en met bodemophoging. Ook hier zien we dat de waterdiepte bij de maatregel zonder bodemophoging groter is (Tabel 3-10). Aangezien de toename van de waterstand gelijk is aan de bodemophoging blijft de waterdiepte hetzelfde, ondanks de afgenomen afvoer.

Voor maatregelen van 10 en 20 km zien we zowel zonder als met bodemverhoging een afname in de waterstand en dus waterdiepte. Voor deze lengtes is de maatregel niet meer van kracht op rkm 900.00 en heeft de Waal haar originele geometrie met een breder zomerbed. Door de lagere afvoeren resulteert dit in een afname van de waterstand ten opzichte van de referentie.

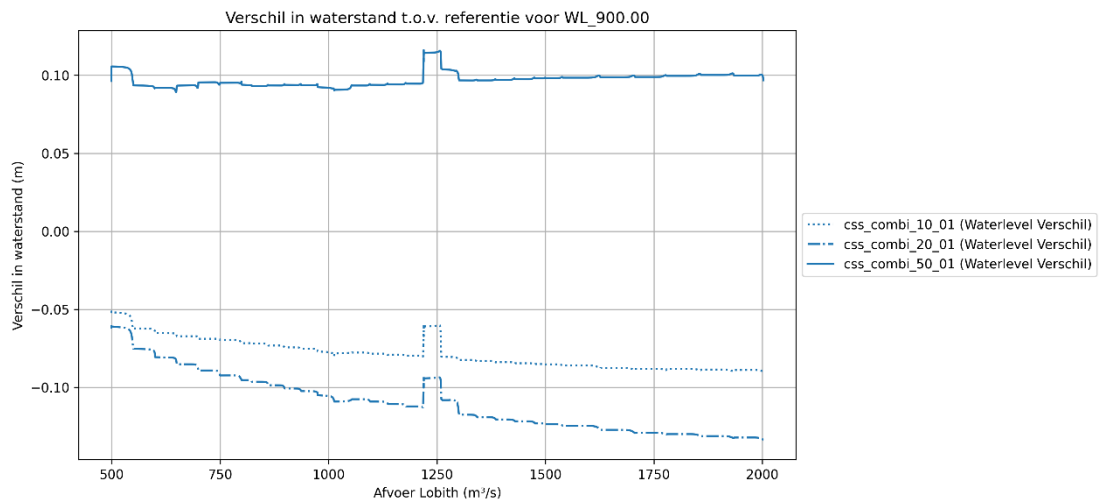
De waterstandseffecten voor de overige maatregelen zijn onderdeel van de meegestuurde digitale bijlage.



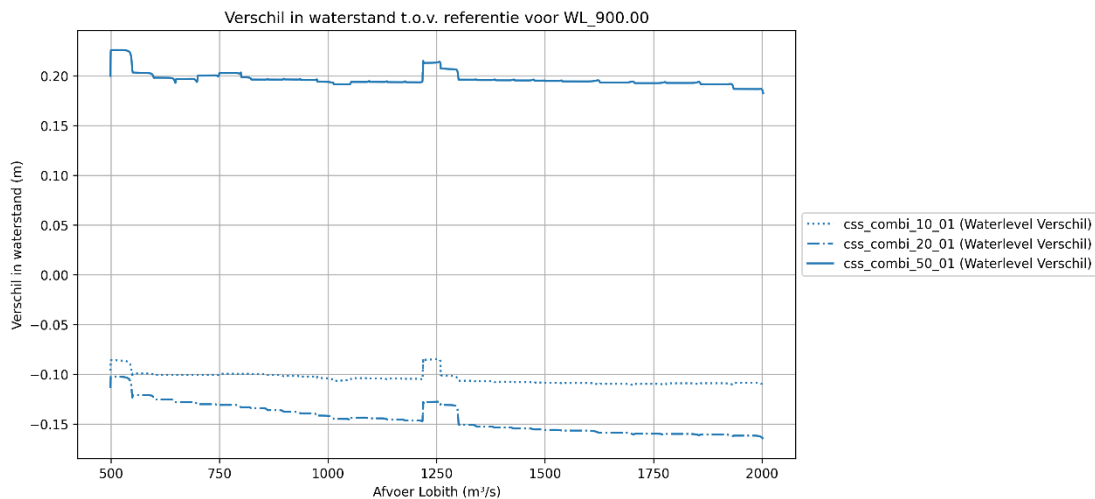
Figuur 3-16 Verandering van de waterstand nabij het splitsingspunt met een versmalling van 30 m op de Waal en verbreding van 15 m op de IJssel. Met deze maatregel is de bodem **niet** opgehoogd.



Figuur 3-17 Verandering van de waterstand nabij het splitsingspunt met een vernsmalling van 30 m en bodemophoging van 20 cm op de Waal en verbreding van 15 m op de IJssel. Verandering in waterdiepte kan worden berekend door 20 cm van deze waarden af te trekken.



Figuur 3-18 Verandering van de waterstand 30 km benedenstrooms van het splitsingspunt met een vernsmalling van 30 m op de Waal en verbreding van 15 m op de IJssel. Met deze maatregel is de bodem **niet** opgehoogd.

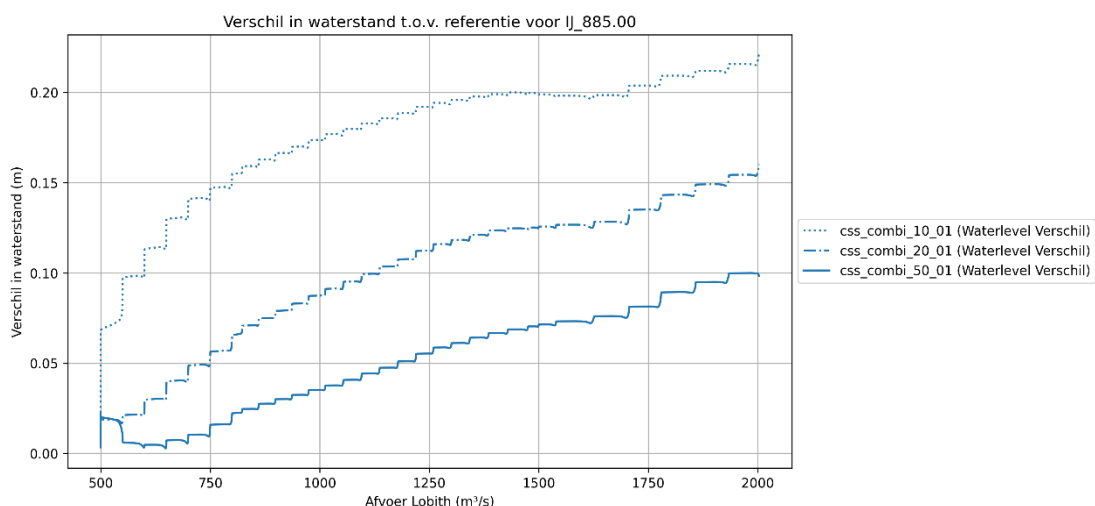


Figuur 3-19 Verandering van de waterstand 30 km benedenstrooms van het splitsingspunt met een vernauwing van 30 m en bodemophoging van 20 cm op de Waal en verbreding van 15 m op de IJssel.

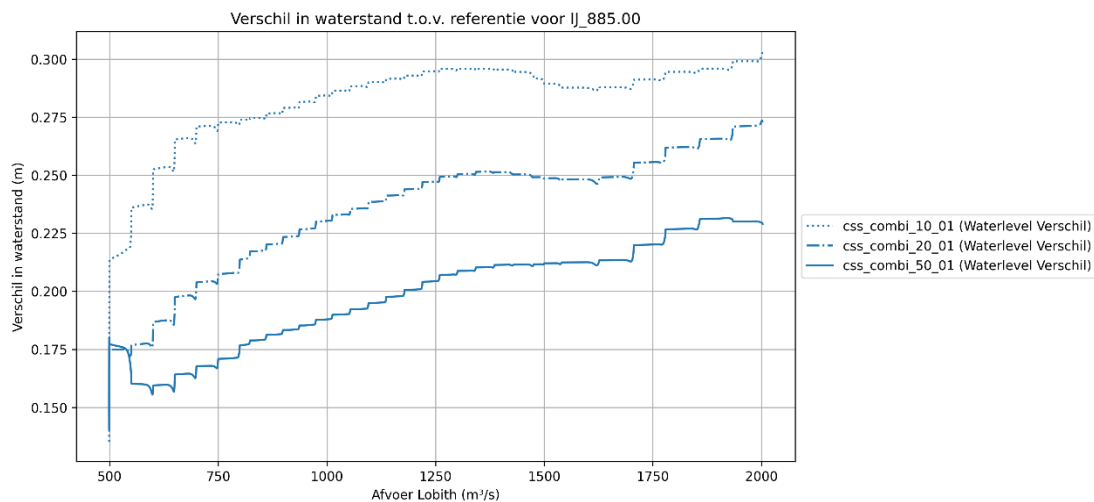
Op de IJssel is voor alle combinaties en afvoeren een verhoging van de waterstand zichtbaar. Het negatieve effect van verbreding van de IJssel is dus kleiner dan het positieve effect van de toename van de afvoer. In tegenstelling tot de Waal zien we hier dat verder benedenstrooms de waterstandsstijging toeneemt aangezien de rivier weer smaller wordt.

In tegenstelling tot de Waal zien we bovenstrooms op de IJssel (IJ_885.00) de grootste waterstandstoename bij uitvoering van de maatregel over een lengte van 10 km (Figuur 3-20 en Figuur 3-21). Dit wordt veroorzaakt doordat 10 km benedenstrooms het zomerbed weer smaller wordt en in het bovenstroomse deel voor opstuwung zorgt. Dit effect is op deze locatie kleiner naarmate de lengte van de maatregel groter is. Benedenstrooms van de maatregelen (IJ_930.00) is de grootste waterstandstoename terug te zien bij de maatregel over 50 km (Figuur 3-22 en Figuur 3-23). Dit wordt veroorzaakt doordat met deze maatregel er de meeste extra afvoer naar de IJssel wordt gerealiseerd.

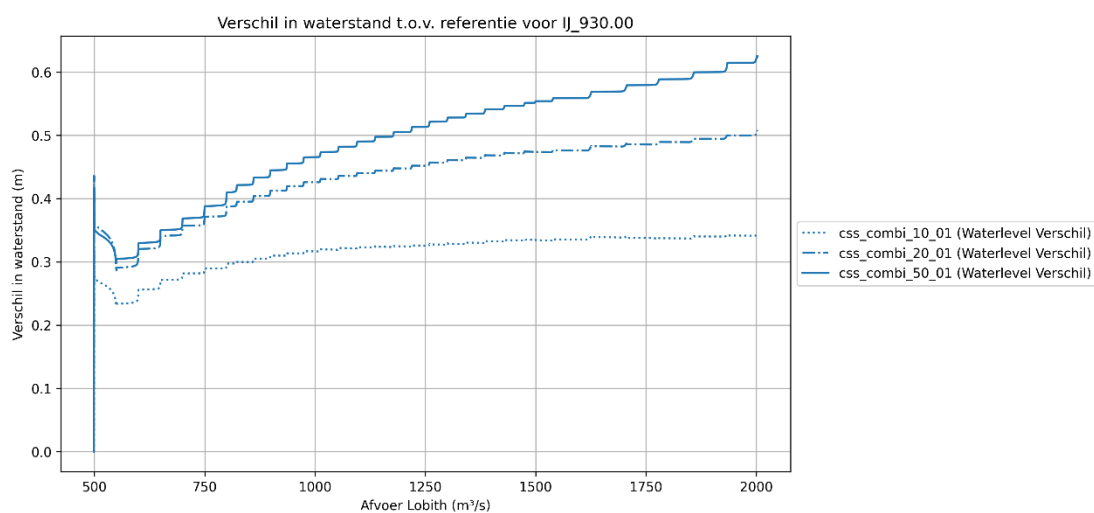
Verder valt op dat voor alle locaties op de IJssel de waterstand, en daarmee de waterdiepte, meer toeneemt wanneer de bodem op de Waal wordt opgehoogd (Figuur 3-21 en Figuur 3-23). De bodemophoging resulteert immers in meer afvoer naar de IJssel.



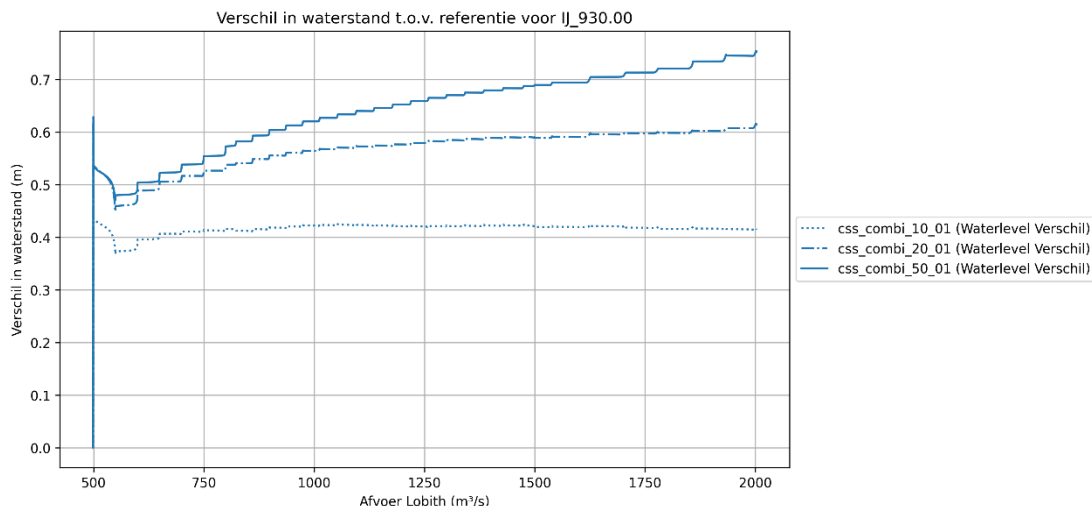
Figuur 3-20 Waterstandstoename in het bovenstroomse deel van de IJssel (IJ_885.00) voor de maatregelen **zonder** bodemophoging op de Waal.



Figuur 3-21 Waterstandstoename op het bovenstroomse deel van de IJssel (IJ_885.00) voor de maatregelen met bodemophoging op de Waal.



Figuur 3-22 Waterstandstoename op de Midden-IJssel (IJ_930.00) voor de maatregelen zonder bodemophoging op de Waal. Deze locatie ligt benedenstrooms van de doorgerekende maatregelen.



Figuur 3-23 Waterstandstoename op de Midden-IJssel (IJ_930.00) voor de maatregelen met bodemophoging op de Waal. Deze locatie ligt benedenstrooms van de doorgerekende maatregelen.

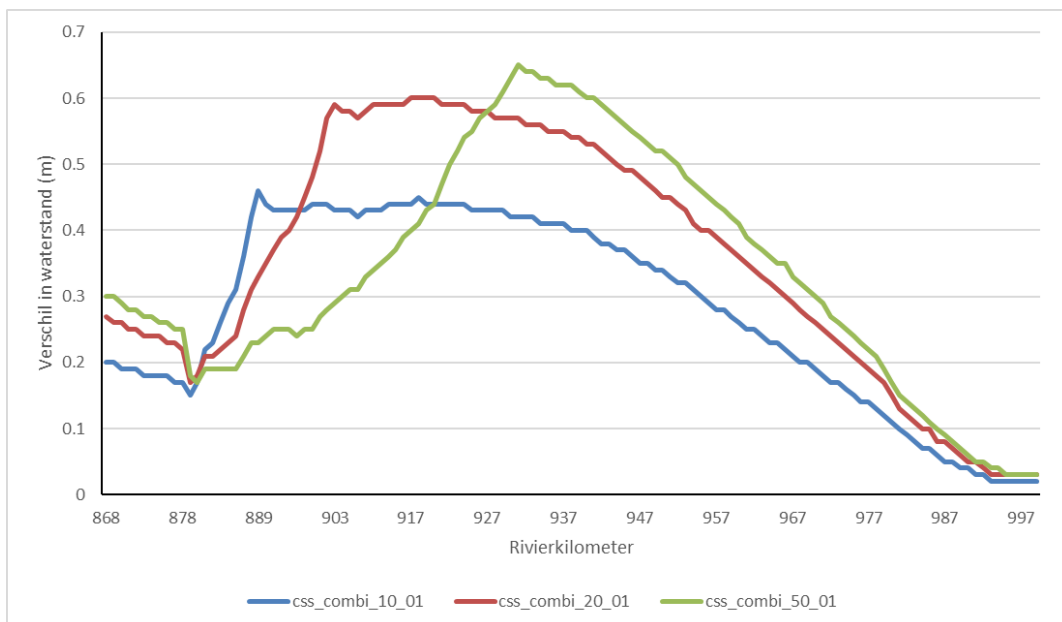
3.6.2 Verandering in waterstand en waterdiepte in de lengterichting van de rivier

Het verloop van de waterstandsverandering bij een afvoer van 1000 m³/s is voor de Waal en IJssel weergegeven in Figuur 3-24 en Figuur 3-25 voor de maatregelcombinatie versmalling Waal, verbreding IJssel en 20 cm bodemophoging Waal, allen uitgevoerd over een lengte van 10, 20 en 50 km. De resultaten van de twee overige combinaties met bodemophogingen zijn opgenomen in de digitale bijlage.

Figuur 3-24 laat zien dat de waterstanden langs het Pannerdensch Kanaal en de IJssel toenemen als gevolg van de afvoertoename. De waterstand op het Pannerdensch Kanaal stijgt door de extra afvoer. Op de locatie waar de verbredingsmaatregel op de IJssel start is de toename minder groot (IJ_880.00). Verder benedenstrooms neemt de waterstand weer verder toe. De waterstandstoename is het grootst vanaf het punt waar de IJssel weer smaller wordt (einde van de maatregel)¹⁴. Omdat de waterstandstoename op enige afstand van de IJsselkop groter is dan direct benedenstrooms van de IJsselkop zal sprake zijn van een afname van het verhang ten opzichte van dat in de huidige situatie. Dit kan leiden tot aanzanding. Dit vergt aandacht bij de verdere uitwerking van de maatregel, anders zal de aanzanding een deel van het effect teniet doen.

Aangezien er geen bodemverhoging wordt toegepast op de IJssel is de verandering van de waterdiepte gelijk aan de verandering van de waterstand en is deze niet weergegeven in een figuur.

¹⁴ Deze waterstandsstijging komt redelijk goed overeen met de vuistregel (voor lage afvoeren te Lobith) dat 1 m³/s extra afvoer op de IJssel resulteert in 1 cm waterstandsstijging



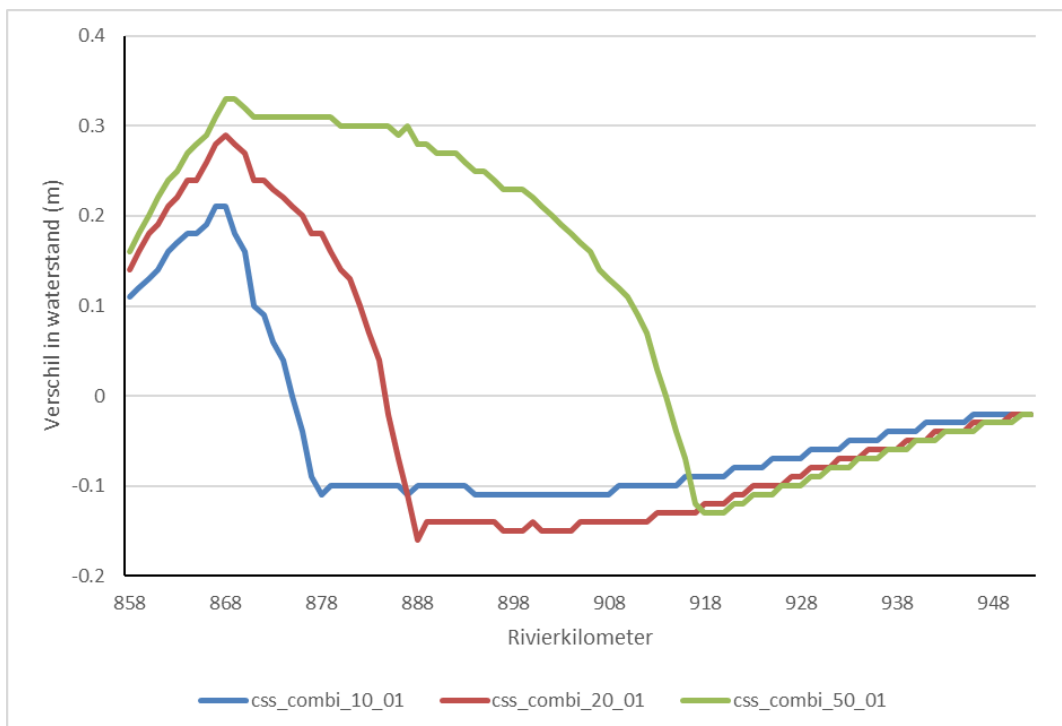
Figuur 3-24 Verloop waterstandsverandering op het Pannerdensch Kanaal en de IJssel bij versmalling van 30 m op de Waal en verbreding van 15 m op de IJssel, bij een afvoer van 1000 m³/s te Lobith.

Figuur 3-25 toont de waterstandsverandering op de Waal. De toename is het grootst bij het splitsingspunt. De maatregel, startend vanaf rkm 868, zorgt ook voor veel opstuwung op de Boven-Rijn. Benedenstrooms van de maatregel neemt de waterstand met ongeveer 10 tot 15 cm af ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van de lagere afvoer. Verder benedenstrooms neemt het verschil in waterstand af, maar blijft over de gehele Beneden-Waal en Boven-Merwede lager dan in de situatie zonder maatregelen.

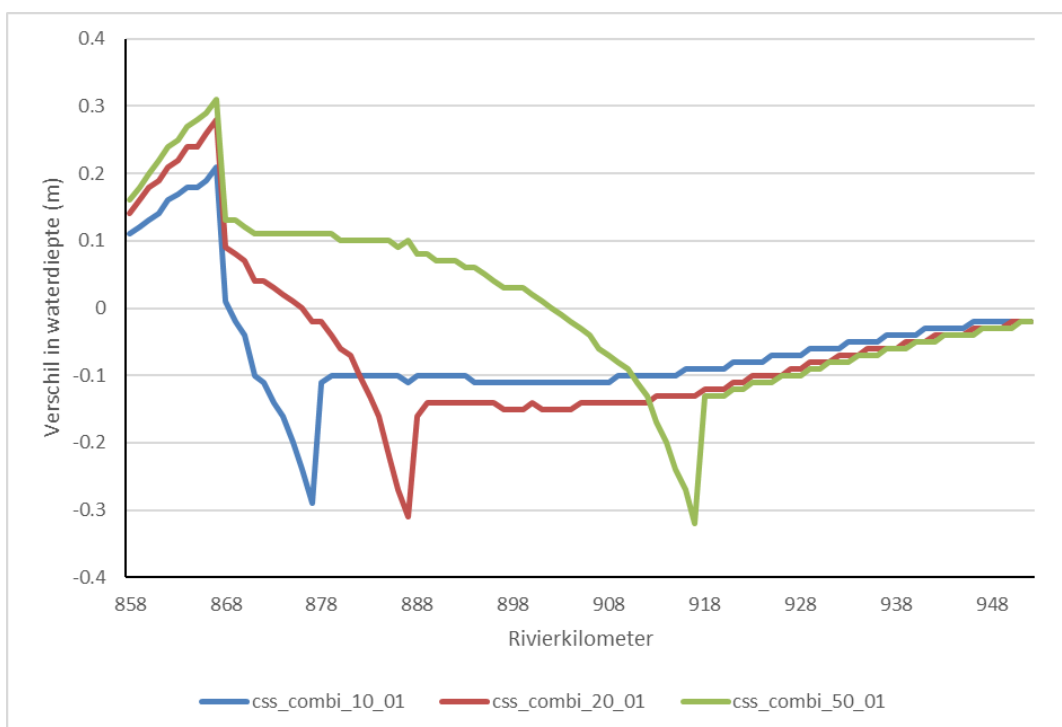
Wat opvalt is dat de maatregel resulteert in een toename van het verhang op de Boven-Waal. Dit kan leiden tot extra erosie. Ook dit vraagt om extra aandacht bij het dimensioneren van de oevergeulen en het bepalen van het moment waarop deze mee moeten gaan stromen.

In Figuur 3-26 is het verloop van de verandering van waterdiepte weergegeven. Wanneer de bodem met 20 cm wordt opgehoogd zien we de grootste toename van de waterdiepte op de Boven-Rijn. De waterdiepte neemt sterk af vanaf het punt dat de bodem wordt opgehoogd. Voor de maatregel over 10 km neemt de waterdiepte op de gehele Waal af met maximaal 30 cm bij rivierkilometer 875. Dit is het meest benedenstroomse deel van de maatregel. Benedenstrooms van de maatregel ligt de rivierbodem plots 20 cm lager en neemt de waterdiepte vrij abrupt weer toe. Door de lagere afvoer blijft de waterdiepte verder benedenstrooms wel 10 cm lager dan in de referentiesituatie. Naarmate de maatregel over een langer traject wordt uitgevoerd neemt de waterdiepte over een langer traject toe. Wel neemt uiteindelijk op het punt waar de maatregel eindigt de waterdiepte sterker af en wordt benedenstrooms de rivier ondieper. Dit komt doordat met een langere maatregel de afvoer richting de Waal lager is. Dit punt is voor de 10, 20 en 50 km maatregel respectievelijk rkm 878, 888 en 918.

Wanneer de bodem niet wordt opgehoogd is de verandering van de waterdiepte gelijk aan de verandering van de waterstand.



Figuur 3-25 Verloop waterstandsverandering op de Boven-Rijn – Waal bij een bij versmalling van 30 m op de Waal en verbreding van 15 m op de IJssel, bij een afvoer van 1000 m³/s te Lobith.



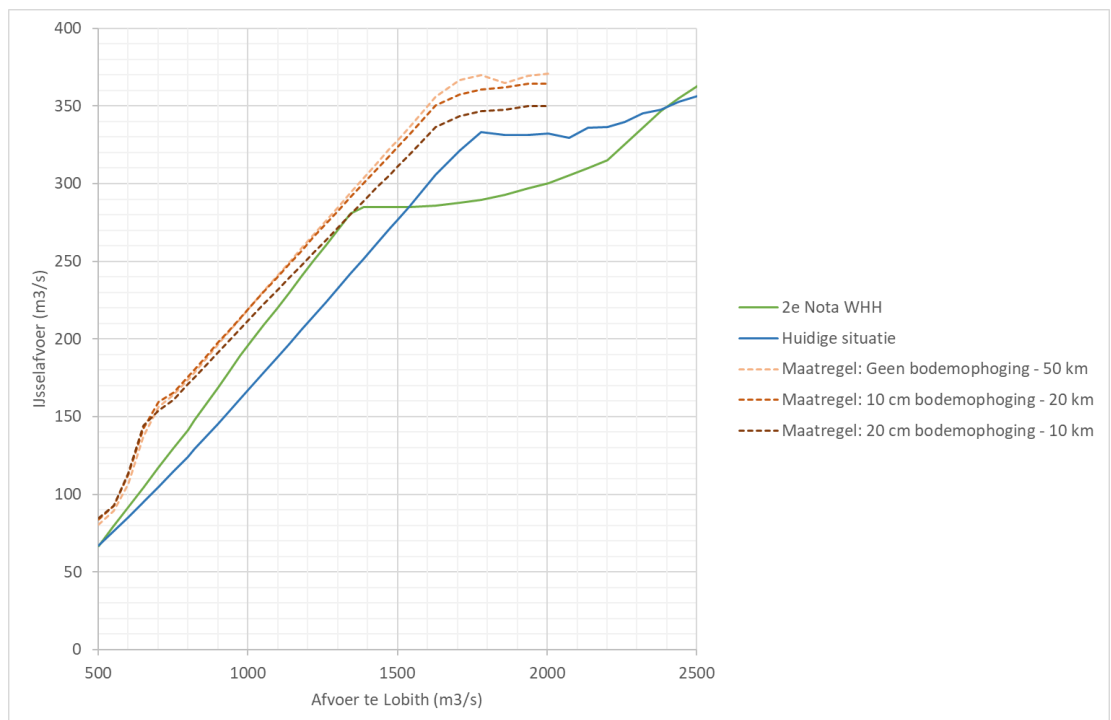
Figuur 3-26 Verloop waterdiepteverandering op de Boven-Rijn – Waal bij een afvoer van 1000 m³/s met een bodemophoging van 20 cm op de Boven-Waal.

3.7 Effect sturing stuw Driel

Door het uitvoeren van de maatregelen gaat er meer water naar de IJssel dan in de huidige situatie. Een belangrijk uitgangspunt van het originele stuwprogramma s285/25 (1977) was dat zo lang mogelijk 285 m³/s van het Rijnwater naar de IJssel stroomt en er altijd 25 m³/s voor de Nederrijn overblijft (ten tijde van de 2^e nota WHH).

In het huidige stuwprogramma wordt het oorspronkelijke plateau rond de 285 m³/s niet meer vastgehouden, maar ligt dit niveau rond een IJsselafvoer van 320-330 m³/s (Figuur 3-27). De maatregelen die zorgen voor 30 m³/s extra afvoer naar de IJssel zorgen er voor dat met de huidige stuwsturing dit plateau verder wordt verhoogd naar 350-380 m³/s (Figuur 3-27). Dit laat zien dat het stuwprogramma dat bepalend is voor het moment waarop stuw Driel open dan wel dicht gaat, aangepast moet worden wanneer er maatregelen worden doorgevoerd die de geometrie van de rivier beïnvloeden.

Om terug te gaan naar de situatie ten tijde van de 2^e nota WHH, namelijk bij het openen van stuw Driel de IJsselafvoer constant houden op 285 m³/s, dient de stuw bij lagere afvoeren en waterstand te openen (Tabel 3-11). De aanpassing aan het stuwprogramma is afhankelijk van de uitgevoerde maatregel, maar over het algemeen zien we dat hoe meer er naar de IJssel wordt gestuwd hoe eerder de stuw moet openen. Dit komt overeen met ongeveer een halve meter lagere waterstand bij Lobith waarop gestuurd zou moeten worden in plaats van de huidige 8,6 m +NAP.



Figuur 3-27 Effect van enkele maatregelen die zorgen voor minimaal 30 m³/s extra IJsselafvoer in vergelijking met situatie in de 2^e Nota WHH ten opzichte van de huidige situatie op de IJssel als functie van de afvoer te Lobith. De effecten van de maatregelen betreffen de combinatie van 30 m versmallen + bodemophoging op de Waal en 15 m verbreden op de IJssel over de aangegeven lengtes en bodemophoging op de Waal.

Tabel 3-11 De afvoeren (m^3/s) te Lobith waarbij de afvoer op de Boven-IJssel gelijk is aan $285 m^3/s$ voor een maatregel met 30 m versmallen op de Waal, 15 m verbreden op de IJssel en verschillende maten van bodemophoging en uitvoeringslengtes. De corresponderende waterstanden te Lobith (m +NAP) staan tussen haakjes.

Lengte (km)	Referentie (model)	Geen ophoging	10 cm ophoging	20 cm ophoging
10	1591	1410 (8,2)	1391 (8,2)	1367 (8,3)
20	1591	1344 (8,1)	1315 (8,1)	1283 (8,1)
50	1591	1304 (8,0)	1269 (8,0)	1238 (8,0)

3.8 Korte beschouwing op onzekerheden

De berekeningen hebben tot doel de effecten op de afvoerverdeling op de riviersplitsingen bij stationaire lage afvoeren te simuleren. De afvoerverdeling wordt vooral bepaald door de waterstanden in de afstromende takken, stroomafwaarts van de splitsing. Door de modellen te kalibreren met gemeten waterstanden en de (vereffende) afvoerverdeling is gezorgd dat het modelresultaat zo goed mogelijk overeenstemt met de werkelijkheid. Echter, het model is slechts een representatie van de werkelijke rivier en er is – zeker bij een 1D-model - sprake van aannames, vereenvoudigingen en parameterisatie van fysische processen. Bovendien is er een afhankelijkheid van de kwaliteit van de (meet)gegevens waarmee het model wordt opgesteld en gekalibreerd. Daardoor zijn de resultaten van het model niet exact, maar zal er sprake zijn van onzekerheden. Een uitgebreide duiding van deze onzekerheden is beschreven in Berends en Diermanse (2021).

In deze studie is gebruik gemaakt van het eendimensionale SOBEM model van de Rijntakken dat jaarlijks wordt geactualiseerd (zesde-generatie sobem-rijn-j24_6-v1a1).

Het modelinstrumentarium is zorgvuldig afgeregeld met strenge eisen ten aanzien van waterstanden en afvoeren, en wordt bij ieder actualisatie gevalideerd op basis van metingen en 2D berekeningen. De nauwkeurigheid van de waterstandsmetingen zijn circa 1 cm, maar deze kunnen over het dwarsprofiel iets variëren. Dit kan niet worden nagebootst met een 1D model. Van de meer recentere afvoermetingen bij gemiddelde rivierafvoeren wordt gehanteerd dat de nauwkeurigheid $\pm 5\%$ bedraagt, maar dat die onzekerheid toeneemt bij extremere omstandigheden. Daarbij geldt dat afvoer op zichzelf niet wordt gemeten, maar een resultaat is van een berekening op basis van gemeten stroomsnelheden en het natte (doorstroom)oppervlak. Uit de validatie van 2D modelresultaten met metingen blijkt dat de nauwkeurigheid van deze modellen zeer hoog is. De geavanceerde 2D-DHydro modellen en de resultaten ervan vormen de basis voor de 1D zesde-generatie.

In de studie kijken we vooral naar de veranderingen in afvoerverdeling bij laagwater. Deze worden bepaald door de resultaten van een som met maatregelen te vergelijken met een som zonder maatregelen. De onzekerheden in de absolute waarden van de afvoer lagen bij de kalibratie in de orde van enkele tientallen m^3/s , waarbij de afvoeren naar Pannerdensch Kanaal iets worden onderschat bij afvoeren lager dan $1000 m^3/s$ (Lobith) en overschat bij hogere afvoeren ten opzichte van het meer geavanceerde 2D Hydro model (Berends et al., 2022). Deze systematische fout valt echter grotendeels weg wanneer we resultaten van elkaar aftrekken, en alleen naar effecten kijken. De verwachting is dat de resulterende onzekerheid voor de effectbepaling op afvoerverdeling dan in de orde van $1 m^3/s$ of lager valt.

Bij lage afvoeren zijn vooral de stroomvoerende geometrie van het zomerbed (met kribben en oevers), de ruwheid van het zomerbed en de waterstand bij stuw Driel van belang voor de uitkomsten bij de splitsingen. Door de methode waarbij de geometrie ruimtelijk wordt gemiddeld en geïnterpoleerd naar het grofmazige rekenrooster (500 m roosterafstand) zal het niet mogelijk zijn de terugkoppeling van specifieke details in geometrie op de stroming te reproduceren. Bijvoorbeeld de invloed van impulsuitwisseling door lokale neren in kribvakken en de ribbels en duintjes op de rivierbedding zijn te kleinschalig voor dat rooster, maar zijn wel van enig belang voor de stroming. Deze effecten worden gecompenseerd in de hydraulische ruwheid. Ook andere onnauwkeurigheden, zoals rekenonzekerheden (numerieke oplossing), meetonzekerheden (kalibratiegegevens), onnauwkeurigheden van het 2D model, en veranderingen in geometrie (met name bodemligging en beddingvormen) ten opzichte van de kalibratiegegevens komen ook terug in de hydraulische ruwheden. Zoals eerder aangegeven vallen de effecten hiervan grotendeels weg wanneer we naar verschillen kijken in plaats van absolute waarden.

In hoeverre werken eventuele onzekerheden door in de uitkomsten van deze studie:

- In de berekening wordt de waterstand (en daarmee afvoerverdeling) op de splitsing bepaald door te sturen met stuwkrommes. Stuw lengte is vooral een functie van het verschil van opgestuwde waterdiepte met een evenwichtswaterdiepte, en van de bodemhelling. Ruwheid en afvoer zijn bepalend voor de evenwichtsdiepte. De onzekerheid hiervan is onbekend, maar door naar de verschillen in berekende waarden te kijken vallen deze onzekerheden grotendeels weg.
- Hogere betrouwbaarheid van 1D berekeningen kan worden bereikt voor ingrepen in geometrie en ruwheid wanneer deze minimaal over lengtes van meerdere roostercellen worden uitgevoerd (lokale variaties in de orde van 1 rooster cel, 500 m, zijn gevoelig voor numerieke effecten). In deze studie voldoen de lengtes grotendeels aan deze eis.
- In de 2D berekeningen voor het regelwerk (de 'flipper') is aangenomen dat de voorgestelde dam ondoorlatend is en dat de bodem niet erodeert. In werkelijkheid zijn deze aannames te conservatief, wat betekent dat voor deze dam een te groot effect op afvoerverdeling wordt gesimuleerd.
- Bij lage afvoeren is het waterstandsverhang in het Pannerdensch Kanaal zeer gering. Dat betekent dat de stuwkrommes lang zijn en de waterstanden vooral worden bepaald door de berekende standen bij stuw Driel en Boven-IJssel. Maatregelen in het Pannerdensch Kanaal doen daardoor relatief weinig en hebben daardoor ook weinig invloed op de onzekerheid.
- Omdat stuw Driel grotendeels is gesloten zal de waterstand bij de IJsselkop en daarmee op de Pannerdensch Kop in geringe mate afhangen van de geometrie en ruwheid van de Nederrijn bij Arnhem, en in grotere mate van de eigenschappen van de Boven-IJssel. De afvoerverdeling op de IJsselkop is dan echter vast (bepaald door afvoer door de stuw). Door een relatief groot verval in de Boven-IJssel is het resultaat voor absolute waterstanden gevoelig voor de geometrie en ruwheid van dat traject (denk aan orde 10 à 20 km van de Boven-IJssel).
- De regeling van de stuw Driel speelt een grote rol bij afvoeren waarbij de stuw wordt geopend. De RTC sturing van de stuw in het 1D model is gebaseerd op het 2D model. De sturing is redelijk betrouwbaar, maar het resultaat is minder nauwkeurig dan bij een gesloten stuw.

- In de modellen wordt geen rekening gehouden met morfologische veranderingen door de maatregelen. Hiervoor zijn aanvullende onderzoeken in uitvoering. Maatregelen die ingrijpen in het doorstroomprofiel leiden tot erosie en sedimentatieprocessen die het beoogde effect op waterstand en afvoerverdeling op termijn teniet kunnen doen. Het is daarom belangrijk dat aanvullende maatregelen worden getroffen om de morfologische respons te mitigeren. Bijvoorbeeld met langsdammen kan een versmalling bij laagwater worden gecompenseerd met een verruiming bij middenafvoeren door aanwezigheid van een meestromende oevergeul.

In deze studie zijn geen uitvoerige analyses gemaakt van de onzekerheden, bijvoorbeeld met behulp van gevoeligheidsanalyses en validaties. Dat valt buiten de scope van dit project. Echter, op basis van bovengenoemde overwegingen kan worden gesteld dat de gepresenteerde effecten op afvoerverdeling met voldoende betrouwbaarheid zijn gesimuleerd voor deze verkennende studie. Voor een nog grotere nauwkeurigheid wordt aanbevolen de simulaties uit te voeren met het 2D DHydro model.

Een vergelijking tussen veranderingen in afvoerverdeling als gevolg van veranderingen in rivierbodemplugging berekend met een 1D SOBEM model en een 2D DHydro model zijn ook uitgevoerd door Asselman et al. (2022a). Uit deze studie bleek dat het verschil maximaal enkele m^3/s bedroeg (bij een verschuiving in de orde van $30 \text{ m}^3/\text{s}$). Ofwel: als we aannemen dat 2D hydraulische modellen de verschuiving in de afvoerverdeling 100% correct berekenen, dan bedraagt de fout bij 1D hydraulische modellen maximaal enkele m^3/s .

3.9 Conclusies van 1D analyse

De uitgevoerde 1D analyse geeft een eerste inschatting van de extra afvoer die door aanpassingen in het zomerbed van de Waal, Pannerdensch Kanaal en IJssel naar de IJssel gestuurd kan worden (bij afvoeren lager dan $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith). Daarnaast laat het zien wat hiervan de te verwachte effecten zijn op de waterstanden van de verschillende riviertakken. De belangrijkste conclusies zijn als volgt:

- De afvoer naar de IJssel neemt toe naarmate:
 - Het doorstroomprofiel op de Waal verkleind wordt door het versmallen van het zomerbed of het ophogen van de bodem;
 - Het doorstroomprofiel op de Boven-IJssel vergroot wordt door verbreden van het zomerbed;
 - De maatregel in de Waal dichtbij het splitsingspunt Pannerden wordt uitgevoerd en dichtbij het splitsingspunt IJsselkop voor de IJssel.
 - De maatregel over een langer traject wordt uitgevoerd.
- Verbreding van het Pannerdensch Kanaal heeft zeer beperkt effect op de afvoerverdeling.
- Het uitvoeren van enkelvoudige maatregelen (enkel versmallen, verbreden of bodemophoging) levert niet de gewenste extra afvoer van $30 \text{ m}^3/\text{s}$ dan wel $55 \text{ m}^3/\text{s}$ extra naar de IJssel op bij een afvoer van respectievelijk 1000 dan wel $1.300 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith. Om binnen realistische dimensies te blijven (maximaal $\sim 30 \text{ m}$ versmallen op de Waal en $\sim 15 \text{ m}$ verbreden op de Boven-IJssel) lijkt het nodig om te werken met combinaties van maatregelen.

- De 30 m³/s extra afvoer naar de IJssel bij een afvoer van 1000 m³/s te Lobith kan gehaald worden door een combinatie van maatregelen. Wanneer gekozen wordt voor 30 m versmalling op de Waal en 15m verbreding op de Boven-IJssel, dan moeten deze ingrepen worden uitgevoerd over een lengte van 13 km. Als ze worden gecombineerd met 20 cm bodemophoging op de Waal dan is een lengte van 8 km voldoende. Om bij 1.300 m³/s te Lobith 55 m³/s extra naar de IJssel te krijgen (POW IRM) zou de maatregel over grotere afstanden moeten worden uitgevoerd. Het effect wanneer de maatregel niet even lang is op beide riviertakken dient nader onderzocht te worden.
- Het herverdelen van de afvoer over de riviertakken heeft effect op de waterstanden en waterdieptes op de riviertakken. Bij een versmalling op de Waal zien we op de Boven-Rijn een waterstandsstijging,. In deze situatie, stijgt de waterstand op de Waal over de lengte van de maatregel (vooral aan het begin van de maatregel) maar daalt de waterstand benedenstrooms van de maatregel ten opzichte van de huidige situatie. Op de gehele Boven-IJssel zien we een waterstandsstijging door de extra afvoer.
- Versmalling van de Waal leidt tot opstuwning en dus hogere waterstanden op de Boven-Rijn. Wanneer de huidige stuwsturingregels gehandhaafd blijven, wordt stuw Driel hierdoor reeds bij lagere afvoeren te Lobith geopend (door de hogere waterstanden wordt de waterstand van 8,6 m +NAP immers al bij lagere afvoeren bereikt). De Nederrijn-Lek zal dus in periodes met relatief lage Rijnafoeren vaker/meer afvoer krijgen.
- Op basis van eerdere studies en beschouwingen over modelonzekerheden wordt verwacht dat het effect van veranderingen in doorstroomprofiel over grotere lengte op de afvoerverdeling goed te modelleren is met een 1D hydraulisch model. Met een beperkt aantal aanvullende simulaties met een 2D model kan een beter beeld worden verkregen over de nauwkeurigheid van de simulaties die zijn uitgevoerd met het 1D SOBEK-model. Simulaties met een 2D hydraulisch model zijn sowieso nodig om het effect van andersoortige maatregelen die effect hebben op het 2D stromingspatroon bij de splitsingspunten, te bepalen.

4 Conclusies

4.1 Doel van deze studie

Deze studie had als doel om inzicht te geven in de maakbaarheid van de gewenste afvoerverdeling over de splitsingspunten bij lage rivierafvoeren. In het POW van IRM is aangegeven dat er naar moet worden gestreefd om bij een afvoer van 1.300 m³/s te Lobith 285 m³/s naar de IJssel af te voeren. De IJsselafvoer zou dan met ongeveer 55 m³/s toe moeten nemen ten opzichte van de huidige situatie. Ook is er in deze studie gekeken naar het realiseren van 30 m³/s extra afvoer naar de IJssel bij een afvoer van 1000 m³/s te Lobith. Deze afvoer is relevant voor de bevaarbaarheid van de rivieren. Met 30 m³/s extra afvoer naar de IJssel komt de verdeling dan min of meer overeen met die ten tijde van de 2^e nota waterhuishouding.

4.2 Is de 'gewenste' afvoerverdeling maakbaar?

Wijzigen afvoerverdeling laagwater door andere afmetingen zomerbed

Met ingrepen in het zomerbed van de rivier benedenstrooms van de splitsingspunten is het mogelijk om de IJsselafvoer bij lage afvoeren te Lobith te vergroten. Versmallen van het zomerbed van de Waal (bijvoorbeeld met langsdammen of een andere inrichting waarbij sprake is van een smal zomerbed met brede oevergeulen) zorgt bij laagwater te Lobith voor opstuwung op de Boven-Waal waardoor er meer water richting het Pannerdensch Kanaal en Boven-IJssel wordt gestuwd. Anderzijds zorgt verbreding van het zomerbed van het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel voor een verlaging van de waterstanden aldaar, waardoor deze riviertakken meer afvoer gaan trekken. Inzicht in de omvang van de toename in IJsselafvoer is verkregen op basis van een combinatie van een literatuurstudie en een gevoeligheidsanalyse met behulp van een 1D-hydraulisch model. Opgemerkt wordt dat verbreden van de Boven-IJssel effectiever is dan verbreden van het Pannerdensch Kanaal. Dit komt doordat het verhang op het Pannerdensch Kanaal beperkt is.

Met grootschalige ingrepen is het waarschijnlijk mogelijk om de afvoerverdeling zoals beschreven in het POW-IRM te realiseren

Om de 'gewenste' afvoerverdeling laagwater zoals beschreven in het POW-IRM te realiseren moet het doorstroomprofiel van het zomerbed van de Boven-Waal fors wordt verkleind. Denk hierbij aan een versmalling van 50 m, of versmalling met 30 m in combinatie met bodemophoging met 20 cm, beide uitgevoerd over een lengte van 50 km startend vanaf het splitsingspunt Pannerdensch Kop. Wanneer de maatregelen over kortere afstand (20 km) worden uitgevoerd is ook verbreding van de Boven-IJssel met ongeveer 15 m nodig. Tabel 4-1 en Tabel 4-2 geven een gedetailleerder overzicht van de bevindingen uit de literatuurstudie en de resultaten van de 1D simulaties.

Maatregelen beïnvloeden de afvoerverdeling bij een range aan afvoeren te Lobith

Opgemerkt wordt dat het niet mogelijk is om de afvoerverdeling bij één afvoerniveau te Lobith te wijzigen wanneer de geometrie van het zomerbed wordt gewijzigd met vaste maatregelen. Bijvoorbeeld, wanneer het zomerbed van de Waal wordt versmald om zo lang mogelijk 285 m³/s af te voeren naar de IJssel (in ieder geval tot een afvoer van 1.300 m³/s te Lobith) dan leidt dit ook tot een hogere IJsselafvoer bij lagere afvoeren te Lobith. Alleen regelwerken zoals voorgesteld bij een meestromende nevengeul bij de Hondsbroeksche Pleij bieden een mogelijkheid tot sturing. Om te bepalen of een meestromende nevengeul een effectieve maatregel is zijn aanvullende berekeningen nodig.

Versmalling Waal over grote lengte voorkomt afname waterdiepte als gevolg van lagere afvoer

Versmalling van de Waal over grote lengte heeft als voordeel dat het effect op de afvoerverdeling groot is, maar ook dat de afname van de Waalafvoer daardoor alleen benedenstrooms leidt tot lagere waterstanden en een afname van de waterdiepte. Wanneer versmalling alleen nabij het splitsingspunt wordt uitgevoerd, leidt de lagere Waalafvoer tot geringere waterdieptes, onder meer bij de vaste laag bij Nijmegen, waar reeds een knelpunt voor de scheepvaart is bij lage afvoeren.

Eerste bevindingen op basis van literatuuronderzoek en simulaties met 1D hydraulisch model; gedetailleerdere analyses noodzakelijk, ook naar morfologische effecten

Bovenstaande conclusie is gebaseerd op een literatuurstudie en simulaties met een 1D hydraulisch model. Omdat de berekeningen in de beschikbare literatuur meestal een ander doel hadden, moeten de resultaten als indicatief worden gezien. Hoewel de verwachting is dat een 1D hydraulisch model voldoende nauwkeurig is om het effect van versmalling en bodemophoging op de afvoerverdeling te verkennen, kent ook deze aanpak beperkingen. Zo is een 1D model niet in staat om ingrepen door te rekenen die van invloed zijn op de 2D of zelfs 3D waterbeweging bij een splitsingspunt. Om die reden wordt aanbevolen aanvullende simulaties uit te voeren met het 2D hydraulisch model. Bij vervolgstudies moet ook worden gekeken naar het moment waarop oevergeulen mee moeten stromen om te voorkomen dat versmalling van het zomerbed leidt tot meer zomerbederosie.

4.3 Gedetailleerder overzicht bevindingen literatuurstudie en 1D modelsimulaties

Literatuurstudie

Tabel 4-1 geeft een samenvatting van de bevindingen uit de literatuurstudie. Uit dit overzicht blijkt dat:

- Waterstanden op de Waal kunnen worden verhoogd door de bodem van het zomerbed op te hogen. Uit diverse studies blijkt dat er per 10 cm bodemophoging ongeveer 6 m³/s extra afvoer naar het Pannerdensch Kanaal en bij een dichte stuw Driel dus naar de IJssel gaat.
- Versmalling van het zomerbed van de Waal door langsdammen of kribverlenging leidt ook tot een verschuiving van de afvoerverdeling. Afhankelijk van de manier waarop de maatregel wordt uitgevoerd leidt versmalling met 20 m tot 7 à 15 m³/s extra IJsselafvoer.
- De aanleg van een regelwerk op het splitsingspunt om de afvoerverdeling te beïnvloeden (soms 'flipper' genoemd) lijkt niet realistisch. Zelfs wanneer dit regelwerk de helft van het zomerbed afsluit leidt dit maar tot 12 m³/s extra afvoer op de IJssel. De enorme versmalling van het zomerbed over korte afstand leidt bovendien tot zeer hoge stroomsnelheden (scheepvaart-beperkingen) en erosie.
- De aanleg van een meestromende nevengeul onder het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij zou een vergelijkbaar effect kunnen hebben als het regelwerk, met minder negatieve neveneffecten.. Dit moet echter nog worden onderzocht.

Omdat de berekeningen meestal een ander doel hadden, moeten de resultaten als indicatief worden gezien.

Tabel 4-1 Toename van de IJsselafvoer bij afvoeren te Lobith rond de 1000 m³/s door verschillende typen maatregelen, afgeleid uit eerdere studies en indicatieve berekeningen.

Maatregel	Effect bij lage afvoeren (m ³ /s)	Opmerking	Bron
opvulling buitenbochten Waal	enkele m ³ /s		Becker (2021)
bodemophoging Waal	6 m ³ /s per 10 cm ophoging	zeer ruwe vuistregel afgeleid uit berekeningen nulalternatief	Nulalternatief IRM, Asselman et al. (2022a,b)
versmalling Waal met 20 m door langsdammen	13-15 m ³ /s		eerste verkenningen Sloff et al. (2023)
kribverlenging Waal met 20 m over grote afstand	7 m ³ /s		2D berekeningen Van den Hoek (2024)
Regelwerk /flipper (versmalling zomerbed Waal bij splitsingspunt met 50%)	12 m ³ /s	leidt lokaal tot zeer hoge stroomsnelheden en waarschijnlijk forse erosie	2D berekeningen Van den Hoek (2024)
Meestromende nevengeul bij Hondsbroeksche Pleij	≥ 10 m ³ /s	afhankelijk van ontwerp en verval. Dit leidt wel tot lagere afvoer op de IJssel bij de IJsselkop	indicatieve berekening deze studie

Simulaties 1D hydraulisch model

Met behulp van een 1D hydraulisch model is een eerste inschatting gedaan van de mogelijk afvoerverandering als gevolg van aanpassingen in de geometrie van de riviertakken benedenstrooms van het splitsingspunt. Er zijn maatregelen onderzocht met verschillende maten van versmalling en/of ophoging van het zomerbed van de Waal en verbreding van het zomerbed van het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel. Voor de Waal is gerekend met een versmalling van het zomerbed die varieert van 30 tot 100 m. Er is gevarieerd met de lengte waarover de versmalling is gerealiseerd (1, 5, 10, 20 of 50 km lengte) en de locatie waar de versmalling start (splitsingspunt, bodemkribben Erlecom, vaste laag Nijmegen).

De hydraulische simulaties leiden tot de volgende conclusies:

- Versmalling op de Waal is het meest effectief wanneer dit wordt uitgevoerd over grote lengte en startend bij het splitsingspunt. In dat geval zou een versmalling met 30 m leiden tot ongeveer 20 m³/s extra afvoer naar de IJssel. Bij versmalling met 50 m neemt dit toe tot 30 à 40 m³/s (zie Tabel 4-2).
- Verbreding van het Pannerdensch Kanaal heeft weinig effect; versmalling met 30 m leidt slechts tot 5 m³/s extra IJsselafvoer.
- Verbreding van de Boven-IJssel lijkt effectiever: enkele tientallen m³/s extra afvoer naar de IJssel bij een verbreding met 15 m.
- Nog grotere effecten zijn haalbaar wanneer meerdere maatregelen worden gecombineerd (zie Tabel 4-2).

Uit de berekeningen blijkt dat het mogelijk is om de gewenste toename van de IJsselafvoer (30 m³/s bij een afvoer van 1000 m³/s of 55 m³/s bij een afvoer van 1.300 m³/s te Lobith) te realiseren met één ingreep langs één riviertak, namelijk versmalling van de Waal met 50 m over een lengte van 50 m startend vanaf het splitsingspunt. Wanneer men minder wil versmallen of de ingreep over korte afstand wil realiseren, dan zijn combinaties van maatregelen nodig, zoals ophoging van het zomerbed van de Waal of verbreding van de Boven-IJssel.

Tabel 4-2 Toename van de IJsselafvoer door verschillende typen maatregelen en bij verschillende afvoeren te Lobith, zoals berekend in deze studie met een 1D model.

Maatregel (uitgevoerd over een lengte van 20 tot 50 km startend bij de Pannerdensch Kop)	Indicatie effect bij verschillende afvoeren te Lobith		Opmerking
	1000 m ³ /s	1.300 m ³ /s	
Bodemophoging Waal met 20 cm	11-12	11-13	In overeenstemming met vuistregel afgeleid uit analyses nulalternatief: 6 m ³ /s extra IJsselafvoer per 10 cm bodemophoging Waal
Bodemophoging Waal met 50 cm	28-31	29-34	
Versmallen Waal met 30 m	17-20	20-23	
Versmallen Waal met 50 m	30-35	37-43	
Versmallen Waal met 100 m	80-90	85-105	
Verbreden Pannerdensch Kanaal met 30 m	5	5	
Verbreden Boven-IJssel met 15 m	18-20	23-26	
Verbreden Boven-IJssel met 30 m	30-35	40-47	
Versmallen Waal met 30 m en ophogen met 20 cm	28-32	32-37	Effect van enkelvoudige maatregelen lijkt redelijk optelbaar (geldt voor meerdere combinaties)
Versmallen Waal met 50 m en ophogen met 50 cm	60-68	68-78	
Versmallen Waal 30 m en verbreden IJssel 15 m	36-41	45-52	
Versmallen Waal 30 m, ophogen met 10 cm en verbreden Boven-IJssel met 15 m	42-48	50-60	
Versmallen Waal met 30 m, ophogen met 20 cm en verbreden Boven-IJssel met 15 m	48-57	56-68	

5 Referenties

- Asselman, N. J. de Jong, M. Mens, M. Maarse, B. Maas, P. de Grave en E. van der Deijl (2022a) Effectbepaling Nulalternatief IRM. Deltares rapport 11208036-004-ZWS-0002.
- Asselman, N., B. Maas, M. Mens, P. de Grave, R. van der Wijk, E. van der Deijl (2022b) Effectbepaling IRM - Gevoeligheidsanalyse voor verandering in rivierbodempligging Rijntakken (doorgaande erosie tot 2050, huidige bodempligging vasthouden of ophoging naar de ligging van rond het jaar 2000). Deltares rapport 11208036-004-ZWS-0005.
- Becker, A (2021) Slim suppleren Boven-Waal. Deltares rapport 11206792-014-ZWS-0001
- Berends, K en F. Diermanse (2021) Naar een conceptuele basis voor omgaan met onzekerheid in stromingsmodellen van Rijkswaterstaat. Deltares rapport 11206813-018-ZWS-0003. December 2021.
- Berends, K., B. Domhof en T. Visser (2022) Pilot zesde generatie 1D SOBEK model voor de Rijn. Modelopzet, kalibratie en validatie o.b.v. FM2PROF. Deltares rapport 11206813-004-ZWS-0002. Februari 2022.
- Douben, N. (1997) Bodemkribben in de Waal bij Erlecom: Analyse van opstuwning en hydraulische bodemruwheid. Rapport Rijkswaterstaat-RIZA nr. 97.050, ISBN 90-3695-096-1.
- Huthoff, F. & J. Vieira da Silva (2019), Rivierkundige ondersteuning RWS-ON; Modelanalyse vaste laag Nijmegen. Memo 2746.50, HKV Lijn in Water, Lelystad, mei 2019.
- Hydrologic (2022) Evaluatie stuwprogramma Driel – Eindrapport. Rapport Hydrologic P1342.
- Maas, B.F. (2024). Actualisatie Modellen Rijn 2024: sobek-rijn-j24_6-v1a1. Deltares-rapport: 11210333-003-ZWS-0008.
- Ottevanger, W. (2015), Sustainable Fairway Rhinedelta II; Effects of yearly bed stabilisation nourishments, Delta Program measures and training walls. Report 1209175, Deltares, Delft, April 2015.
- Quartel, S. (In prep) Historische ontwikkeling afvoerverdeling Rijntakken. Rapport Rijkswaterstaat.
- Sloff, K., Paarlberg, A., Van Denderen, P., Barneveld, H, & Mosselman, E. (2023). Onderbouwing beleidskeuze bodempligging IRM. Rapport Deltares en HKV. 20 april 2023
- Van den Hoek, A. (2024). Toepassen Xstream-blokken bij laagwater. Deltares memo 11210320-003

A Methode aanpassing 1D-profielbreedte

Om de maatregelen door te vertalen naar het gebruikte SOBEK 3 Rijntakkenmodel (Maas, 2024), zijn er meerdere opties verkend om de breedte van de 1D-dwarsprofielen aan te passen. Voor het versmallen en verbreden is dezelfde methode toegepast, zodat mogelijke verschillen niet door de manier van schematiseren kunnen worden veroorzaakt. Hieronder zijn de drie beschouwde methodes toegelicht aan de hand van een profiel op de Boven-Waal (Figuur A-1).

1 Aanpassing van het zomerbed (Figuur A-2)

Met deze methode wordt er een bepaalde lengte weggehaald uit of toegevoegd aan het midden van het zomerbed. Dit representeert kribverlenging of verkorting. Met deze methode wordt het totale profiel smaller of breder. Deze aanpassing heeft invloed op het totale doorstroomvolume van het profiel, aangezien we nu ook de uiterwaarden verder naar binnen of buiten verplaatsen. Dit zal bij een werkelijke maatregel niet vanzelfsprekend het geval zijn, denk aan langsdammen. Echter, omdat in deze studie enkel met lage afvoeren gerekend wordt (tot 2000 m³/s), is het effect van de verplaatsing van de uiterwaarden niet van groot belang.

2 Gebruik van een synthetisch profiel (Figuur A-3)

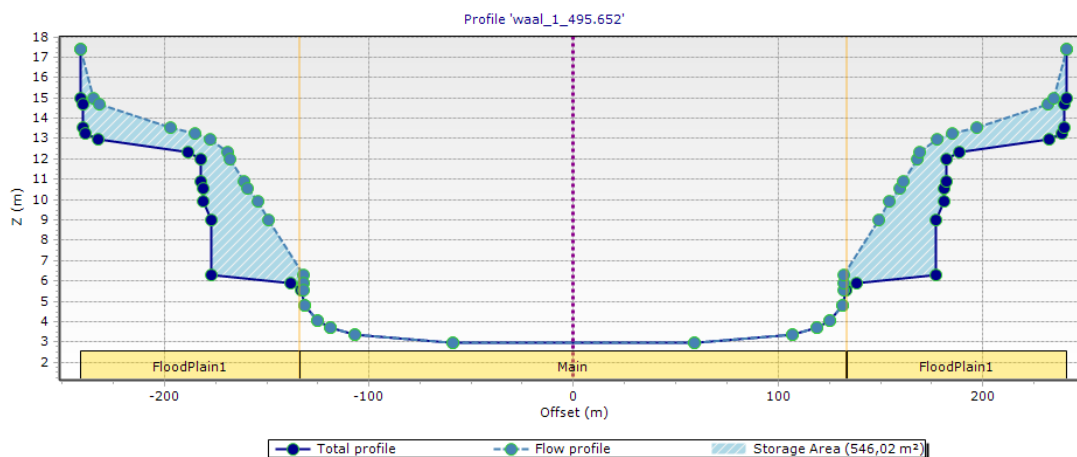
Deze methode wordt het zomerbed versmalt of verbreedt met een vaste waarde, waarna alles behorende bij *Floodplain1* wordt verwijderd. Het profiel fungeert nu als het ware als een kanaalbak met gladde randen. Bij deze methode neemt het doorstroomprofiel nog verder af en stroomt er door het ontbreken van de uiterwaarden meer volume door het zomerbed wat resulteert in hogere waterstanden dan in werkelijkheid.

3 Combinatie van methode 1 en 2 (Figuur A-4)

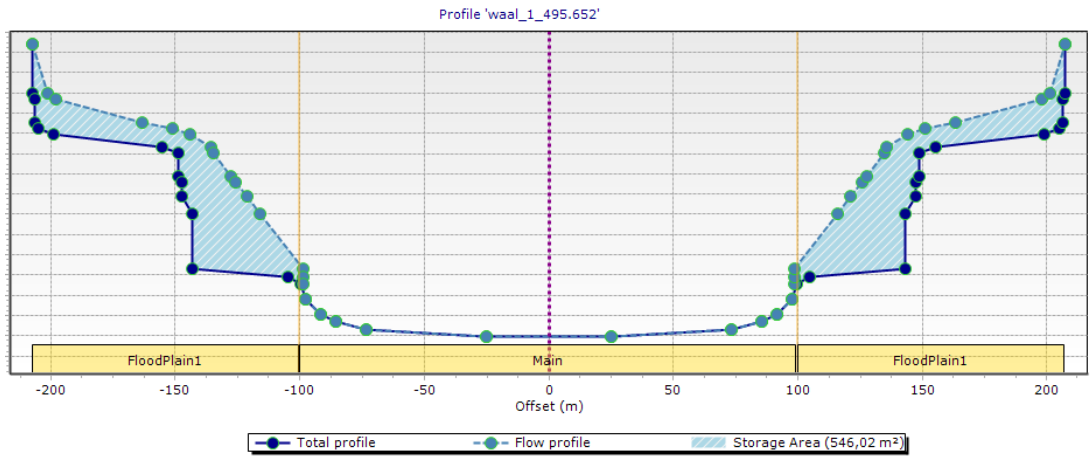
Met methode drie wordt het zomerbed op dezelfde manier versmalt/verbreed als in methode 1, waarna de uiterwaarden volledig als bergend worden geclassificeerd. Bij stationaire afvoeren werkt dit profiel vergelijkbaar als methode 2. De rest van de riviergeometrie wordt dan niet beschouwd.

Keuze

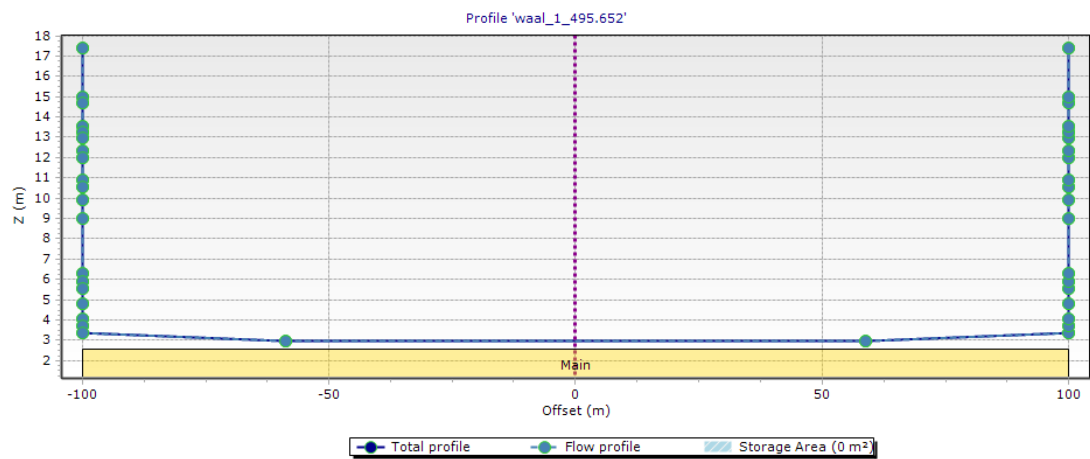
Er is gekozen om in deze studie gebruik te maken van methode 1. Het voordeel van methode 1 is dat de daadwerkelijke geometrie en daarmee de betrouwbaarheid van het 1D-modelresultaten het beste gewaarborgd blijven.



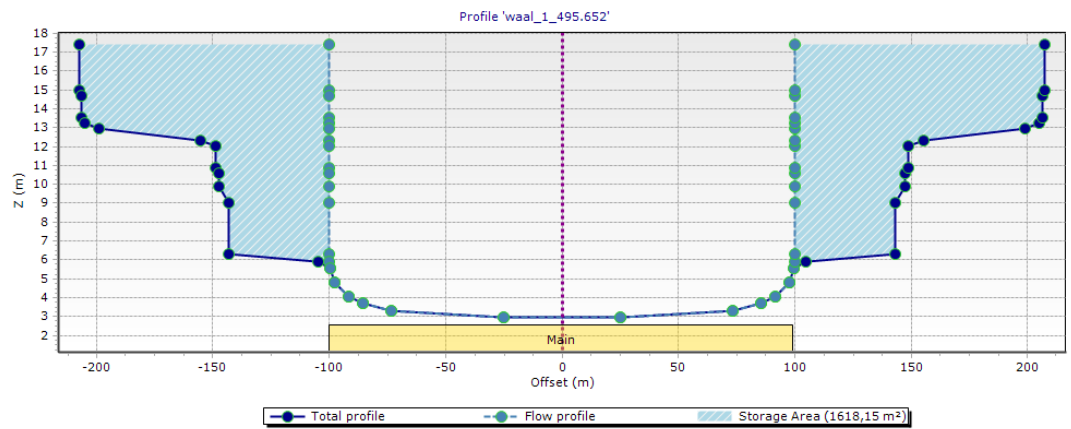
Figuur A-1 Het originele profiel uit sobek-rijn-j24_6-v1a1 voor het tweede profiel op de Boven-Waal.



Figur A-2 Versmalling van dwarsprofiel met methode 1. Versmalling van 50 m



Figur A-3 Versmalling van dwarsprofiel met methode 2. Versmalling van 50 m



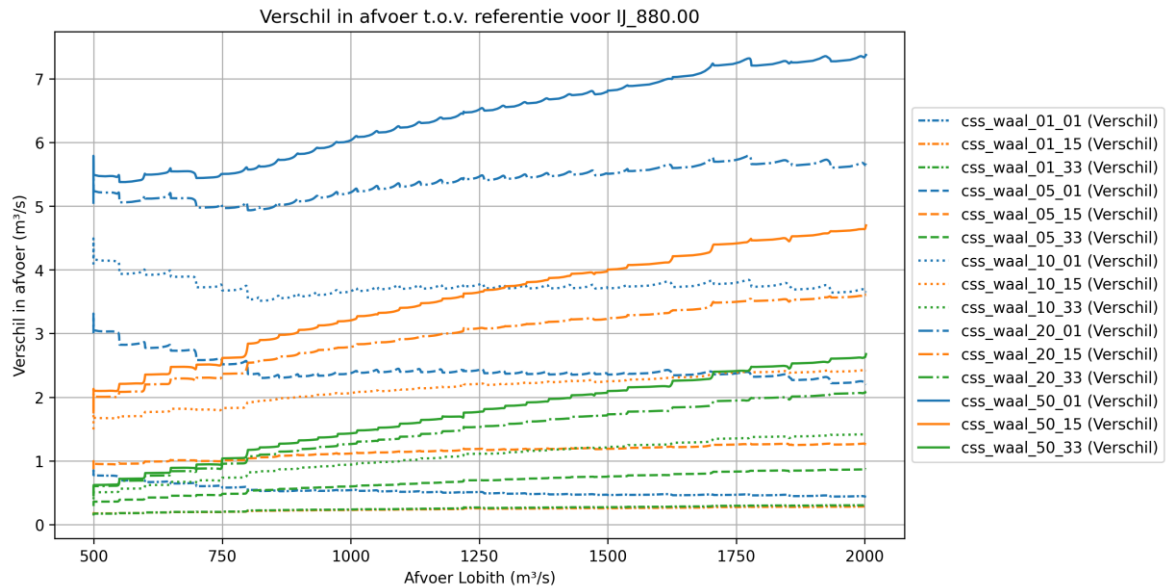
Figur A-4 Versmalling van dwarsprofiel met methode 3. Versmalling van 50 m

B Effectiviteit maatregelen

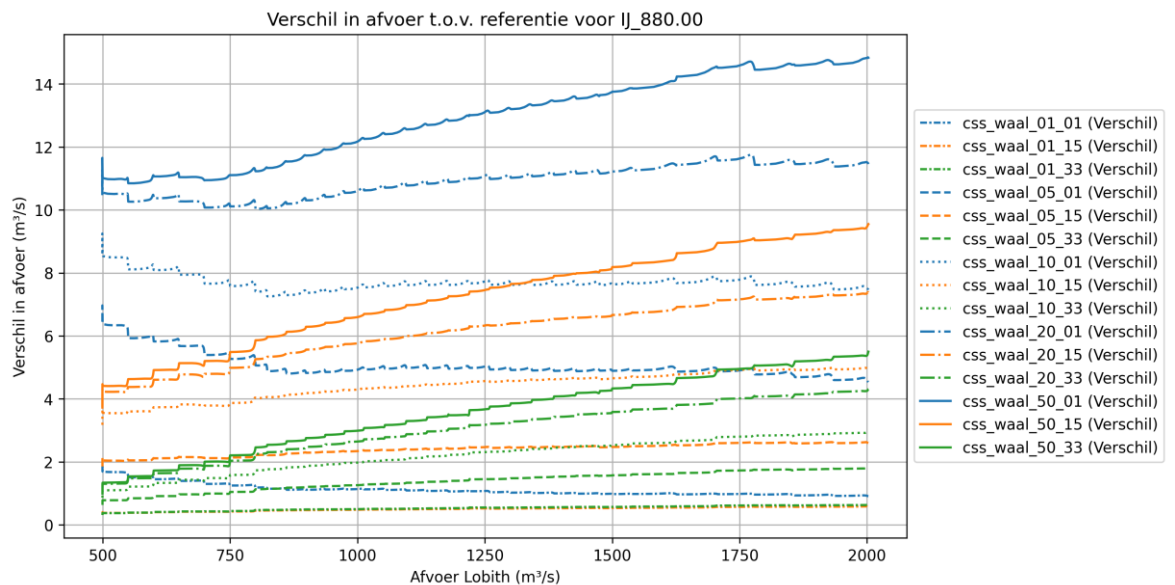
Voor de legenda van de figuren in deze bijlage geldt de volgende codering:

- “waal” → riviertak van de ingreep, hier Waal
- “_01” → lengte van de ingreep, hier 1 km
- “_15” → Startlocatie van de ingreep gebaseerd op de dwarsprofielen op de sobek-tak (waarbij 01=splitsingspunt, 15= bodemkribben Erlecom en 33= vaste laag Nijmegen)

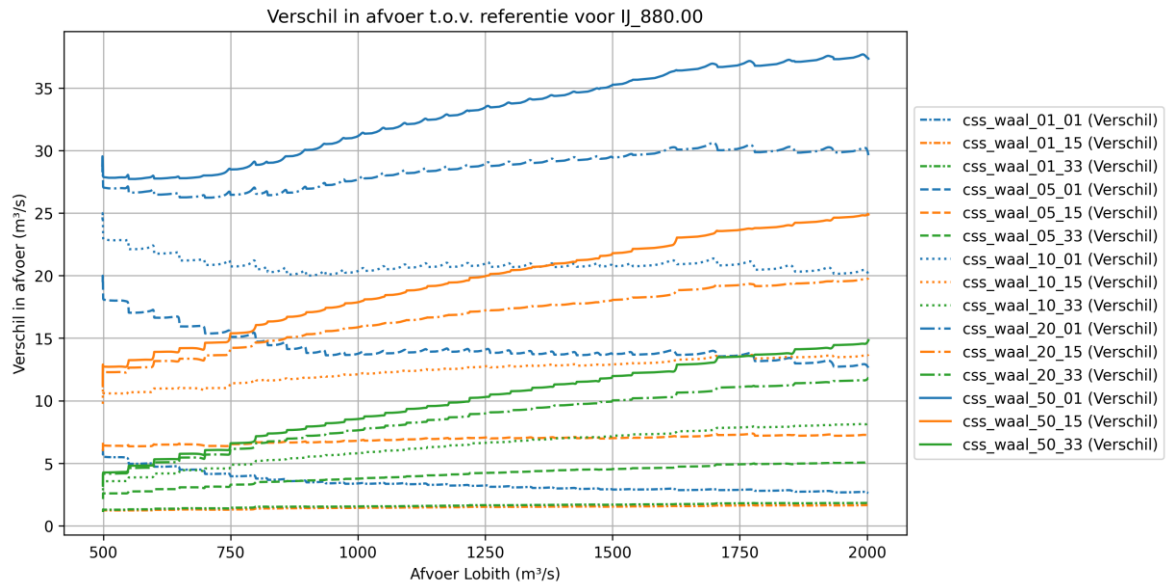
B.1 Bodemophoging Waal



10 cm bodemophoging

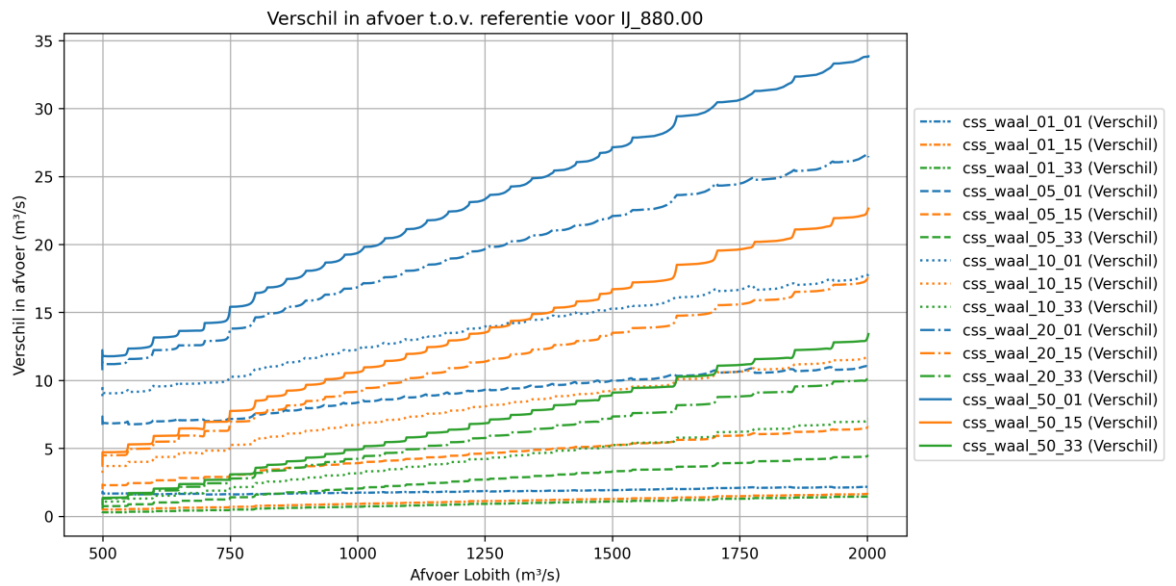


20 cm bodemophoging

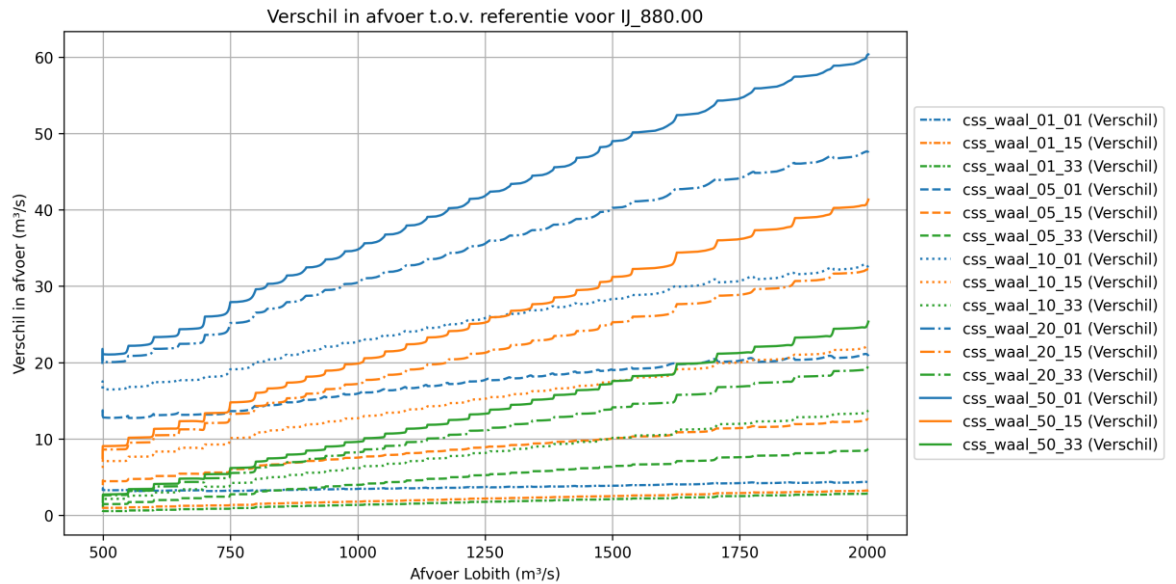


50cm bodemophoging

B.2 Versmalling Waal

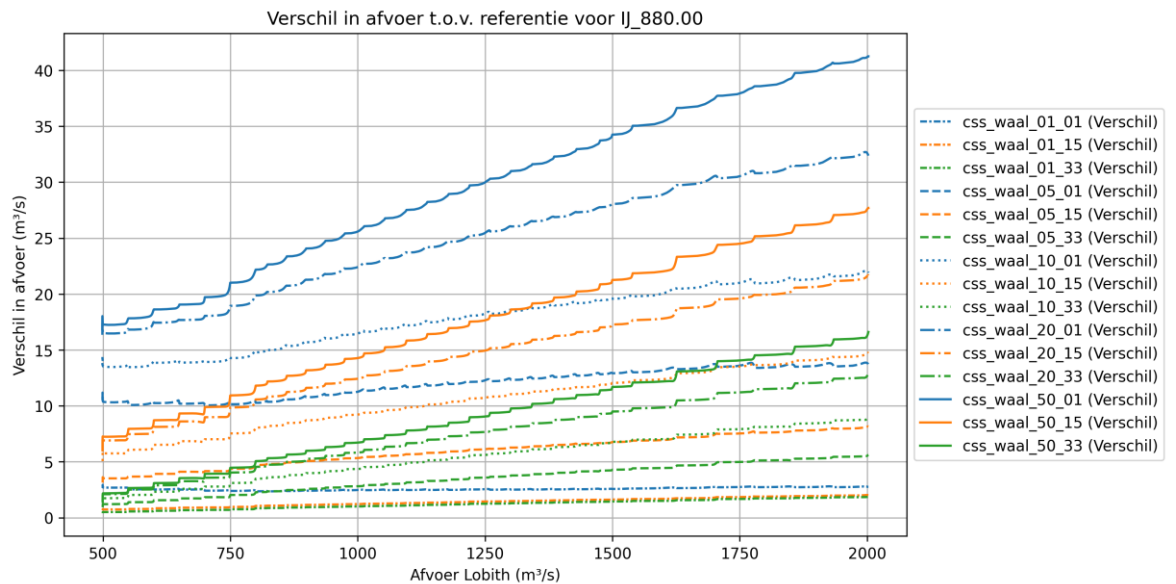


Versmalling met 30 m

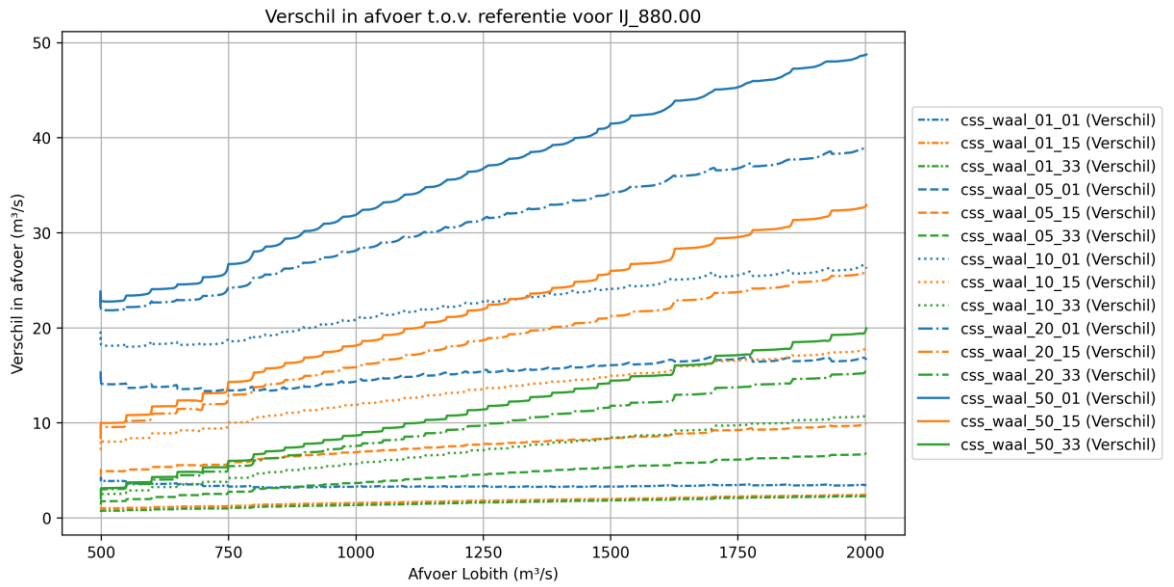


Versmalling met 50 m

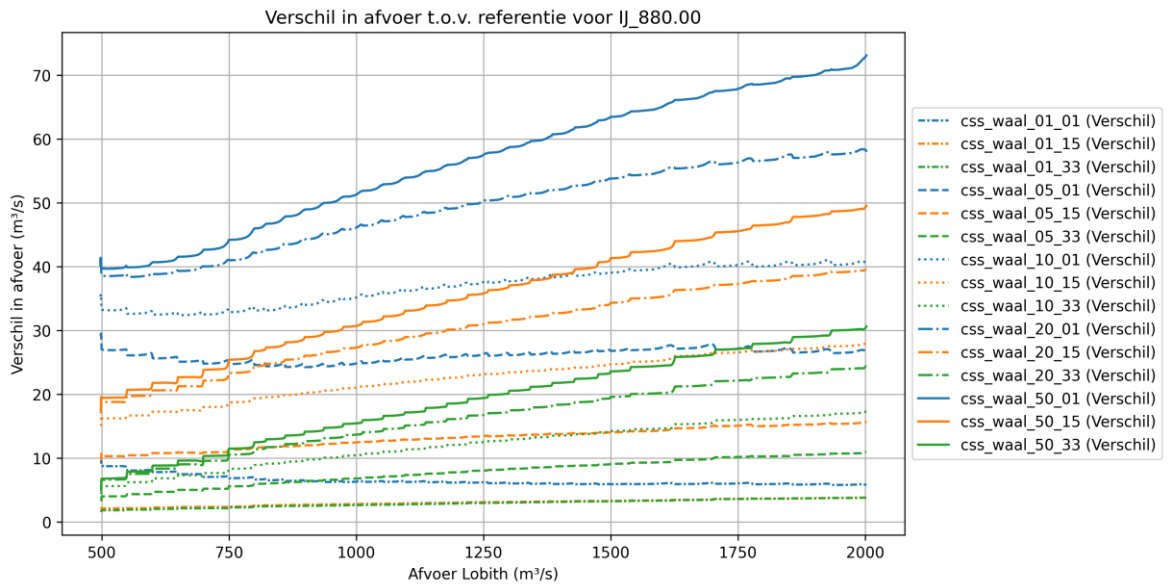
B.3 Combinatie bodemophoging en versmalling Waal



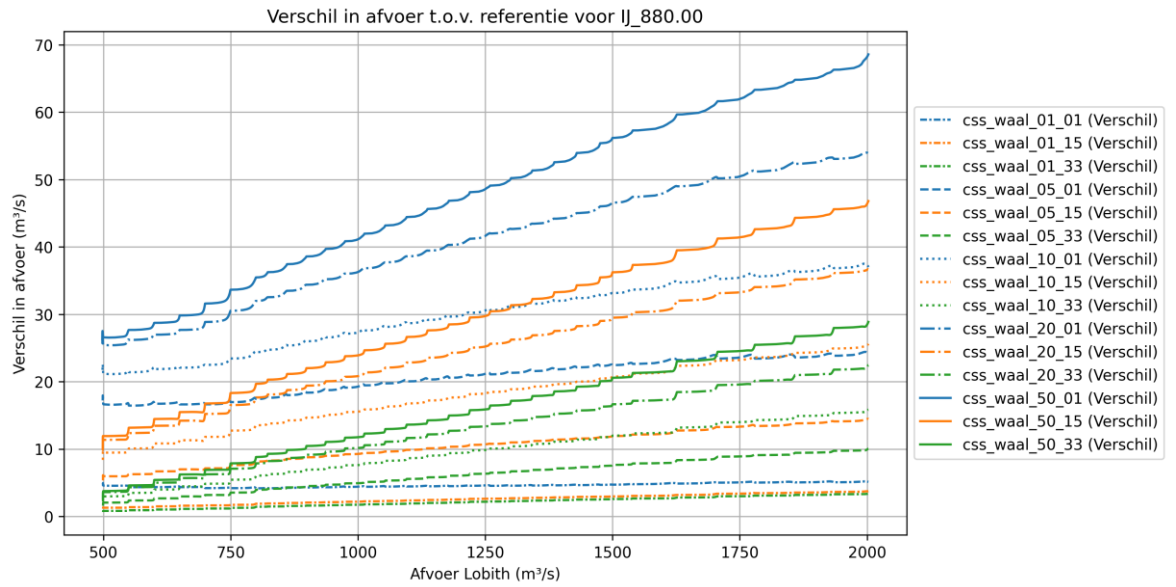
Versmalling met 30 m en bodemophoging met 10 cm



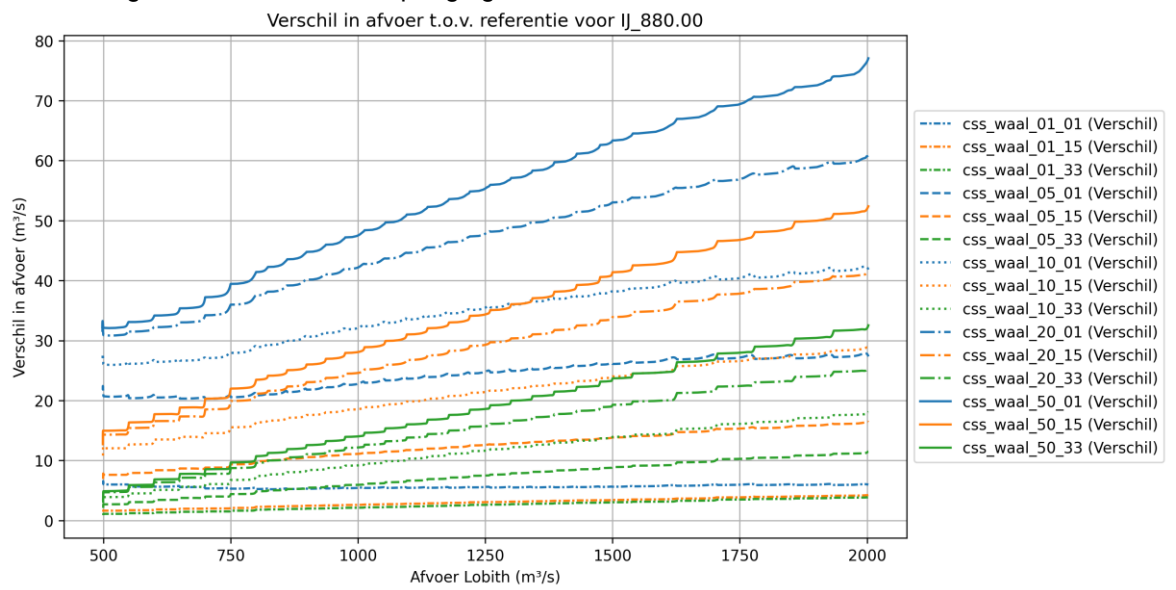
Versmalling met 30 m en bodemophoging met 20 cm



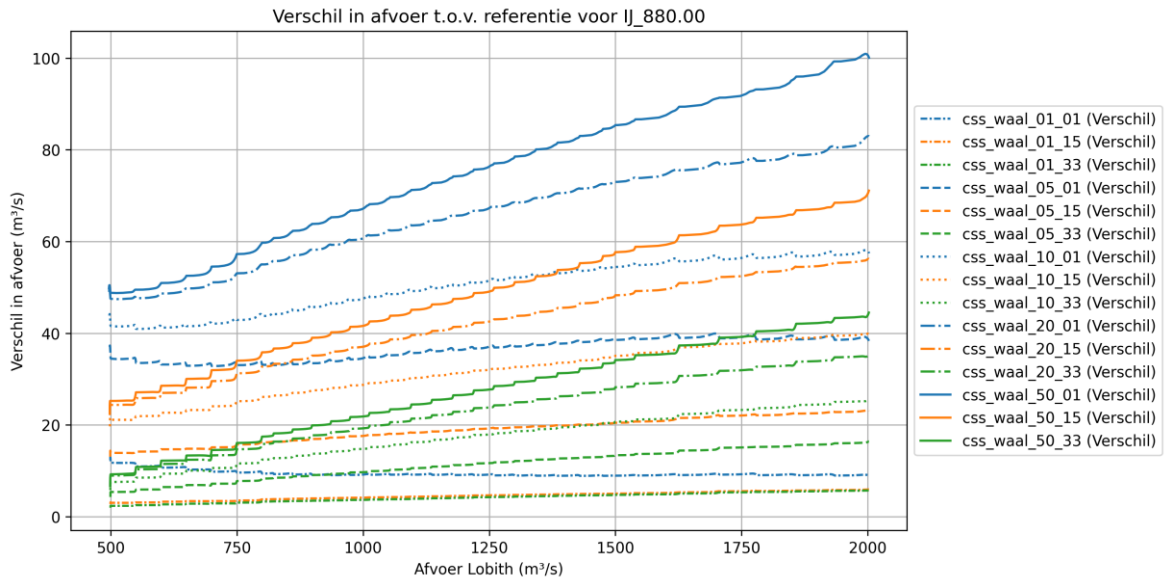
Versmalling met 30 m en bodemophoging met 50 cm



Versmalling met 50 m en bodemophoging met 10 cm

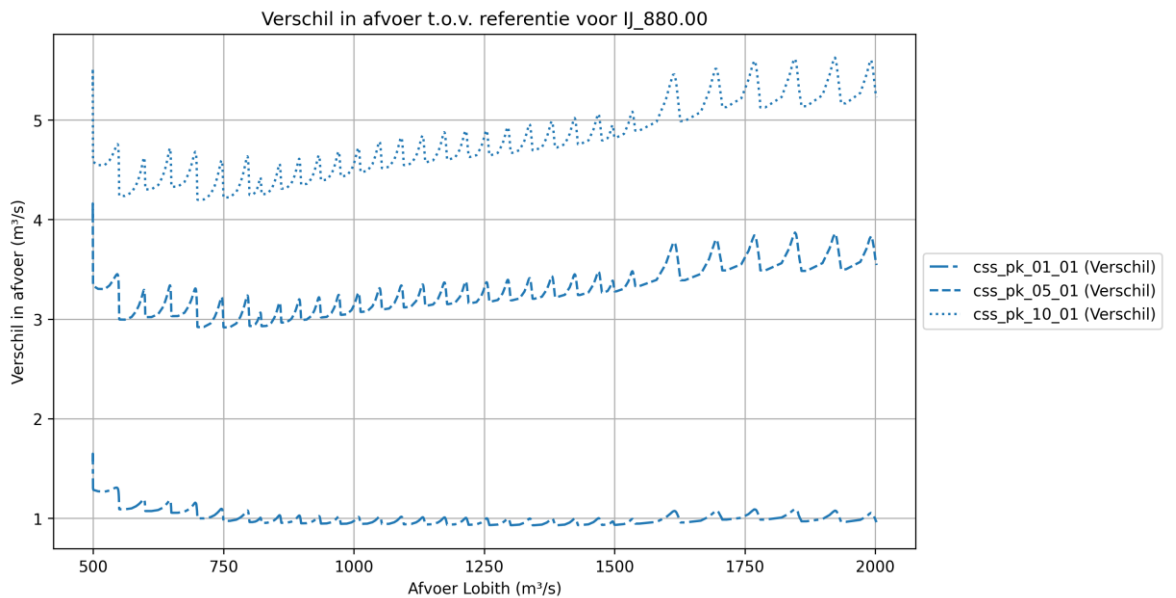


Versmalling met 50 m en bodemophoging met 20 cm



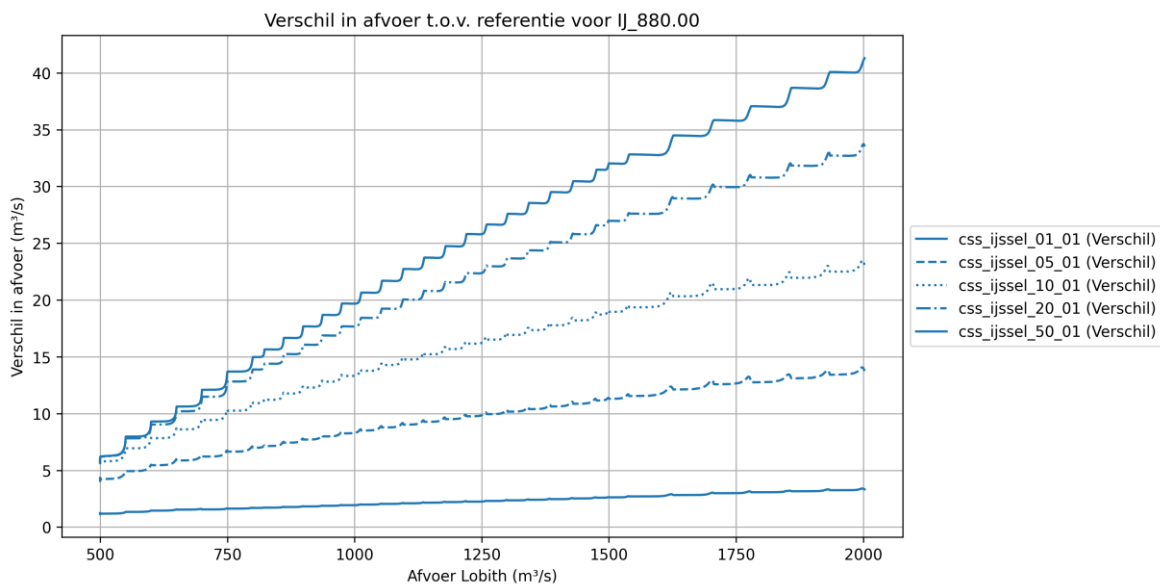
Versmalling met 50 m en bodemophoging met 50 cm

B.4 Verbreding Pannerdensch Kanaal

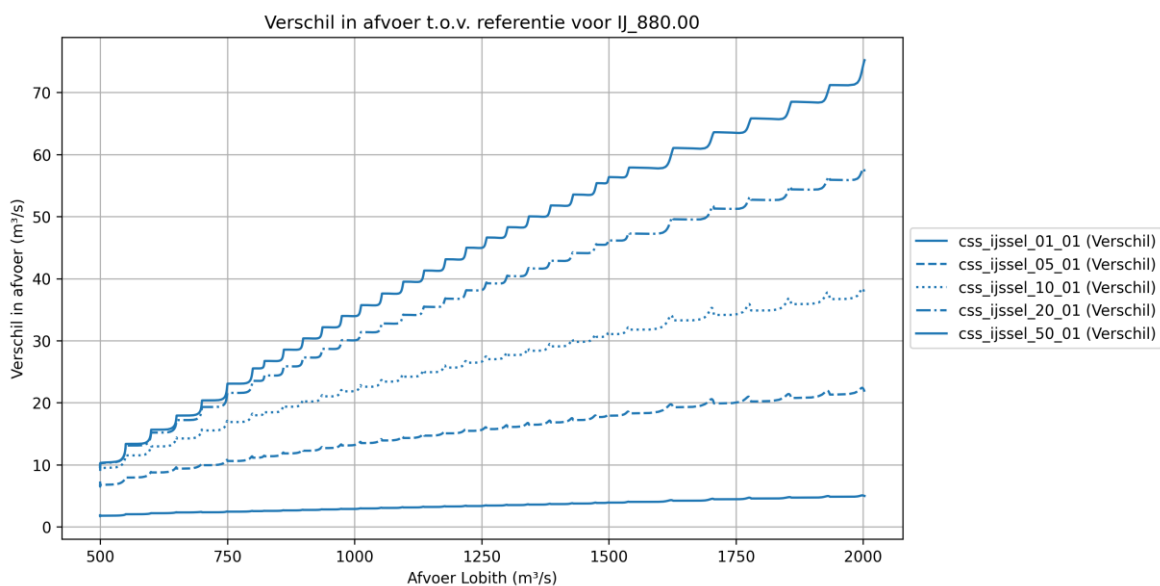


Verbreding met 30 m

B.5 Verbreding Boven-IJssel

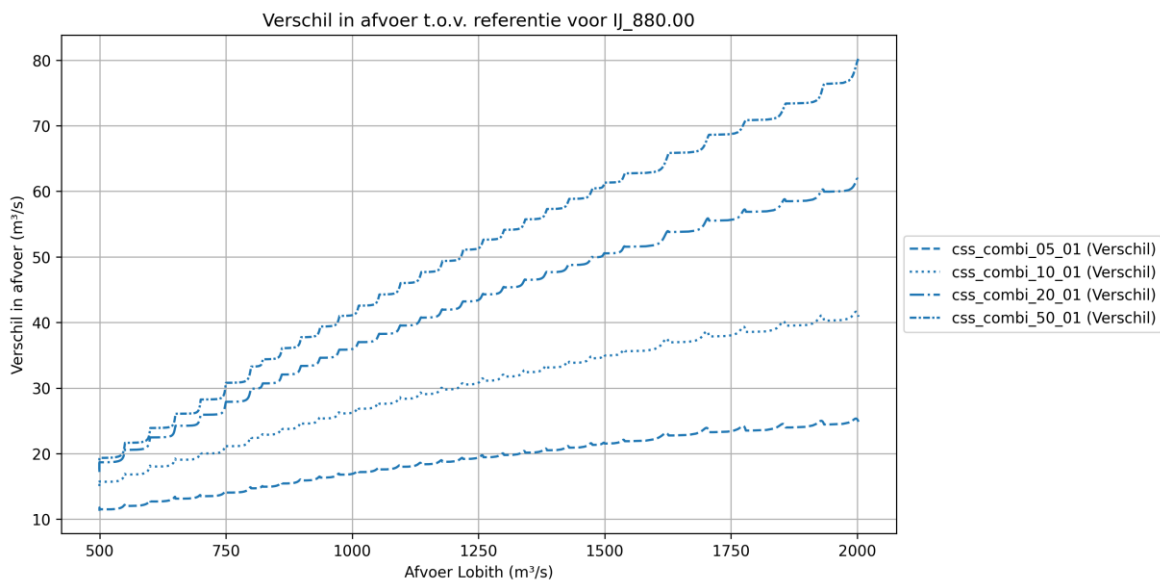


Verbreding met 15 m

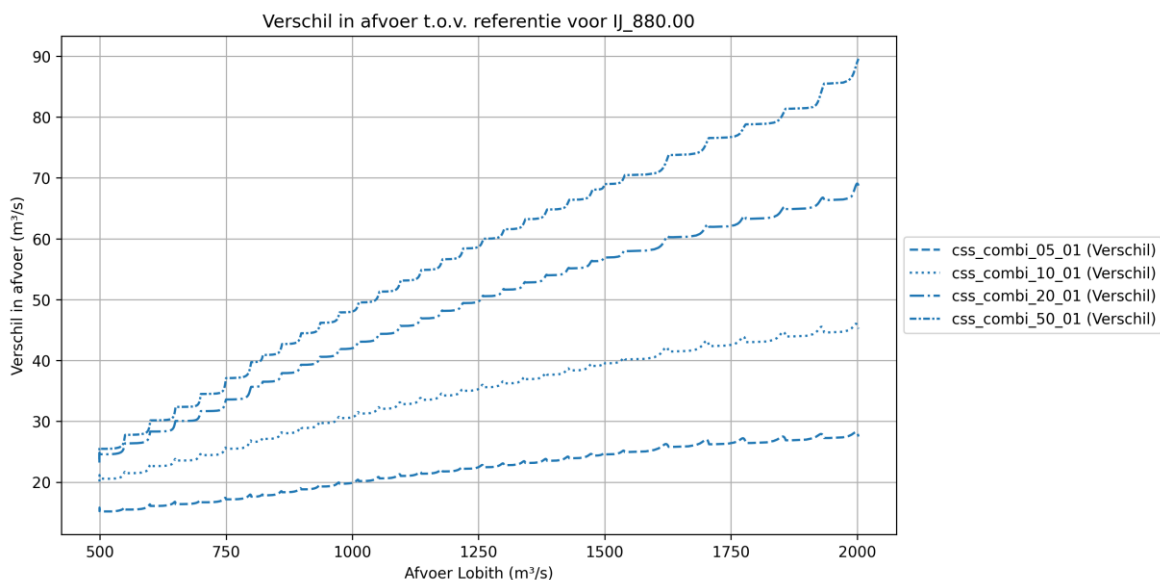


Verbreding met 30 m

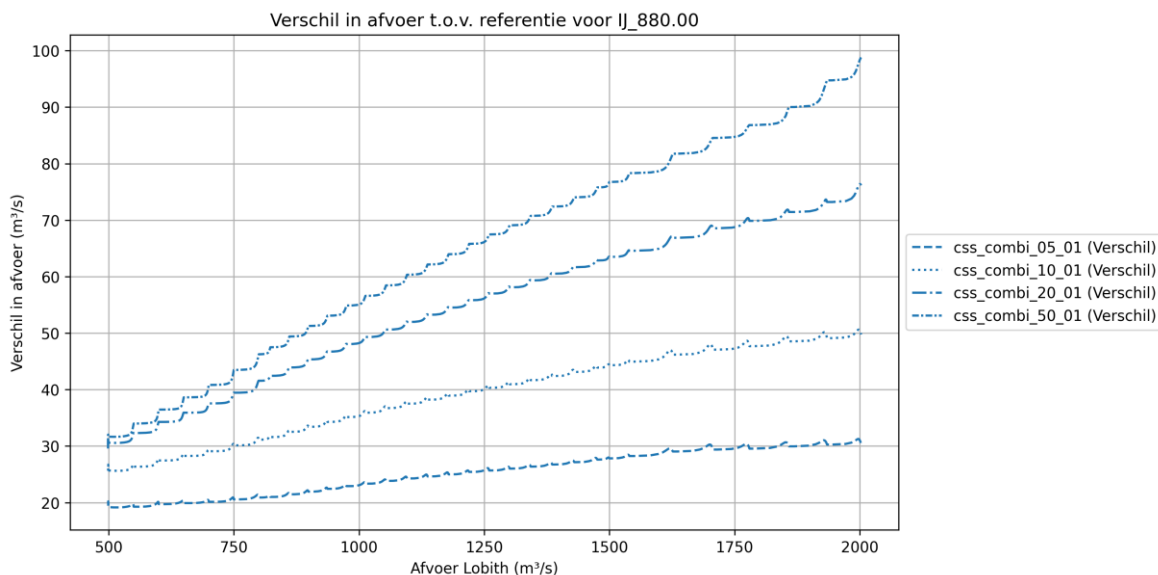
B.6 Versmalling Waal en verbreding Boven-IJssel



Versmalling Waal met 30 m en verbreding Boven-IJssel met 15 m (zonder bodemophoging)



Versmalling Waal met 30 m, bodemophoging Waal met 10 cm en verbreding Boven-IJssel met 15 m



Versmalling Waal met 30 m, bodemophoging Waal met 20 cm en verbreding Boven-IJssel met 15 m

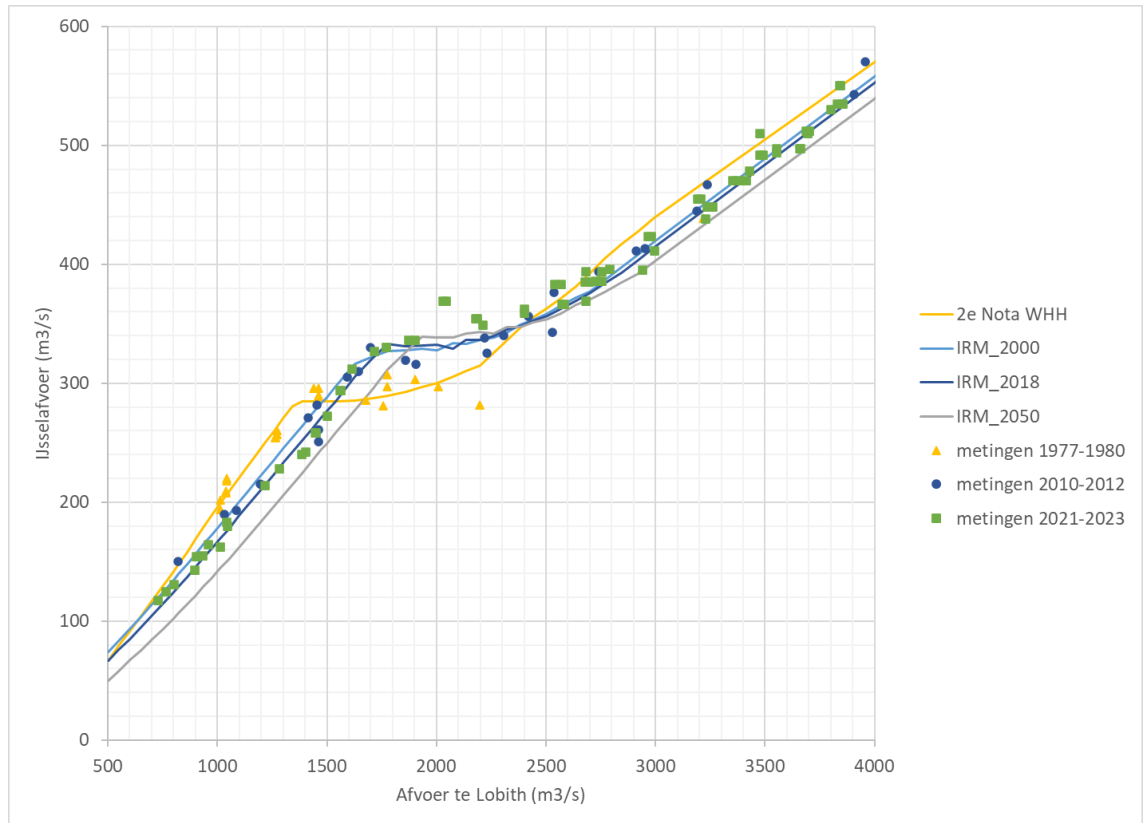
B.7 Sturing stuw Driel

Stuw Driel speelt een belangrijke rol bij de verdeling van de rivierafvoer, met name bij lagere Rijnafoeren. Het primaire doel van stuw Driel is het stuwen van extra water richting IJssel en IJsselmeer bij lagere Rijnafoeren. Voor de inzet van stuwcomplexen Driel, Amerongen, en Hagestein zijn op hoofdlijnen vier fases te onderscheiden (Hydrologic, 2022) waarbij afvoeren uit het stuwprogramma van 2016 zijn aangehouden:

1. Wanneer de waterstand bij Lobith onder 11,40 m NAP (Bovenrijnafoer circa 3630 m³/s) komt treedt het stuwprogramma in werking. Tussen 11,40 en 10,00 m NAP (Bovenrijnafoer circa 3630 - 2600 m³/s; stuwprogramma 2016) bij Lobith begint het stuwproces met het knippen van de afvoer van de Nederrijn-Lek met stuw Amerongen en stuw Hagestein ten behoeve van peilregulatie voor de scheepvaart op de Nederrijn-Lek. Stuw Driel is in deze fase nog volledig geopend, en de waterverdeling over de IJssel en de Nederrijn-Lek wordt bepaald door de riviergeometrie en -ruwheid, in het bijzonder bij de twee splitsingspunten.
2. Bij een waterstand van Lobith onder 10,00 m NAP (Bovenrijnafoer circa 2600 m³/s; stuwprogramma 2016) sluiten de vizierschuiven van stuwcomplex Driel steeds verder, gericht op het zo lang mogelijk handhaven van minimaal 285 m³/s richting de IJssel. Tot een waterstand van 8,60 m NAP te Lobith (Bovenrijnafoer circa 1590 m³/s) is dit mogelijk.
3. Onder een waterstand van 8,60 m NAP bij Lobith (Bovenrijnafoer circa 1590 m³/s; stuwprogramma 2016) is de Nederrijn-Lek volledig gestuwd. De IJsselafoer zakt dan mee met de Bovenrijnafoer. Door stuwcomplex Driel wordt het minimaal benodigde debiet voor de Nederrijn-Lek doorgelaten (ongeveer 30 m³/s).
4. Onder een waterstand van circa 7,00 m NAP bij Lobith is er bijna geen verval meer over het stuwcomplex; bij een waterstand bovenstrooms Driel lager dan 6,00 m NAP is de waterstand lager dan het peil van het benedenstroomse pand Driel-Amerongen (6,00 m NAP) en is er sprake van een negatief verval. Om dit te voorkomen en aanvoer naar de Nederrijn-Lek te behouden, worden de vizierschuiven opengezet.

Figuur.B-5 toont de resulterende afvoer naar de IJssel. Hierbij vallen twee dingen op:

- Ten tijde van de 2^e Nota WHH ging er inderdaad 285 m³/s naar de IJssel wanneer stuw Driel gedeeltelijk geopend was. Echter, op dit moment gaat er meer water naar de IJssel (ongeveer 330 tot 350 m³/s, zie de groene en blauwe punten in Figuur.B-5).
- De doorgaande rivierbodemerisatie heeft ervoor gezorgd dat stuw Driel bij hogere afvoeren geheel dicht staat. In de jaren '80 (2^e Nota WHH) was de stuw bij afvoeren van 1350 m³/s te Lobith of lager geheel gesloten. Inmiddels is dat bij afvoeren rond de 1700 m³/s of lager het geval. Wanneer de rivierbodemerisatie niet wordt gestopt (en het stuwprogramma niet wordt aangepast) zal dit rond het jaar 2050 opschuiven naar een afvoer te Lobith van 1900 m³/s en eind deze eeuw mogelijk nog meer.

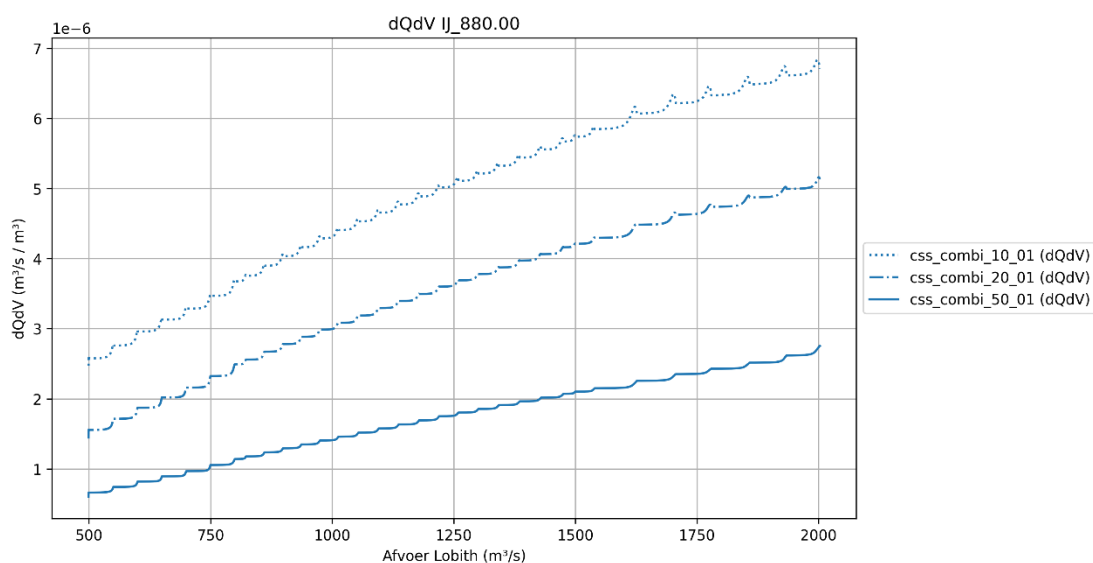


Figuur.B-5 Berekende en gemeten afvoeren op de IJssel als functie van de afvoer te Lobith (bron: Quartel in prep)

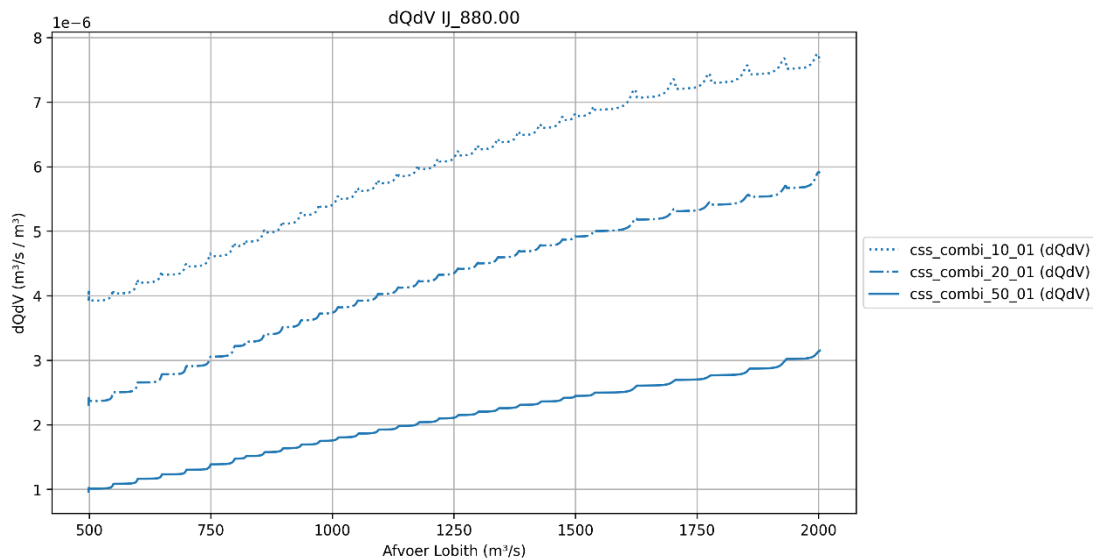
C Efficiëntie van de maatregelen

Om een beeld te krijgen van de efficiëntie van een maatregel is voor elke combinatie bepaald hoeveel extra afvoer er wordt gerealiseerd per af- of toename in doorstroomvolume (dQdV). Het doorstroomvolume wordt bepaald door de toegepaste versmalling of verbreding van het zomerbed, de bodemophoging en de lengte waarover de maatregel wordt toegepast.

Door de verschillende dQdV-waardes van de verschillende maatregelen met elkaar te vergelijken blijkt dat de meest efficiënte combinatie bestaat uit het zoveel mogelijk ophogen van de bodem in combinatie over een zo kort mogelijk traject. In Figuur.C-6 en Figuur.C-7 zijn de dQdV-grafieken voor de combinatiemaatregel (versmalling Waal en verbreding IJssel) zonder en met 20 cm bodemophoging weergegeven. Er moet wel worden opgemerkt dat de meest efficiënte maatregel niet per se bruikbaar is omdat deze te weinig extra afvoer naar de IJssel realiseert.



Figuur.C-6 dQdV voor IJ_880.00 voor een maatregel met 30 m versmallen, zonder bodemophoging op de Waal en verbreden met 15 m op de Boven-IJssel.



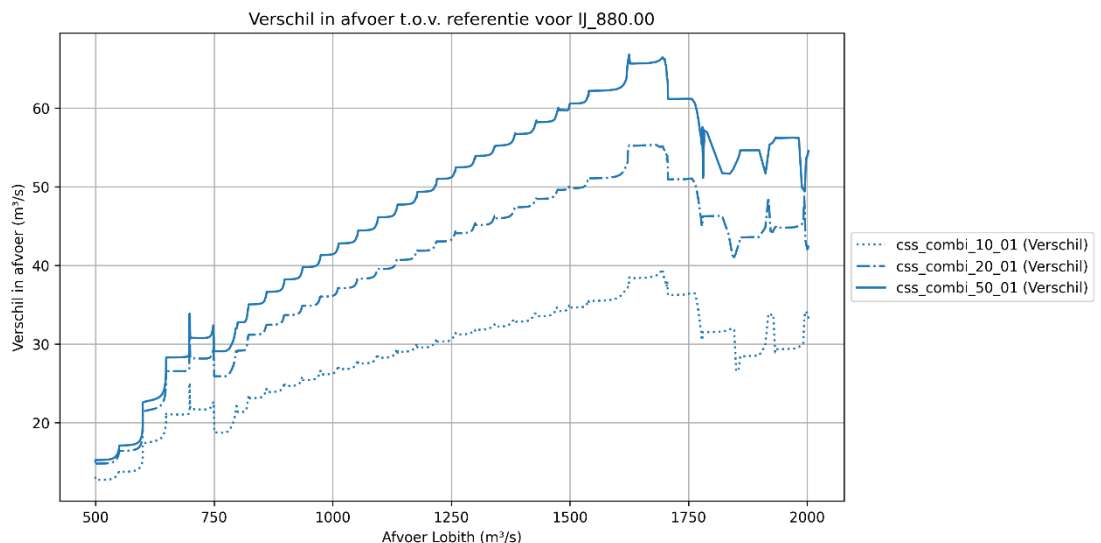
Figuur.C-7 dQdV voor IJ_880.00 voor een maatregel met 30 m versmallen, met bodemophoging van 20 cm op de Waal en verbreden met 15 m op de Boven-IJssel.

D Effect huidige sturing stuw Driel over het afvoerbereik

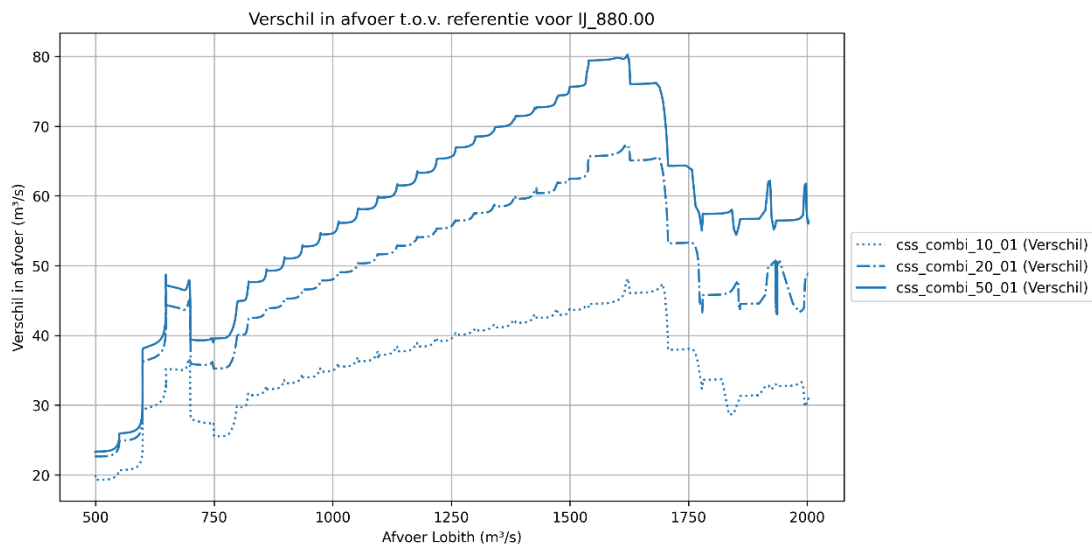
Omdat de maatregelen effect hebben op de waterstanden bij Lobith hebben zij ook effect op de stuwsturing welke gebeurt op basis van waterstanden. In deze studie is gewerkt met een alternatieve stuwsturing waarbij stuw Driel altijd dicht staat en een vast debiet van 30 m³/s wordt doorgelaten naar de Nederrijn. In de huidige situatie treedt het stuwprogramma in werking bij een waterstand van 8,60 m +NAP (afvoer van rond de 1700 m³/s volgens stuwprogramma 2016) bij Lobith en gaat de stuw langzaam open. Resultaat, er stroomt meer water richting de Nederrijn. Onderzocht is hoe de eerder gepresenteerde resultaten veranderen wanneer zou worden uitgegaan van het huidige stuwprogramma. Wanneer de riviergeometrie veranderd zal het stuurprogramma daar ook op aangepast moeten worden.

Versmalling en bodemophoging op de Waal leiden tot hogere waterstanden bij Lobith. Hierdoor gaat de stuw bij lagere afvoer open. Deze verschuiving is terug te zien in Figuur.D-8 en Figuur D-9 voor de maatregel zonder en met een bodemophoging van 20 cm. Door het openen van de stuw neemt het effect van de maatregel af. Een deel van de afvoer die extra naar het Pannerdensch Kanaal gaat wordt nu immers afgevoerd naar de Nederrijn in plaats van de IJssel.

In Tabel D.D-1 is weergegeven bij welke afvoer de waterstand van 8,60 m +NAP wordt gehaald.



Figuur.D-8 Extra afvoer naar de IJssel met een versmalling van 30 m op de Waal, zonder bodemophoging en verbreding van 15 m van het zomerbed van de Boven-IJssel. **Met** stuwsturing aan.



*Figuur D-9 Extra afvoer naar de IJssel met een versmalling van 30 m op de Waal, met bodemophoging van 20 cm en verbreding van 15 m van het zomerbed van de Boven-IJssel. **Met** stuwsturing aan.*

Tabel D.D-1 De afvoeren waarbij een waterstand van 8,6 m +NAP bij Lobith gehaald wordt voor een maatregel met 30 m versmallen op de Waal, 15 m verbreden op de IJssel en verschillende mate van bodemophoging en uitvoeringslengtes.

Lengte (km)	Referentie (model)	Geen ophoging	10 cm ophoging	20 cm ophoging
10	1665	1619	1611	1582
20	1665	1606	1539	1535
50	1665	1582	1536	1499

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl