Deltares

Effectbepaling meergeulensysteem Waal



Effectbepaling meergeulensysteem Waal

Auteur(s)

Bescherming persoonlijke leven(Ext

Effectbepaling meergeulensysteem Waal

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Bescherming persoonlijke lev
Projectreferenties	SITO-PS 2025 WVH04
Trefwoorden	Ruimte voor de Rivier2.0, Meergeulensysteem, Riviermorfologie, Rivierfuncties, Rijntakken, Waal

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	21-01-2026
Projectnummer	11211568-003
Document ID	11211568-003-ZWS-0001
Pagina's	123
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Bescherming persoonlijke leven(Exter	

Samenvatting

Inleiding
Het programma Ruimte voor de Rivier 2.0 (RvdR2.0) is voornemens om de rivierbodemerosie te stoppen. Een oplossingsrichting die in dat kader wordt onderzocht betreft de aanleg van een meergeulensysteem (MGS). De geulen zorgen voor rivierverruiming en lagere stroomsnelheden. Haskoning (2025) heeft twee varianten van een meergeulensysteem onderzocht om meer inzicht te krijgen in de rivierkundige werking. Beide varianten zijn doorgerekend met een hydraulisch model in D-HYDRO (*gebaseerd op dflowfm2d-rijn-beno19_6-v1b*). De eerste variant bestaat uit een combinatie van langsdammen met oevergeulen (OG). De tweede variant gaat uit van versmalling door kribverlenging in combinatie met uiterwaardgeulen (UG). Alle oever- en uiterwaardgeulen hebben een drempel bij de inlaat waardoor ze pas vanaf de Overeengekomen Lage Afvoer (OLA) van 1020 m^3/s te Lobith mee gaan stromen. Bij beide varianten is de hoofdgeul met 30 m versmald. Dit rapport betreft de effectbepaling van beide varianten op basis van de resultaten van de hydraulische berekeningen uitgevoerd door Haskoning (2025).

Hydraulica
Het versmallen van het zomerbed zorgt ervoor dat waterstanden op de Waal bij lage afvoeren (wanneer de oever- en uiterwaardgeulen nog niet mee stromen) maximaal 20 cm hoger worden. Deze hogere waterstanden zijn ook merkbaar bij de Pannerdensche Kop en zorgen ervoor dat er tot maximaal ongeveer 15 m^3/s meer afvoer via het Pannerdensch Kanaal naar de IJssel wordt afgevoerd. Dat verhoogt ook daar de waterstanden met maximaal 10 tot 15 cm.

Bij afvoeren boven de 1020 m^3/s te Lobith gaan de geulen mee stromen. Daardoor neemt de opstuwende werking van het versmalde zomerbed af. Waterstanden op de Waal zijn bij afvoeren van 1300 tot 1600 m^3/s vrijwel gelijk aan de huidige situatie. Daardoor is de afvoerverdeling bij deze afvoeren vrijwel onveranderd.

Bij afvoeren boven de 2000 m^3/s te Lobith stromen de geulen steeds effectiever mee. Dit verlaagt de waterstanden op de Waal. De grootste waterstandsdaling treedt op bij afvoeren van 4000 tot 6000 m^3/s. Dit zijn afvoeren waarbij veel uiterwaarden in de huidige situatie onderlopen, maar nog niet effectief mee stromen. De verruiming door de oevergeulen verhoogt daardoor de afvoercapaciteit aanzienlijk, met maximaal bijna 40 cm waterstandsdaling tot gevolg op de Midden-Waal. De uiterwaardgeulen verlagen de waterstanden dan echter nog 10 cm extra. Dit komt doordat zomerkades zijn verwijderd en de uiterwaarden ook bij lagere afvoeren al mee gaan stromen.

Bij zeer hoge afvoeren (>16.000 m^3/s te Lobith) bedraagt de waterstandsdaling nog maximaal 25 cm. Dit verschuift de afvoerverdeling met maximaal 200 m^3/s extra afvoer naar de Waal, waardoor de waterstanden ook op de andere Rijntakken afnemen.

Morfologie
Beide onderzoeksvarianten van een meergeulensysteem kunnen de grootschalige rivierbodemerosie op de Waal stoppen. Daarbij is het belangrijk dat de rivierverruiming, bij de afvoeren die het meest relevant zijn voor het sedimenttransport (1.400 – ca. 6.000 m^3/s), over het hele traject gelijkmatig gebeurt en in benedenstroomse richting toeneemt. Hierdoor ontstaat langs de rivier een grootschalige dalende gradiënt in stroomsnelheden. De stroomafwaarts steeds lagere stroomsnelheden compenseren de grotere mobiliteit van het stroomafwaarts steeds fijner wordende sediment.

Beoogd wordt dat de rivier over de hele lengte dezelfde hoeveelheid sediment transporteert dankzij een uitgekiende balans tussen stroming en sedimentkorrelgroottes. Zodoende kan de bodemerosie worden gestopt. Trajecten zonder verruiming of juist met extra verruiming door bijvoorbeeld overlappende geulen veroorzaken ongewenste morfologische effecten (aanzanding en erosie), waardoor de effectiviteit afneemt en de stabilisatie van de rivierbodem wordt bemoeilijkt.

De in voorliggende studie beschouwde onderzoeksvarianten zijn nog niet geoptimaliseerd voor geleidelijke toename van de verruiming in benedenstroomse richting. Zo is bij de UG variant op de Boven-Waal sprake van teveel verruiming. In de volgende ontwerpfase moet het ontwerp ook hierop worden geoptimaliseerd. Naar verwachting is dat voor uiterwaardgeulen lastiger dan voor oevergeulen, omdat er meer restricties voor de ligging en grootte van de geulen in de uiterwaarden zijn dan van de oevergeulen, die direct langs de hoofdgeul zijn gesitueerd.

In deze studie is hoofdzakelijk gekeken naar grootschalige effecten. Er is bij beide varianten nog niet in detail gekeken naar de effecten op de lokale rivierbodemdynamiek, bijvoorbeeld het ontstaan van nieuwe ondieptes. Het is echter aannemelijk dat er door de geulen, zowel UG als OG, meer dynamiek in de rivierbodem zal ontstaan.

In deze studie is ook gekeken naar de invloed van het klimaat op de effectiviteit van het MGS, waarbij gekeken is naar een gemiddeld, een droger en een natter klimaatscenario. De maatregelpakketten zijn bij een droger klimaat iets minder goed in staat om de erosie te stoppen dan bij een gemiddeld klimaat. Bij een natter klimaat lukt het juist iets beter. Dit komt doordat bij de nu doorgerekende varianten bij zeer lage afvoeren nog sprake is van erosie. Dit betekent echter ook dat de optimale dimensies van de oevergeulen of uiterwaardgeulen afhankelijk zijn van het toekomstige klimaat. Omdat dit niet bekend is, is het belangrijk om de geulen te ontwerpen op een manier die toestaat om in de toekomst aanpassingen te maken, bijvoorbeeld aan de hoogte van instroomdrempels of tussenopeningen. Of dit soort aanpassingen voldoende zijn om toekomstige klimaateffecten op te vangen moet in een vervolgfase nog nader worden onderzocht.

Hoeveel onderhoud er nodig zal zijn in de oevergeulen of uiterwaardgeulen kan op dit moment nog niet goed worden berekend met de voor deze studie beschikbare numerieke modellen. Nog onvoldoende bekend is hoeveel sediment er over de drempels getransporteerd wordt en vanuit de hoofdgeul in de oever- of uiterwaardgeulen terecht komt. Dit moet in een vervolgfase nader worden bestudeerd.

Natuur
Door de aanleg van een MGS neemt het areaal dat permanent onder water staat toe (iets meer bij UG dan bij OG). Afhankelijk van het ontwerp van de oevers neemt ook het areaal dat 150 tot 365 dagen per jaar onder water staat toe. Omdat de geulen zijn afgeschermd van de hoofdgeul is hier minder hinder van de scheepvaart (golven en geluid). Dat is gunstig voor macrofauna. Dit voordeel is het grootst in de UG-variant.

Omdat de aan te leggen geulen breed en diep zijn, zijn stroomsnelheden relatief hoog. In de OG-variant wordt een snelheid van 0,5 m/s al overschreden bij een rivierafvoer van 2020 m^3/s te Lobith. In de UG-variant is de stroomsnelheid in de geulen op de meeste plaatsen iets lager. Ook is de variatie in stroomsnelheden in de lengterichting van de geul groter. Dit is gunstig voor de natuur. Het is, met name als het toekomstige klimaat droger zou worden, een uitdaging om de geulen voldoende dagen per jaar te laten mee stromen.

Omdat een MGS invloed heeft op de rivierwaterstand zal dit ook de overstromingsduur van de uiterwaarden beïnvloeden.

Bij de OG-variant zijn de verschuivingen in overstromingsduren waarschijnlijk te klein om merkbaar effect te hebben op de potentiële ecotoopverdeling. Bij de UG-variant nemen de overstromingsduren van de uiterwaarden wel significanter toe doordat de zomerkades in deze variant zijn doorsneden.

Hoewel de laagwaterstanden bij een MGS hoger worden, heeft dit maar een beperkt effect op de grondwaterstanden. De gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) wordt mogelijk ongeveer 5 cm hoger. Bij de UG-variant moeten waarschijnlijk drempels worden aangebracht aan de benedenstroomse zijde om de waterstand in de geulen bij lage afvoeren (wanneer de geulen niet mee stromen) voldoende hoog te houden (anders gaan de geulen extra draineren). Bij de OG-variant speelt dit waarschijnlijk minder omdat langsdammen in enige mate water doorlaten.

Hoewel beide varianten ecologisch geoptimaliseerd kunnen worden, lijken de uitgangspunten voor het creëren van meer habitatvariatie en ongestoorde leefgebieden beter voor de UG variant.

Er is nu nog geen goed beeld van de snelheid waarmee oever- en nevengeulen aanzanden en wat dat betekent voor de frequentie waarmee ze moeten worden uitgebaggerd. Vanuit natuur is het wenselijk om zo min mogelijk in te grijpen.

Zoetwaterbeschikbaarheid
De doorgaande rivierbodemerosie heeft de afvoerverdeling bij laagwater verschoven, waarbij er steeds meer water via de Waal wordt afgevoerd. Voor zoetwaterbeschikbaarheid bestaat de wens om dit effect (deels) te compenseren. Dit houdt in dat bij afnemende afvoeren op de Rijn zo lang mogelijk, tot een afvoer van 1300 m^3/s bij Lobith, minimaal 285 m^3/s via de IJssel en 30 m^3/s via de Nederrijn wordt afgevoerd. Dan zou bij een Lobithafvoer van 1300 m^3/s circa 57 m^3/s extra naar de IJssel moeten gaan.

De nu doorgerekende varianten van het MGS verhogen bij zeer lage afvoeren de IJsselafvoer met maximaal ongeveer 15 m^3/s. Echter, omdat de oever- en nevengeulen bij 1020 m^3/s te Lobith al mee gaan stromen, gaat er bij een afvoer van 1300 m^3/s nog maar 5 m^3/s extra naar de IJssel. Dit is veel minder dan beoogd en levert daarmee slechts beperkt winst op voor de vullingsgraad van het IJsselmeer. Optimalisatie van de versmalling van het zomerbed en het instroommoment van de oever- en nevengeulen kunnen een groter effect sorteren op de afvoerverdeling bij laagwater. Denk hierbij aan het verhogen van de drempels in de meest bovenstrooms gelegen oever- en nevengeulen. Een dergelijke optimalisatie is in het kader van voorliggende studie nog niet uitgevoerd.

Bevaarbaarheid
Een MGS leidt tot een toename van de waterdiepte (maximaal 10 tot 20 cm bij de OLA van 1020 m^3/s, minder bij andere afvoeren). Op de Waal is dit het gevolg van het versmalde zomerbed, op de IJssel van de verschuiving in de afvoerverdeling. Door de grotere waterdiepte neemt het aantal locaties waar de vereiste vaardiepte niet wordt gehaald af (van ongeveer 5 naar 2 locaties op de Waal en van ongeveer 60 naar 30 locaties op de IJssel). Meer onderhoudsbaggerwerk zal nodig zijn in verband met de toename in de morfodynamiek na aanleg van een MGS. Het is niet mogelijk om dit op basis van de beschikbare resultaten uit het hydraulisch model te kwantificeren.

Waterveiligheid
De doorgerekende varianten van het MGS leiden beide bij zeer hoge afvoeren tot maximaal 25 cm waterstandsdaling. Bij de UG-variant treedt die waterstandsdaling vooral op op de Midden-Waal. Bij de OG-variant is een deel van dit effect (ongeveer 10 tot 15 cm) nog merkbaar bij de Pannerdensche Kop.

Daardoor verschuift vooral bij de OG-variant de afvoerverdeling bij Lobithafvoeren van 16.000 m^3/s en hoger. Deze verschuiving is zo groot (ongeveer 200 m^3/s meer afvoer naar de Waal dan in de referentiesituatie) dat het met het huidige regelbereik van de regelwerken op de splitsingspunten en zonder aanvullende verruiming op het Pannerdensch Kanaal of de Boven-IJssel niet mogelijk is om de beleidsmatige afvoerverdeling bij een afvoer van 16.000 m^3/s te realiseren. Wanneer beide regelwerken volledig open staan stroomt er nog ongeveer 30 m^3/s te veel naar de Waal.

Wanneer de regelwerken in de middenstand staan wordt 56% van het verschil tussen een afvoer van 18.000 en 16.000 m^3/s te Lobith (ook vaak 'het surplus' genoemd) afgevoerd naar de Waal. 32% gaat naar de IJssel en 13% naar de Nederrijn. De OG-variant komt met een verdeling van 66/26/9 (Waal/IJssel/Nederrijn) het dichtst in de buurt van de 80/20-verdeling (80% van het surplus naar de Waal en 20% naar de IJssel) die is beschreven in de Planologische Kernbeslissing (PKB) Ruimte voor de Rivier. Echter, ook bij deze variant is aanvullende rivierverruiming op de Waal nodig om 80% van het surplus naar de Waal af te kunnen voeren (ook wanneer regelwerk Pannerden dicht wordt gezet). Een 50/50-verdeling tussen de Waal en IJssel wordt bij de OG variant juist moeilijker te realiseren. Verder blijkt, net als bij eerdere studies naar de afvoerverdeling, dat het niet mogelijk is om de Nederrijn-Lek te ontzien wanneer de regelwerken in de middenstand staan.

De lagere hoogwaterstanden leiden tot een kleinere dijkverhogingsopgave. Indien de waterstandsverlaging wordt gebruikt om de dijkversterkingen die nu door het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) worden gerealiseerd te beperken, zal dat slechts tot een beperkte kostenbesparing leiden. Dit komt doordat de dijkversterkingsopgave vooral wordt bepaald door nieuwe inzichten in de faalmechanismen macrostabiliteit en *piping* en door de normaanscherping, en minder door de hoogte van de hoogwaterstanden. Door het aanleggen van geulen dichterbij de dijk neemt wel de kans op *piping* toe. Hiervoor moeten bij aanleg mitigerende maatregelen genomen worden. Deze kans is bij uiterwaardgeulen groter dan bij oevergeulen.

Klimaatverandering
Hoewel een MGS een positief effect heeft op alle vier de rivierfuncties is dit, zeker bij sterke klimaatverandering, niet afdoende om negatieve effecten van klimaatverandering te compenseren. In deze studie is gekeken naar mogelijk veranderende condities voor de rivierfuncties door klimaatverandering. Hierbij is het zichtjaar 2050 gehanteerd. Zo is de toename van de laagwaterstanden met 20 cm onvoldoende om de afname van de vaardiepte door sterke klimaatverandering te compenseren (bij het Whdry-scenario kan dit leiden tot 50 cm minder vaardiepte in 2050). Bij sterke klimaatverandering zal de vaardiepte in 2050 ondanks de aanleg van een MGS toch minder zijn dan nu, maar wel 10 tot 20 cm meer dan zonder MGS. De afname van de laagwaterstanden zorgt voor lagere grondwaterstanden in de uiterwaarden, wat nadelig kan zijn voor de natuur. En de kleine toename van de IJsselafvoer bij lage rivierafvoeren is onvoldoende om de kans op watertekorten in Noord-Nederland te verkleinen. Ook voor de waterveiligheidsopgave geldt dat een MGS het negatieve effect van extreme klimaatverandering niet volledig compenseert. Voor alle functies geldt dat de resterende opgave wel (aanzienlijk) kleiner is dan zonder MGS.

Vervolgstappen
De uitgevoerde effectbepaling geeft in grote lijnen een goed beeld van hoe een grootschalige systeemingreep als het MGS kan functioneren en waarmee rekening gehouden moet worden bij de optimalisatie van het ontwerp. Er zijn echter nog belangrijke vragen die het nodig maken om verder te kijken dan enkel naar hydraulische berekeningen en afgeleiden daarvan. We bevelen langs twee sporen vervolgstappen aan om het systeem gedetailleerd uit te werken. Het eerste spoor adresseert het vullen van kennisleemtes om onzekerheden te reduceren.

Geanalyseerd wordt daarin hoe gevoelig de uitkomsten en de te nemen beslissing zijn voor kennisleemtes ten aanzien van sedimenttransport over inlaatdrempels en langsdammen, de stabiliteit van de geulen, de stabiliteit van het splitsingspuntengebied, de interactie met maatregelen op de andere riviertakken, en geactualiseerde prognoses van de bodemerosie. Daar waar de gevoeligheid groot is wordt gericht aanvullend onderzoek aanbevolen. Het tweede spoor betreft de optimalisatie van het ontwerp om de effectiviteit te vergroten en negatieve effecten zoveel mogelijk te mitigeren. En daarnaast de omgang met onvermijdelijke resterende onzekerheden. Daarbij denken we aan volgorde en fasering van de uitvoering, aan een ontwerp dat toekomstige aanpassingen mogelijk maakt op basis van monitoring, interventieniveaus en voorbereiding van maatregelen die kunnen bijdragen aan de aanpasbaarheid van het systeem.

Inhoud

	Samenvatting	**4**
	Inhoud	**9**
1	**Inleiding**	**12**
1.1	Achtergrond	12
1.2	Deze studie	13
1.3	Leeswijzer	14
2	**Meergeulensysteem: verkende varianten**	**15**
2.1	Het concept	15
2.2	Algemene uitgangspunten met betrekking tot vormgeving van de uiterwaard- en oevergeulen	15
2.3	Inpassing van de uiterwaard- en oevergeulen	17
3	**Aanpak in deze studie**	**20**
3.1	Aanpak hydraulica	20
3.1.1	D-HYDRO-simulaties Haskoning	20
3.1.2	Extra simulaties Deltares	21
3.1.3	Uitvoering effectbepaling	22
3.1.4	Aandachtspunten bij interpretatie van de resultaten	22
3.2	Aanpak morfologie	22
3.3	Aanpak effectbepaling rivierfuncties	27
3.3.1	Natuur	27
3.3.2	Zoetwaterbeschikbaarheid	27
3.3.3	Bevaarbaarheid	27
3.3.4	Waterveiligheid	28
4	**Effect MGS op hydraulica**	**29**
4.1	Afvoerverdeling	29
4.1.1	Algemeen beeld	29
4.1.2	Lage afvoeren (≤2.020 m^3/s)	31
4.1.3	Middelhoge en hoge afvoeren (>2020 m^3/s)	32
4.2	Waterstanden	34
4.2.1	Lage afvoeren (≤2.020 m^3/s)	34
4.2.2	Middelhoge en hoge afvoeren (>2.020 m^3/s)	34
4.2.3	Verschil tussen de uiterwaardgeul- en oevergeulvariant	37
4.3	Stroomsnelheden	39
4.3.1	Instromen van de geulen	39
4.3.2	Stroomsnelheden in de hoofdgeul	40
4.3.3	Stroomsnelheid in de geulen	42
5	**Effect MGS op rivierbodemerosie**	**46**

5.1	Uitgangssituatie bodemtrends en sedimenttransportgradiënt	46
5.2	Validatie	48
5.3	Analyse referentiesituatie	50
5.4	Effect meergeulensysteem	51
5.5	Invloed klimaat	56
5.6	Vaargeulonderhoud en geulonderhoud	58
6	**Effect MGS op rivierfuncties**	**59**
6.1	Natuur	59
6.1.1	Scheiding van functies vermindert de invloed van scheepvaart	59
6.1.2	Overstromingsduren - habitatdiversiteit	59
6.1.3	Stroomsnelheden	62
6.1.4	Grondwaterstanden	64
6.1.5	Klimaatverandering	65
6.1.6	Aandachtspunten	65
6.2	Zoetwaterbeschikbaarheid	66
6.2.1	Afvoerverdeling laagwater	66
6.2.2	Vullingsgraad IJsselmeer en watertekort Noord-Nederland	67
6.2.3	Waterinnamepunten	69
6.2.4	Tegengaan verzilting	69
6.3	Bevaarbaarheid	70
6.3.1	Waterdiepte bij 1020 m^3/s (de huidige OLA)	70
6.3.2	Onderschrijding van de minimale vaardiepte – nu en in de toekomst	73
6.3.3	Bereikbaarheid van havens en sluizen	76
6.3.4	Dwarsstroming	76
6.4	Waterveiligheid	79
6.4.1	Waterstandsverlaging	79
6.4.2	Afvoerverdeling hoogwater	81
6.4.3	Effect op de dijkversterkingsopgave – hoogte en kwelweglengte	83
6.4.4	Effect op mogelijke vorming van ijsdammen	84
7	**Wat leren we van deze casestudie?**	**85**
7.1	Het effect van MGS op systeemniveau	85
7.1.1	Hydraulica	85
7.1.2	Rivierbodemerosie	86
7.1.3	Rivierfuncties	87
7.2	Aandachtspunten bij het ontwerp	89
7.3	Aanvullend onderzoek	90
8	**Conclusies**	**95**
8.1	Kan rivierbodemerosie op de Waal worden gestopt met een meergeulensysteem?	95
8.2	Wat is het effect op de rivierfuncties?	97
8.3	In hoeverre zijn de effecten anders bij een systeem met oevergeulen dan met uiterwaardgeulen?	99
9	**Literatuur**	**101**

A **Schematisatie rondom bestaande OG Tiel** **103**

B **Extra figuren hydraulica** **104**

B.1 Waterstanden 104

B.2 Afvoerverdeling 104

B.3 Stroomsnelheden 104

C **Extra figuren morfologie** **105**

C.1 Vergelijking van het transport per afvoerniveau tussen de varianten (gemiddelde hydrograaf) 105

C.2 Vergelijking van het transport per afvoerniveau voor de verschillende hydrografen 109

C.2.1 Referentie 109

C.2.2 Oevergeulen 113

C.2.3 Uiterwaardgeulen 117

D **Extra figuren rivierfuncties** **121**

D.1 Natuur 121

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Door grootschalige bodemerosie daalt het zomerbed van de Rijntakken. Het gaat met name om de bovenstroomse trajecten: de Boven- en Midden-Waal, het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel. Dit heeft negatieve gevolgen voor onder andere de riviernatuur, zoetwaterbeschikbaarheid (met name door veranderingen in de laagwaterafvoerverdeling), de bevaarbaarheid en de dekking boven kabels en leidingen. Het programma Ruimte voor de Rivier 2.0 (RvdR2.0) is voornemens om de rivierbodemerosie te stoppen.

De grootschalige bodemerosie op de Waal wordt veroorzaakt door een sedimenttransportgradiënt. De capaciteit van de stroming om sediment te transporteren neemt in benedenstroomse richting toe. Dit komt niet door een verandering in stroomsnelheden (die zijn vrij constant), maar vooral doordat het sediment in benedenstroomse richting steeds fijner wordt. Om de rivierbodemerosie te stoppen is het dus nodig dat deze gradiënt wordt vereffend (tot nul gereduceerd).

Twee typen ingrepen in de oorzaken kunnen de gradiënt in sedimenttransport vereffenen:

1 verlagen van de sedimenttransportcapaciteit door rivierverruiming die geleidelijk in stroomafwaartse richting toeneemt (wat resulteert in een geleidelijke afname van de stroomsnelheid in stroomafwaartse richting), of
2 vergroven van het sediment op de rivierbodem.

Het toevoegen van extra sediment aan de rivier middels suppleties kan ook bijdragen aan het behouden van de huidige rivierbodemligging, maar dit wordt vooral beschouwd als symptoombestrijding. De rivierbodemerosie blijft dan immers gewoon doorgaan, maar het effect daarvan wordt gecompenseerd door het geërodeerde sediment weer aan te vullen.

De oplossing waarbij de rivier wordt verruimd om de erosie te verminderen is verder uitgewerkt. Eerder is gekeken naar het effect van grootschalige verlaging van uiterwaarden (Barneveld et al., 2019). Omdat het uiterwaardoppervlak langs de Waal sterk varieert leidde dit tot onregelmatige verruiming, wat resulteerde in grotere morfodynamiek en mogelijk zelfs sterkere erosie in de Boven-Waal. Een meergeulensysteem (MGS) lijkt in dat opzicht kansrijker. Om synergie te creëren met bevaarbaarheid, zoetwaterbeschikbaarheid en natuur is daarbij ook gekeken naar de mogelijkheid om het zomerbed bij zeer lage rivierafvoeren te versmallen. Dit leidt bij lage afvoeren tot hogere waterstanden op de Waal en dus meer vaardiepte, hogere grondwaterstanden in de uiterwaarden en een verschuiving in de afvoerverdeling bij laagwater ten gunste van de IJssel. Het morfologische effect van de versmalling wordt bij hogere afvoeren gecompenseerd door de rivier extra te verruimen (extra brede oever- of uiterwaardgeulen).

Om een eerste beeld te krijgen van de mate van rivierverruiming die nodig is om de transportgradiënt te vereffenen heeft HKV berekeningen uitgevoerd met een morfologisch model (Barneveld et al., 2025). Daarbij is vooral getracht antwoord te geven op de vragen (1) of het mogelijk is om de transportgradiënt te vereffenen met een meergeulensysteem en (2) hoe groot de geulen ongeveer zouden moeten zijn om voldoende debiet te onttrekken aan de hoofdgeul. Het gebruikte rooster van het morfologische model was in de uiterwaarden echter te grof om uiterwaardgeulen in voldoende detail te kunnen schematiseren.

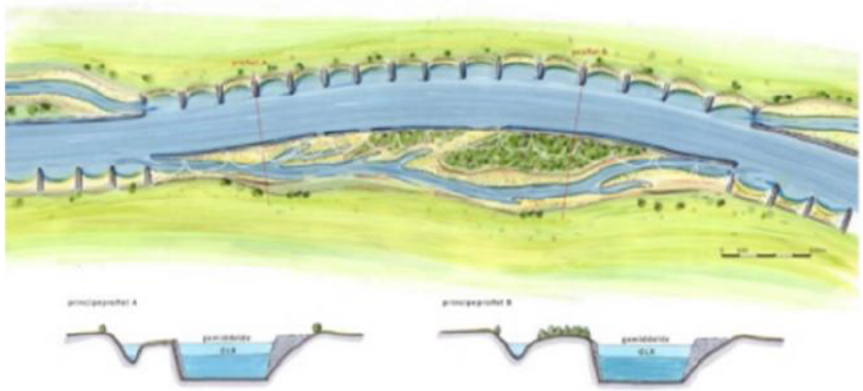
Met het onderzoek van HKV is dus vooral conceptueel in beeld gebracht op welke wijze de erosieve trend uit het systeem kan worden gehaald, met de focus op de variant met oevergeulen achter langsdammen.

Als vervolg is via verschillende tekensessies de mogelijke ruimtelijke inpassing van een meergeulensysteem in de Waal geschetst. Doel hiervan was om de benodigde ligging en het ruimtebeslag van de geulen zichtbaar te maken. Er zijn twee varianten geschetst:

1 Versmalling van het zomerbed met langsdammen, verruiming met oevergeulen (OG);
2 Versmalling van het zomerbed met kribverlenging en verruiming met uiterwaardgeulen (UG).

Haskoning heeft de ingrepen geschematiseerd in Baseline en hydraulisch doorgerekend met D-HYDRO (Haskoning, 2025). De varianten zijn geen definitieve ontwerpen, maar dienen om inzicht te krijgen in de werking van het MGS-concept en de verschillen tussen de oevergeulen- en uiterwaardgeulenvariant.

Opgemerkt wordt dat de varianten van het MGS die in deze studie worden verkend afwijken van het MGS dat is voorgesteld door onder meer het Wereld Natuur Fonds en ARK Rewilding Nederland in het manifest “Ruimte voor levende rivieren”[1]. In het manifest wordt een langsdam gecombineerd met een permanent mee stromende nevengeul door de uiterwaarden (Figuur 1-1). In deze studie verkennen we het effect van oevergeulen, direct achter de damwand en van uiterwaardgeulen die verder de uiterwaard ingaan (de geul in Figuur 1-1 is een soort tussenvariant). Bovendien stromen de geulen in deze studie niet permanent mee, omdat het MGS dat in deze studie wordt onderzocht ook tot doel heeft om de laagwaterstanden te verhogen.



Figuur 1-1 Langsdam met permanent mee stromende nevengeul zoals voorgesteld in het manifest “Ruimte voor levende rivieren”[1].

1.2 Deze studie

Rijkswaterstaat WVL heeft Deltares gevraagd om op basis van de hydraulische berekeningen van Haskoning een integrale effectbepaling uit te voeren. Daarbij is gekeken naar de hydraulische effecten (stroomsnelheden, waterstanden, afvoerverdeling bij laag- en hoogwater), verwachte morfologische effecten, en effecten op de rivierfuncties natuur, zoetwaterbeschikbaarheid, bevaarbaarheid en waterveiligheid.

[1] https://www.levenderivieren.nl/sites/default/files/2023-11/WWF_Manifest_Levende_Rivieren_spreads_Online.pdf

De onderzoeksvragen die beantwoord moesten worden zijn:

1 Kan rivierbodemerosie op de Waal worden gestopt met een meergeulensysteem?
2 Wat is het effect op de rivierfuncties (natuur, zoetwaterbeschikbaarheid, bevaarbaarheid, waterveiligheid)?
3 In hoeverre zijn de effecten anders bij een systeem met oevergeulen dan met uiterwaardgeulen?

Om deze vragen te beantwoorden is gerekend aan twee MGS-varianten, één met uiterwaardgeulen in combinatie met kribverlenging en een ander met oevergeulen in combinatie met langsdammen. De resultaten in deze studie geven een eerste beeld van de effectiviteit van een MGS op systeemniveau. Lokale effecten, bijvoorbeeld door keuzes in schematisatie, zijn meegenomen in de duiding van de resultaten om te komen tot meer generieke uitspraken. De studie biedt daarmee een basis voor verdere ontwerpoptimalisatie en aanvullend onderzoek.

1.3 Leeswijzer

Dit rapport start in hoofdstuk 2 met een korte toelichting op het concept van een meergeulensysteem en de twee door Haskoning (2025) doorgerekende varianten. Vervolgens beschrijft hoofdstuk 3 de gehanteerde aanpak, inclusief uitgangspunten voor hydraulische en morfologische analyses en de methodiek voor de effectbepaling op rivierfuncties. In hoofdstuk 4 worden de effecten van het meergeulensyteem op de hydraulica gepresenteerd, zoals waterstanden, afvoerverdeling en stroomsnelheden. Hoofdstuk 5 bespreekt de verwachte effecten op rivierbodemerosie. Daarna behandelt hoofdstuk 6 de effecten op de rivierfuncties: natuur, zoetwaterbeschikbaarheid, bevaarbaarheid en waterveiligheid met een doorkijk aan de hand van klimaatscenario's voor de bestaande opgaves. In hoofdstuk 7 wordt uitgezoomd naar systeemniveau: wat leren we van deze casestudie en welke aandachtspunten zijn er om rekening mee te houden bij het ontwerp? Tot slot bevat hoofdstuk 8 de conclusies per onderzoeksvraag. De bijlagen geven aanvullende figuren en detailinformatie over hydraulica, morfologie en rivierfuncties.

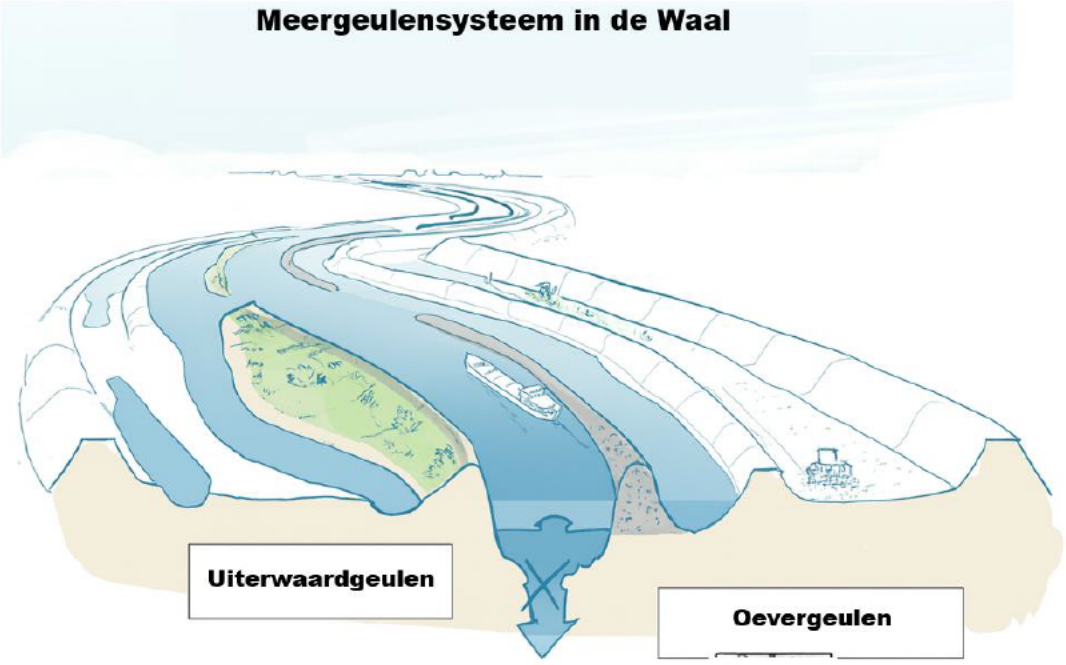
2 Meergeulensysteem: verkende varianten

2.1 Het concept

Het concept van een meergeulensysteem (MGS) is ontwikkeld om door rivierkundige verruiming de stroomsnelheid in het zomerbed te verlagen en daarmee het sedimenttransport te beperken. Dit kan bijdragen aan het stabiliseren van de rivierbodem en het tegengaan van erosie. In theorie zijn er eindeloos veel combinaties denkbaar: variaties in de mate van versmalling van het zomerbed en de dimensies van de oever- en uiterwaardgeulen, maar ook de manier waarop oever- en uiterwaardgeulen worden gecombineerd en ingepast.

In deze studie zijn twee varianten beschouwd (Figuur 2-1):

1 Een traject waarover de kribben zijn verlengd met daarachter een geul die de uiterwaard inloopt (**uiterwaardgeul**, UG).
2 Een langgerekte dam in de rivier waardoor een parallel gelegen **oevergeu**l (OG) ontstaat en het zomerbed verbreedt tijdens hogere rivierafvoeren. Een voorbeeld hiervan zijn de reeds bestaande langsdammen op de Waal bij Tiel;



Figuur 2-1 Visualisatie van het meergeulensysteem met oever- en uiterwaardgeulen (bewerkt uit Haskoning, 2025).

2.2 Algemene uitgangspunten met betrekking tot vormgeving van de uiterwaard- en oevergeulen

De twee varianten zijn in Baseline geschematiseerd door Haskoning (2025). De doorgerekende varianten zijn geen definitieve ontwerpen maar dienen uitsluitend om een gevoel te krijgen voor de effectiviteit van het MGS-concept op de Waal. Ook kunnen hiermee de belangrijkste verschillen tussen de UG- en OG-variant in kaart gebracht worden.

Als blijkt dat het concept perspectief biedt om bodemerosie af te remmen of stoppen en positieve effecten heeft voor de rivierfuncties, kunnen in een volgende fase gedetailleerde ontwerpstudies worden uitgevoerd.

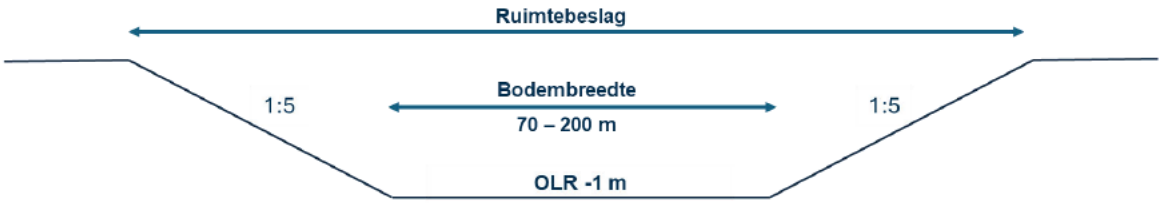
Voor een uitgebreide toelichting over het ontwerp van de varianten wordt verwezen naar hoofdstuk 2 en 3 in het rapport van Haskoning (2025). Het voorliggende hoofdstuk benoemt de belangrijkste algemene uitgangspunten en geeft per variant een korte beschrijving.

De volgende uitgangspunten gelden voor beide varianten:

- Versmalling van het zomerbed: het zomerbed is met 30 meter versmald, gerekend vanuit de kribkop. Dit is gerealiseerd met kribverlengingen (uiterwaardgeulvariant) of langsdammen (oevergeulvariant).
- Benodigde onttrekking: deze is bepaald op basis van de studie van HKV (Barneveld et al., 2025) bij afvoerniveaus van 2500 en 5800 m³/s. Het afvoerniveau 2500 m³/s wordt als maatgevend voor morfologische effecten gezien en de geulen zijn daarom op de corresponderende benodigde onttrekking gedimensioneerd. Voor het functioneren van de maatregel is het essentieel dat de geuldimensies toenemen in stroomafwaartse richting.
- Ruimtelijke inpassing: binnen bestaande dijken, met vermijding van havens, vaste lagen en beschermingszones, en met aandacht voor ecologie, waterveiligheid en beheerbaarheid.
- Roosterverfijning: om hydraulische effecten nauwkeurig te modelleren is het rekenrooster rondom de uiterwaardgeulen verfijnd. Het reguliere rekenrooster is in de uiterwaarden veelal te grof om een uiterwaardgeul met voldoende detail te kunnen schematiseren.

Voor de vormgeving van de **uiterwaardgeulen** is uitgegaan van de volgende standaardgeometrie (Figuur 2-2):

- Talud: 1:5;
- Diepte: OLR[2] – 1 m bij in- en uitstroompunt, hiertussen is lineair geïnterpoleerd;
- Bodembreedte variërend van 70 m tot 200 m. De breedte neemt toe in stroomafwaartse richting (Tabel 2-1).
- Drempel:
  - Hoogte OLR van huidig systeem
  - Talud: 1:3
  - Kruinbreedte: 3 m
  - Locatie: bovenstrooms van de geul en dwars op de stroomrichting
- Ruwheid: één oeverruigte (binnenbochten) en één oeverwater (buitenbochten).



Figuur 2-2 Standaarddimensies van de uiterwaardgeul.

[2] Overeengekomen lage rivierstand (OLR) behorend bij de overeengekomen lage rivierafvoer (OLA – huidig op 1020 m³/s).

Voor de gekozen standaardgeometrie van de **oevergeulen** geldt (Figuur 2-3):

- Talud: 1:5
- Diepte: OLR – 3,0 tot – 4,6 m;
- Bodembreedte: 34–97 m, afhankelijk van benodigd doorstroomprofiel.
- Drempel:
  - Lengte: 1 kribvak
  - Oriëntatie: In langsrichting op de stroming
  - Afsluiting: kribverlenging toepassen bovenstrooms waarop de drempel kan worden aangesloten
  - Hoogte: OLR huidig systeem
  - Talud: 1:3
  - Kruinbreedte: 3 m
  - Locatie: bovenstrooms van de geul
- Ruwheid: waterbodem over de gehele oevergeul:
- Langsdam:
  - Talud: 1:2,5 aan beide zijdes
  - Hoogte: OLR + 2 m
  - Kruinbreedte: 3 m



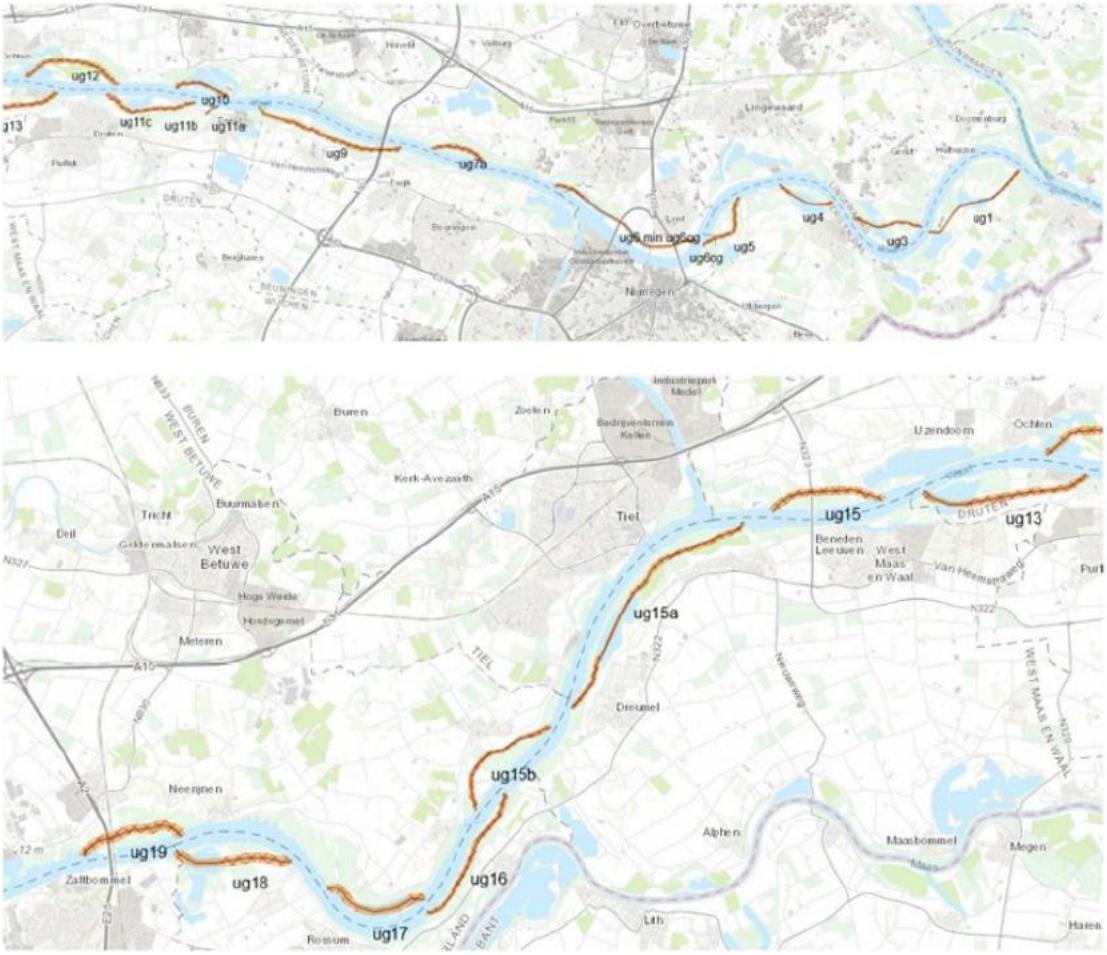
Figuur 2-3 Standaarddimensies van de oevergeul en langsdam (Haskoning, 2025).

2.3 Inpassing van de uiterwaard- en oevergeulen

Het ontwerp van de varianten is tot stand gekomen aan de hand van twee tekensessies. Tijdens deze sessies zijn mogelijke locaties voor geulen en langsdammen verkend, waarbij rekening is gehouden met hydraulische werking, ecologische kansen en ruimtelijke beperkingen. Bij ruimtelijke beperkingen kan men denken aan ruimtegebrek tussen de bestaande dijken, de aanwezigheid van havens die bereikbaar moeten blijven en de ligging van vaste lagen en beschermingszones.

Sommige geulen zijn als niet haalbaar beoordeeld vanwege technische, ecologische of juridische belemmeringen. De onderbouwing bij die afweging is terug te vinden in Bijlage B van Haskoning (2025).

Bij de uiterwaardgeulenvariant wordt de verruiming gerealiseerd door geulen in de uiterwaarden, gecombineerd met kribverlengingen voor rivierversmalling. De geulen lopen achter de kribben door de uiterwaarden, met instroom en uitstroom naar de hoofdgeul. De bodembreedte varieert van 70 m (bovenstrooms) tot 200 m (benedenstrooms) (Tabel 2-1). Er is gekozen om de drempel bovenstrooms met de kruin op OLR neer te leggen. Dit is gunstiger voor morfologie. Per geul is de gebruikte geometrie terug te vinden in Bijlage E van Haskoning (2025). De ligging van de uiterwaardgeulen is te zien in Figuur 2-4.

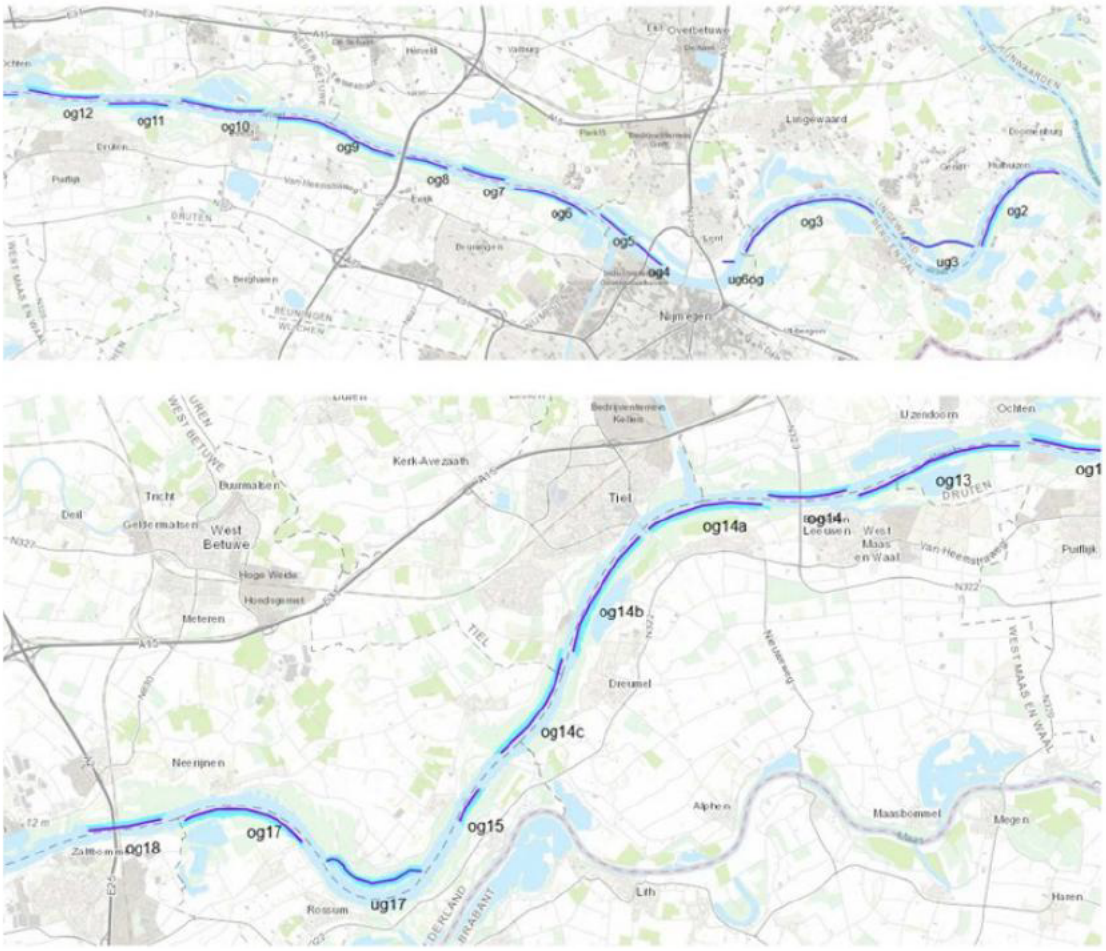


Figuur 2-4 Ligging van de uiterwaardgeulen langs de Waal.

Tabel 2-1 Gemiddelde bodembreedte uiterwaardgeulen

Rivierkilometer	Bodembreedte (m) (gemiddeld)
>920	200
>910 en <920	175
>900 en <910	150
>890 en <900	125
>880 en <890	100
<880	70

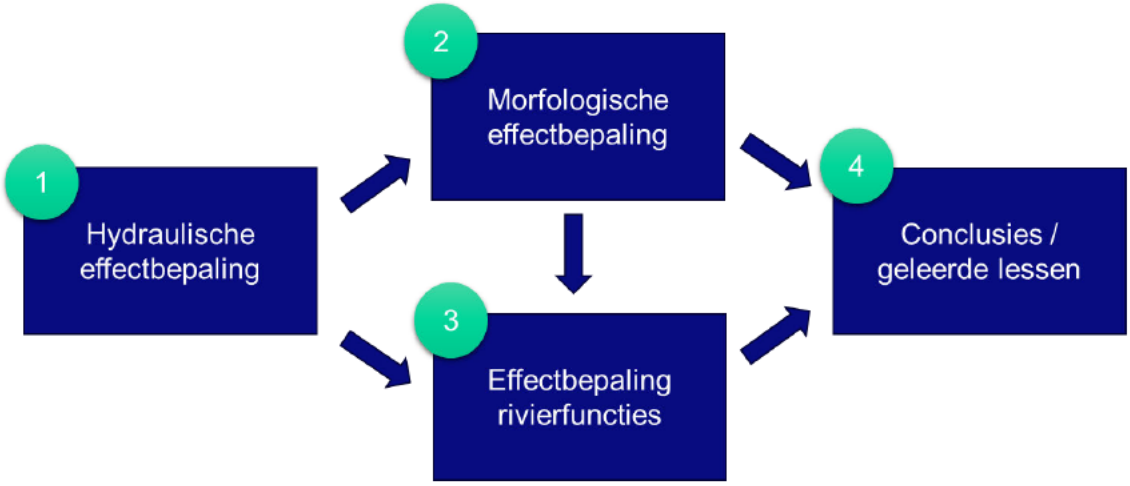
De oevergeulenvariant combineert langsdammen met oevergeulen direct langs het zomerbed. De geulen liggen parallel aan de rivier, achter de langsdammen, die op circa 30 m uit de kribkop liggen. De bodemdiepte is gemiddeld OLR – 3,6 m en de breedte varieert tussen 34 en 97 m afhankelijk van het benodigde doorstroomvolume. Per geul is de gebruikte geometrie terug te vinden in Bijlage E van Haskoning (2025). De ligging van de oevergeulen is te zien in Figuur 2-5.
In deze studie is aangenomen dat de langsdammen waterdicht zijn. Dit is bij de bestaande langsdammen niet het geval. Door de gebruikte zandkern zijn deze poreus wat zorgt voor beperkte extra afvoer door de oevergeulen . Dit kan worden opgelost door een kleikern te plaatsen of de dam met fijner materiaal af te dekken.



Figuur 2-5 Ligging van de oevergeulen op de Waal.

3 Aanpak in deze studie

Deltares is gevraagd om op basis van de hydraulische berekeningen van Haskoning een integrale effectbepaling uit te voeren. Daarbij is gekeken naar de hydraulische effecten (stroomsnelheden, waterstanden, afvoerverdeling bij laag- en hoogwater), verwachte morfologische effecten, en effecten op de rivierfuncties natuur, zoetwaterbeschikbaarheid, bevaarbaarheid en waterveiligheid. Eerst wordt er in detail gekeken naar beide doorgerekende MGS-varianten om vervolgens het effect van het MGS op de Waal in meer algemene zin op systeemniveau te beschouwen. Hieruit volgen geleerde lessen, mogelijke verbeteringen en conclusies op systeemniveau. De gehanteerde aanpak is schematisch weergegeven in Figuur 3-1.



Figuur 3-1 Schematische weergave van de gehanteerde aanpak binnen deze studie.

Voor alle onderwerpen zijn verschillende uitgangspunten gehanteerd. Deze uitgangspunten zijn van belang voor de interpretatie van de resultaten en worden hieronder daarom kort toegelicht.

3.1 Aanpak hydraulica

3.1.1 D-HYDRO-simulaties Haskoning

Er is gebruik gemaakt van het D-HYDRO-model *dfowfm2d-rijn-beno19_6-v1b* met het verfijnde rekenrooster *grid-rijn_40m_v2025_1_refined_BOA*. Het rekenrooster is verfijnd om alle uiterwaardgeulen en oevergeulen met voldoende detail te kunnen schematiseren zodat zij op dezelfde wijze modelmatig goed mee stromen, en daarmee een realistisch of goed hydraulisch resultaat geven. Het verfijnde rooster zorgt er echter wel voor dat de waterstanden in de referentiesituatie lokaal afnemen en dat er bij hoge afvoeren meer water naar de Waal stroomt dan eerder is berekend met het originele grovere rooster. Bij 16.000 m^3/s bedraagt dit verschil 62 m^3/s (~0,5% van de totale Rijnafvoer). Voor meer informatie over uitgangspunten en roosterverfijning bij de D-HYDRO-modellering wordt verwezen naar Bijlagen C en G van Haskoning (2025).

Haskoning heeft zeventien hydraulische simulaties aangeleverd over het afvoerbereik tussen de 800 en 18.000 m^3/s bij Lobith. Deze zijn onderverdeeld in laagwater, hoogwater en morfologische afvoeren. De simulaties voor de morfologische afvoeren wijken af van de overige afvoeren.

Om inzicht te krijgen in de sedimenttransportcoëfficiënt is namelijk een uniforme ruwheid toegepast in het model in plaats van de gekalibreerde ruimtelijk variërende modelruwheid. Voor alle morfologische afvoeren zijn de ruwheden in het zomerbed van alle Rijntakken op Chézy 50,0 $m^{1/2}$ / s gezet. Ditzelfde geldt voor de vaste lagen. Voor de kribben is deze op 40,0 $m^{1/2}$ / s gezet.

Tabel 3-1 Door Haskoning (2025) aangeleverde hydraulische simulaties.

Afvoeren voor laagwater (m^3/s)	**Afvoeren voor hoogwater (m^3/s)** ***Regelwerken staan in de middenstand***	**Afvoeren voor morfologische effectbepaling[3] (m^3/s)**
600*	10.000	1020
800	16.000	1400
1020	17.000	1630
1300	18.000	2020
1500		2500
		3220
		4350
		5800
*Extra afvoerniveau toegevoegd door Deltares		8400

3.1.2 Extra simulaties Deltares

De simulaties van Haskoning (2025) in het voor morfologie relevante afvoerbereik bleken niet goed bruikbaar om de hydraulische effecten en de effecten op de rivierfuncties te kunnen bepalen. Daarom zijn alle “morfologische afvoeren” nogmaals doorgerekend met de gekalibreerde modelruwheden. Zo is voor de effectbepaling gewerkt met een consistente set van afvoeren.

Daarnaast is er voor lage afvoeren nog een aanpassing gedaan ten opzichte van de aangeleverde simulaties. Voor afvoeren kleiner dan 2020 m^3/s is de stuwsturing voor stuw Driel uitgezet. In de berekeningen van Haskoning (2025) stond de stuwsturing uit bij afvoeren kleiner dan 1630 m^3/s in Lobith. Dit is gedaan om het effect van de twee varianten op de afvoerverdeling bij laagwater beter te kunnen duiden. Een dynamische sturing over dit bereik zou de beoordeling van het MGS vertroebelen, omdat het model de opgelegde regels volgt en de stuw daardoor op andere momenten opent of sluit bij veranderende waterstanden bij Lobith en de IJsselkop. De afvoerverdeling verandert dan niet alleen door het MGS, maar ook door een andere werking van de stuwen. In plaats daarvan is stuw Driel in het model gesloten en is een constante afvoer naar de Nederrijn van 30 m^3/s ingesteld. Deze aanpak sluit aan bij de werkwijze die Asselman et al. (2025) beschrijven. Ook is er een extra laag afvoerniveau van 600 m^3/s toegevoegd aan de gebruikte set voor consistentie met voorgaande effectbepalingen zoals het IRM Nulalternatief (Asselman et al., 2022a,b).

Verder zijn ook voor de hoge afvoeren de simulaties opnieuw gedraaid. In de aangeleverde sommen werd gerekend met het originele beno-j19-(vegetatie)ruwheidsbestand (*rijn-beno19_6-v1b_trachytopes.arl*) in plaats van het verfijnde ruwheidsbestand behorend bij het verfijnde rekenrooster.

[3] Voor alle morfologische afvoeren zijn de ruwheden in het zomerbed van alle Rijntakken op Chézy 50,0 $m^{1/2}/s$ gezet in de roughnesscombination. Ditzelfde geldt voor de vaste lagen. Voor de kribben is deze op 40,0 $m^{1/2}/s$ gezet.

Op de locaties waar het rekenrooster is aangepast sloten de ruwheden daarom niet aan op het nieuwe rooster, waardoor een standaardruwheid gebruikt wordt die meestal te laag is. Bij de overige afvoersimulaties is in eerste instantie wel het juiste (vegetatie)ruwheidsbestand gebruikt.

3.1.3 Uitvoering effectbepaling

De rekenresultaten worden beoordeeld op de waterstand op de rivier-as, op de afvoerverdeling over de Rijntakken bij laag- en hoogwater, en op de stroomsnelheden in het zomerbed van de rivier en in de geulen. Bij deze analyses wordt enkel gekeken naar de verschillen tussen de varianten bij een gegeven afvoer. De beschouwde resultaten laten dus enkel de hydraulica bij de huidige rivierbodemligging en klimaat zien. De interactie door verandering in morfologie en het effect van klimaatverandering blijken dus niet uit deze berekende waterstanden. De overschrijdingskans van een bepaalde afvoer kan echter wel veranderen ten gevolgen van de klimaatverandering. Veranderingen in de kans van voorkomen van de verschillende afvoeren en waterstanden (als gevolg van klimaatverandering) worden wel gebruikt in de effectbeoordelingen op de verschillende rivierfuncties.

3.1.4 Aandachtspunten bij interpretatie van de resultaten

In de gebruikte schematisatie zijn meerdere aandachtpunten belangrijk om rekening mee te houden bij de interpretatie van de resultaten:

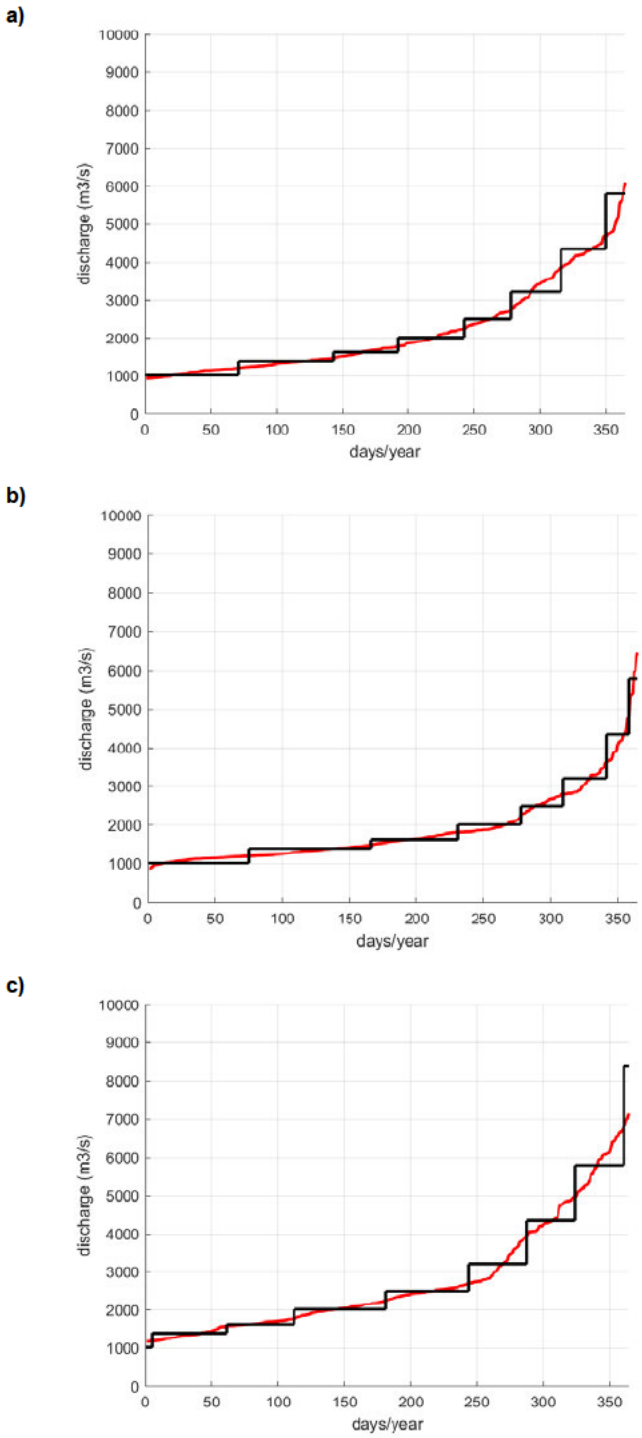
- De meest bovenstrooms gelegen oevergeul (og2 - Millingerwaard) is niet goed geschematiseerd, waardoor deze in het model slecht mee stroomt.
- Bij de bestaande oevergeulen stroomafwaarts van Tiel zijn enkele drempels niet correct aangepast naar OLR, waardoor de oevergeulen soms te vroeg mee stromen, en soms te laat.
- De breedte van de bestaande drempels is niet vergroot (de achterliggende oevergeul is wel verruimd). Meer informatie hierover is te vinden in bijlage A.
- Aangenomen is dat de langsdammen waterdicht zijn. Dit is bij de bestaande langsdammen niet het geval. De poreuze zandkern zorgt voor (beperkte) extra afvoer door de oevergeulen ten opzichte van de modelresultaten (van den Hoek, 2025).
- De roosterverfijning zorgt voor een verschuiving van de afvoerverdeling bij hoogwater ten opzichte van het originele model: Er gaat bij 16.000 m^3/s ongeveer 0,5% meer afvoer naar de Waal dan in het gekalibreerde model.

3.2 Aanpak morfologie

De morfologische effectbepaling moet laten zien of het met de twee concepten, oevergeulen of uiterwaardgeulen, mogelijk is om de transportgradiënt langs de Waal te vereffenen en – als dat niet helemaal lukt – hoeveel sediment dan nog jaarlijks gesuppleerd moet worden. Met het beschikbare morfologische model van de Rijntakken (DVR-model) is het lastig om de uiterwaardgeulen goed te schematiseren. Daarom is besloten om een eerste inschatting van het initiële morfologische effect te baseren op de uitkomsten van de puur hydrodynamische modelberekeningen van Haskoning (2025).

Voor de morfologische effectbepaling is niet alleen de stroomsnelheid bij een gegeven afvoer van belang, maar ook het aantal dagen per jaar dat deze afvoer voorkomt. Net als in het morfologisch model is dit gedaan door het afvoerverloop van een hydrologisch gemiddeld jaar te beschouwen dat rekening houdt met trends in klimaatverandering tot 2050. De hydrodynamische condities voor dit jaar worden benaderd door een geschematiseerde afvoerhydrograaf, die bestaat uit 9 constante afvoeren met een bepaalde duur.

Voor Ruimte voor de Rivier 2.0 zijn van het KNMI'23-klimaatscenario 2050Hd drie hydrografen afgeleid die respectievelijk een gemiddeld, een droog en een nat jaar beschrijven (Figuur 3-2 en Tabel 3-2). Dit is in detail beschreven door Sloff (2024). Voor alle negen afvoerniveaus heeft Haskoning stationaire berekeningen uitgevoerd.



Figuur 3-2 Geschematiseerde afvoerhydrografen op basis van KNMI'23-scenario 2050Hd voor gebruik in RvdR2.0. a) gemiddeld, b) droog, c) nat. Bron: Sloff (2024).

Tabel 3-2. Duur van elk afvoerniveau in de representatieve jaarhydrografen voor RvdR2.0 (uit: Sloff, 2024).

Afvoerniveau (m^3/s)	Droog (dagen)	Gemiddeld (dagen)	Nat (dagen)
1020	75	71	5
1400	91	72	56
1630	65	49	51
2020	47	50	69
2500	31	36	63
3220	33	38	44
4350	16	34	36
5800	7	15	37
8400	0	0	4

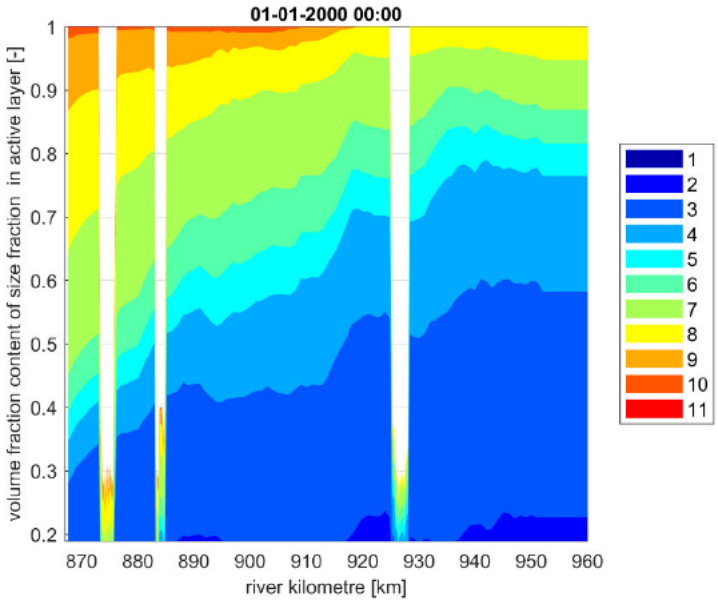
Met de hydraulische rekenresultaten is de sedimenttransportcapaciteit per afvoerniveau bepaald met de transportformule van Meyer-Peter en Müller (1948), die ook in het morfologische DVR-model is gebruikt. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen 11 korrelgroottefracties *i* ("gegradeerd sediment"):

$$S_{MPM,i} = aD_i\sqrt{\Delta g D_i}(\mu\theta_i - \xi_i\theta_c)^b$$
$$\theta_i = \left(\frac{q}{C}\right)^2 \frac{1}{\Delta D_i}$$

waarin

- S = transportcapaciteit [kg/(m s)]
- a = kalibratiefactor
- D_i = karakteristieke korrelgrootte van fractie *i* [m]
- Δ_i = relatieve dichtheid van fractie *i* [-]
- g = valversnelling [m/s^2]
- μ = vormweerstandsfactor [-]
- θ_i = actuele Shieldsparameter voor fractie *i* [-]
- θ_c = kritieke Shieldsparameter
- ξ_i = hiding & exposure factor voor fractie *i* [-]
- b = exponent [-]
- q = stroomsnelheid [m/s]
- C = Chézy-ruwheidscoëfficiënt [$m^{1/2}/s$]

De instellingen voor de sedimenttransportformule en de sedimentsamenstelling langs de Waal (Figuur 3-3) zijn overgenomen uit het morfologisch model (DVR-model), op een uitzondering na: bij de kalibratie van het DVR-model is op de Midden-Waal een ruimtelijk variabele ruwheidscoëfficiënt en vormweerstandsfactor toegepast voor de laatste fijnafstemming. Zonder deze aanpassing overschat het model de gradiënt in sedimenttransport en daardoor ook de erosietrend op de Midden-Waal. De implementatie daarvan in de D-HYDRO-berekeningen was te moeilijk om in de korte beschikbare tijd mee te nemen.

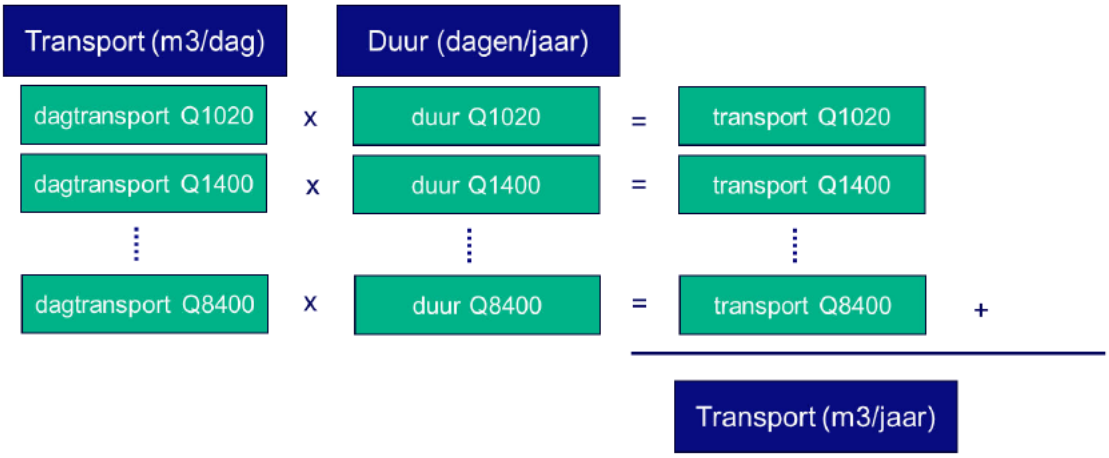


Figuur 3-3 Sedimentsamenstelling uit het DVR-model. De kleurschaal toont de verdeling in sedimentklassen (zeefklassen) zoals gedefinieerd in Tabel 3-3.

Tabel 3-3 Sedimentklassen toegepast voor definitie van de sedimentsamenstelling

Fractie	Minimum diameter (m)	Maximum diameter (m)
Sediment1	0,000063	0,00025
Sediment2	0,00025	0,0005
Sediment3	0,0005	0,001
Sediment4	0,001	0,002
Sediment5	0,002	0,0028
Sediment6	0,0028	0,004
Sediment7	0,004	0,008
Sediment8	0,008	0,016
Sediment9	0,016	0,0315
Sediment10	0,0315	0,063
Sediment11	0,063	0,125

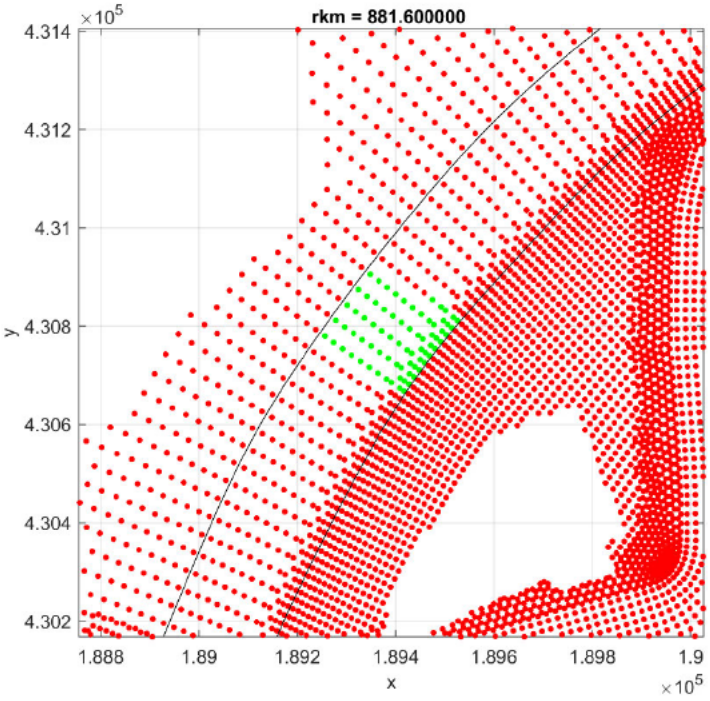
De transportcapaciteit per fractie is vervolgens opgeteld om tot de totale transportcapaciteit te komen en omgerekend naar een transport in [m³/dag]. Deze transportcapaciteit wordt vertaald naar een gemiddeld jaartransport door te vermenigvuldigen met de duur per afvoerniveau uit de representatieve jaarhydrograaf, zoals te zien in Figuur 3-4.



Figuur 3-4 Bepalen van de transportcapaciteit per jaar voor de representatieve hydrograaf.

Op de hierboven beschreven manier is het jaartransport bepaald voor de huidige situatie (referentie) en de schematisaties met OG of UG. Een vergelijking van het verloop van deze jaartransporten langs de Waal laat zien tot hoe ver de twee varianten de transportgradiënt kunnen terugbrengen. Hiervoor is de gemiddelde afvoerhydrograaf gebruikt. Om de gevoeligheid voor een veranderend klimaat inzichtelijk te maken zijn de berekeningen herhaald met de droge en natte afvoerhydrograaf.

De berekeningen zijn uitgevoerd op een resolutie van 200 m in langsrichting. De stroomsnelheden en de sedimentsamenstelling zijn daarvoor gemiddeld over vakken van 200 m zoals getoond in Figuur 3-5.



Figuur 3-5 Voorbeeld van een 200 m lang vak langs de Waal. Met groene stippen gemarkeerde roostercellen worden gebruikt voor de middeling van de stroomsnelheid en de sedimentsamenstelling voor het vak rond rkm 881,6. Deze rivierkilometer ligt in het midden van het vak.

3.3 Aanpak effectbepaling rivierfuncties

Voor de effectbepaling van de rivierfuncties zijn geen nieuwe berekeningen uitgevoerd in deze studie. Om toch het effect van het MGS-concept inzichtelijk te maken wordt gebruik gemaakt van al eerder uitgevoerde studies en de effectbepaling voor het nulalternatief van IRM (Asselman et al., 2022a,b). Hierin is geanalyseerd hoe doorgaande rivierbodemerosie tot 2050 en ophoging van de bodem tot het niveau rond het jaar 2000 de rivierfuncties beïnvloedt. Uit deze studie blijkt dat de bodemverandering merkbaar bijdraagt aan veranderingen in waterstanden en afvoer en daarmee een positief of negatief effect heeft op de rivierfuncties. Hieronder is per rivierfuncties kort beschreven welke indicatoren zijn behandeld.

3.3.1 Natuur

Op basis van veranderingen in waterstanden bij een bepaalde voorkomensfrequentie is ingeschat of en in welke mate dit de overstromingsduren van uiterwaarden beïnvloedt. Het effect op grondwaterstanden wordt geduid op basis van eerder uitgevoerde berekeningen. Daarnaast worden stroomsnelheden ruimtelijk in beeld gebracht voor een beoordeling van de effecten op macrofauna. Ook worden waterdieptekaarten gebruikt om het moment van droogvallen van geulen in beeld te brengen.

3.3.2 Zoetwaterbeschikbaarheid

Voor het effect van een meergeulensysteem op de zoetwaterbeschikbaarheid is gekeken naar de afvoerverdeling bij laagwater en de daarmee samenhangende vullingsgraad van het IJsselmeer en watertekorten in Noord-Nederland. Op basis van eerdere berekeningen is ook het effect op verzilting in West-Nederland geschat. Voor het beoordelen van de hierboven genoemde indicatoren is gebruik gemaakt van de resultaten van de hydraulische berekeningen uit hoofdstuk 4. In de effectbepaling zijn geen aanvullende berekeningen uitgevoerd, maar zijn de effecten van het MGS gebaseerd op de eerder uitgevoerde effectbepaling in het IRM-nulalternatief (Asselman et al., 2022a,b) en de studies naar de maakbaarheid van de gewenste afvoerverdeling bij laagwater (Asselman et al., 2025; Gensen et al., 2025).

In het IRM-nulalternatief zijn de indicatoren gekwantificeerd voor de huidige situatie (Ref), de situatie met een veranderde rivierbodemligging (2000 en 2050) en de situatie volgens Deltascenario Stoom2050. Die resultaten zijn in voorliggende studie gebruikt om aan te kunnen geven in welke mate het MGS ook in staat is om negatieve effecten van klimaatverandering te compenseren.

3.3.3 Bevaarbaarheid

De effecten van het meergeulensysteem op de bevaarbaarheid van de rivieren zijn bepaald volgens de methode voor het IRM-nulaternatief (Asselman et al., 2022a,b). De methode is aangevuld met een beschouwing op de te verwachten dwarsstroming. De resultaten focussen op de verschillen tussen de twee meergeulensysteemvarianten en de huidige referentiesituatie. Ook is aan de hand van het klimaatscenario WHdry2050 een doorkijk gemaakt naar de effecten in de toekomst.

De toestand van het watersysteem is beoordeeld via de resultaten van de hydraulische berekeningen uit hoofdstuk 4. Op basis van deze resultaten worden de volgende aspecten bepaald voor ieder punt langs de Rijntakken:

- Waterdiepte bij een gegeven rivierafvoer
  De waterdiepte van een vaarweg, wordt beoordeeld met een methode die lijkt op de bepaling van de operationele Minst Gepeilde Diepte (MGD). Dit betekent dat het meest ondiepe punt binnen de vaargeul bepaald wordt per rivierkilometer.

In dit hoofdstuk worden eerst de berekende waterdieptes gegeven bij de Overeengekomen Lage Afvoer (OLA)[4] in het huidige klimaat: 1020 m^3/s. Daarna wordt ingegaan op het effect van klimaatverandering op de OLA en op het effect daarvan op de beschikbare waterdiepte.

- Beschikbaarheid van de gewenste waterdiepte
  Door combinatie van de waterdiepte per rivierafvoer en de onderschrijdingsduur van deze afvoeren volgens de KNMI-klimaatscenario's, is voor ieder punt in de rivier bepaald hoeveel dagen per jaar de minimaal gewenste waterdiepte gemiddeld wordt onderschreden.

  De gewenste waterdiepte is gebaseerd op nationale en internationale eisen (zoals vastgesteld door de Centrale Commissie voor de Rijnvaart, CCR). Een volledig overzicht van deze eisen staat in bijlage E van Asselman et al. (2022a). Voor de Rijntakken kan dit vereenvoudigd worden naar een minimale waterdiepte bij OLA van 2,8 m op de Boven-Rijn, de Waal, het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn-Lek, en van 2,5 m op de IJssel.

- Bereikbaarheid van havens, kades en sluizen
  De bereikbaarheid van havens, kades en sluizen wordt vastgesteld volgens een grotendeels vergelijkbare methode. Hierbij wordt het aantal dagen onderschrijding van kritieke waterstandsniveaus en waterdieptes boven sluisdrempels berekend.

3.3.4 Waterveiligheid

Om het effect van een meergeulensysteem op waterveiligheid te bepalen is gebruik gemaakt van de hydraulische resultaten uit hoofdstuk 4. Voor waterveiligheid kijken we naar de afvoerverdeling bij hoogwater, verandering in hoogwaterstanden en daarmee samenhangend de dijkversterkingsopgave en het verwachte effect op de groei van ijsdammen. Naast effectbepaling van het IRM-nulalternatief (Asselman et al., 2022a,b) is ook gebruik gemaakt van de bevindingen uit de studie naar de beoogde afvoerverdeling bij hoogwater (De Bake et al., 2025).

In het IRM-nulalternatief is de opgave voor de dijkversterking bepaald aan de hand van Qh-relaties. Deze zijn gecombineerd met informatie over terugkeertijden van verschillende afvoeren te Lobith (zogenaamde QT-relaties). Dit is gedaan voor de zichtjaren 2000, 2018 en 2050. Deze informatie is gebruikt in OKADER om de dijkversterkingsopgave in de tijd te bepalen en om de dijkversterkingskosten te berekenen voor drie bodemligging-situaties. Door de veranderingen in waterstand als gevolg van het MGS te vergelijken met de veranderingen die ontstaan door een andere bodemligging (IRM-nulalternatief), kunnen we inzicht krijgen in de effecten voor de dijkversterkingsopgave.

[4] De OLA wordt in overleg met Centrale Commissie voor de Rijnvaart (CCR) door RWS vastgesteld en komt overeen met de afvoer die gemiddeld 20 ijsvrije dagen per jaar wordt onderschreden.

4 Effect MGS op hydraulica

Weten hoe een meergeulensysteem de hydraulica beïnvloedt is een belangrijke bouwsteen voor de beoordeling van het functioneren van het riviersysteem. Voor de hydraulische effectbepaling is gekeken naar de mate waarin de twee doorgerekende meergeulensysteem-varianten de afvoerverdeling en de waterstanden beïnvloeden. Ook is gekeken naar de stroomsnelheden in de hoofdgeul en in de oever- en uiterwaardgeulen.

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van de hydraulische modelberekeningen en geeft duiding aan deze resultaten. Aan de resultaten wordt nog geen waardeoordeel toegekend in de zin dat we in dit hoofdstuk nog niet ingaan op de vraag of de veranderingen tot problemen leiden voor de morfologie of de rivierfuncties. Dit gebeurt pas in de volgende hoofdstukken.

4.1 Afvoerverdeling

Het effect van de twee doorgerekende meergeulensysteem-varianten op de afvoerverdeling is bepaald voor 17 stationaire afvoeren tussen de 600 en 18.000 m^3/s te Lobith. De absolute afvoer over de riviertakken is weergegeven in Tabel 4-1 en de relatieve afvoer in Figuur 4-1 en Figuur 4-2. Aanvullende figuren zijn te vinden in bijlage B.

Eerst beschrijven we het algemene beeld van het effect van de varianten op de afvoerverdeling en vervolgens beschrijven we voor lage, middelhoge en hoge afvoeren de meest karakteristieke veranderingen.

4.1.1 Algemeen beeld

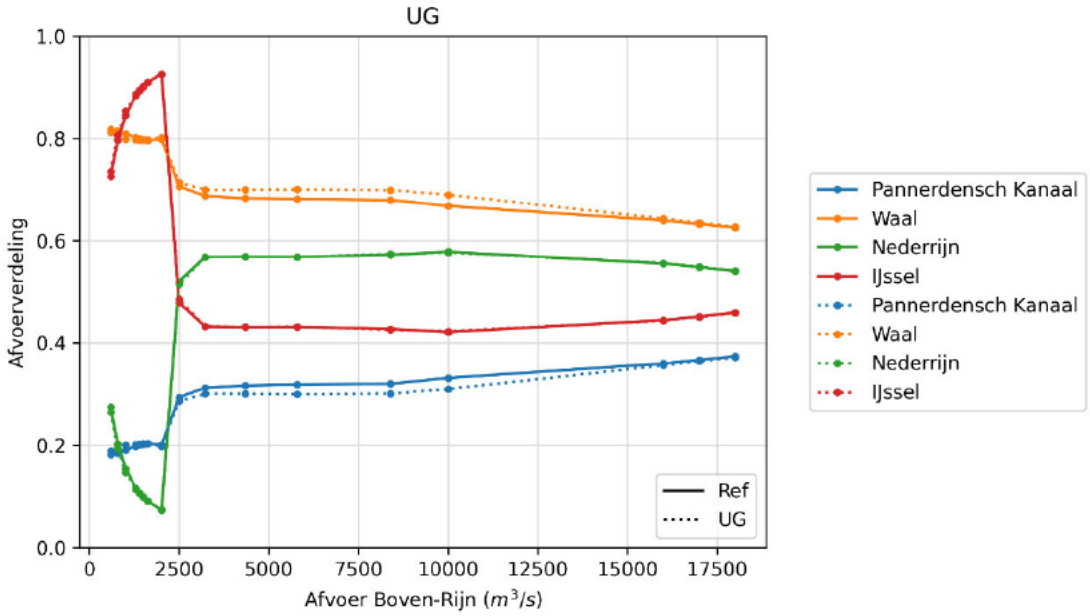
Het versmallen van het zomerbed bij lage afvoeren en het verruimen voor hoge afvoeren hebben invloed op de afvoerverdeling bij de splitsingspunten. Het algemene beeld is zeer vergelijkbaar bij beide varianten. Het versmallen van het zomerbed, door langsdammen of kribverlenging, zorgt ervoor dat bij lage afvoeren minder water naar de Waal stroomt. De versmalling zorgt immers voor hogere waterstanden op de Waal. Bij middelhoge en hoge afvoeren (vanaf 2020 m^3/s) zien we dat dit omslaat en er juist meer water richting de Waal stroomt. Dit komt doordat de oevergeulen en uiterwaardgeulen vanaf deze afvoer volledig mee stromen en zo de afvoercapaciteit op de Waal vergroten. Dit resulteert in een waterstandsverlaging waardoor de afvoer toeneemt. Dit effect blijft ook bij zeer hoge afvoeren (≥10.000 m^3/s) zichtbaar. Bij zeer hoge afvoeren is de verschuiving bij de oevergeulen groter dan bij de uiterwaardgeulen. Dit wordt verder toegelicht in paragraaf 4.1.3.

De verschuiving in afvoerverdeling ten opzichte van de huidige situatie heeft ook gevolgen voor het Pannerdensch Kanaal (PK) dat overgaat in de Nederrijn (NR) en de IJssel (IJ). Bij afvoeren tot en met 1.020 m^3/s (de overeengekomen lage afvoer, OLA[5]) neemt de afvoer naar het Pannerdensch Kanaal toe. Bij iets hogere afvoeren verschuift de verdeling weer richting de huidige situatie alvorens de afvoer naar het Pannerdensch Kanaal boven 2020 m^3/s bij Lobith juist lager wordt. Doordat in de simulaties stuw Driel tot en met een Lobith-afvoer van 2020 m^3/s dicht staat zal de extra afvoer door het Pannerdensch Kanaal vooral naar de IJssel gaan. In werkelijkheid, wanneer de stuwboog bij Driel vanaf een afvoer van 1590 m^3/s langzaam opent, zal er ook meer water richting de Nederrijn-Lek stromen dan nu bepaald is (en dus minder naar de IJssel).

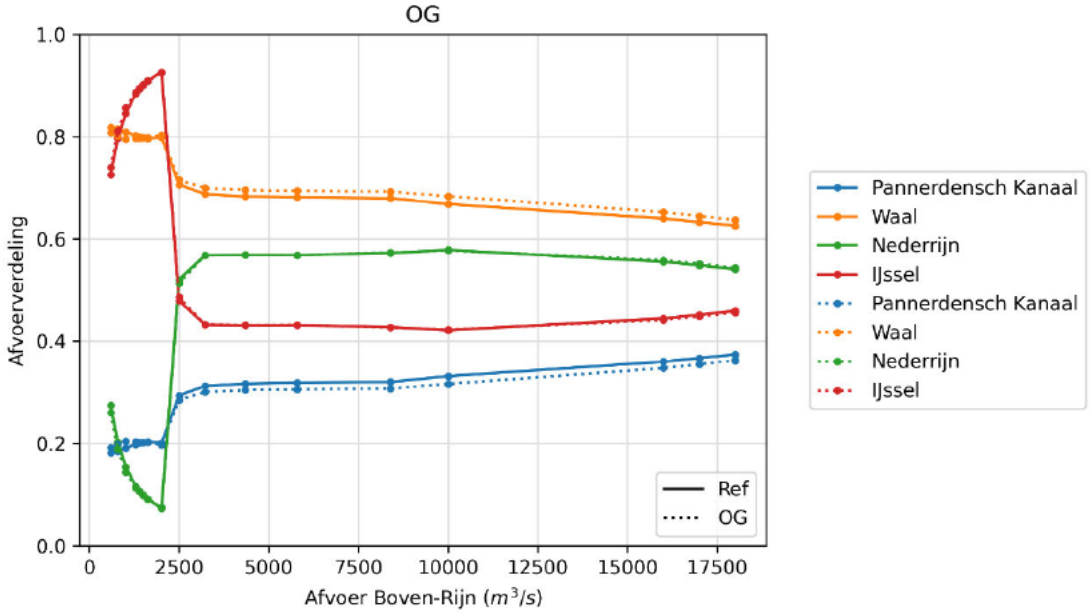
[5] De OLA wordt in overleg met de Centrale Commissie voor de Rijnvaart (CCR) door RWS vastgesteld en komt overeen met de afvoer die gemiddeld 20 ijsvrije dagen per jaar wordt onderschreden.

Tabel 4-1 Afvoer over de Waal, Nederrijn en IJssel voor de Referentie, Uiterwaardgeul- en Oevergeulvariant. Afvoeren die meer dan 1% van de referentie afwijken zijn gekleurd in blauw (afname) en oranje (toename). Verschillen groter dan 10 m^3/s tussen de twee varianten zijn dik gedrukt weergegeven.

	Waal			Nederrijn			IJssel		
Afvoer Lobith (m^3/s)	**Ref**	**UG**	**OG**	**Ref**	**UG**	**OG**	**Ref**	**UG**	**OG**
600	491	487	485	30	30	30	79	83	85
800	652	645	642	30	30	30	118	125	128
1020	825	815	811	30	30	30	165	175	179
1300	1042	1037	1036	30	30	30	228	233	234
1400	1119	1116	1116	30	30	30	251	254	254
1500	1197	1195	1196	30	30	30	273	275	274
1630	1298	1299	1300	30	30	30	302	301	300
2020	1614	1620	1621	30	30	30	376	370	369
2500	1766	1785	1788	382	367	365	352	347	346
3220	2214	2252	2251	571	550	550	435	418	419
4350	2971	**3043**	3026	785	744	**753**	596	564	**572**
5800	3951	**4062**	4027	1053	989	**1009**	800	752	**767**
8400	5706	**5872**	5816	1542	1453	**1483**	1152	1079	**1105**
10000	6681	**6898**	6834	1922	1792	**1831**	1401	1314	**1339**
16000	10240	10295	**10438**	3203	**3176**	3109	2564	**2534**	2460
17000	10760	10800	**10959**	3426	**3407**	3334	2820	**2798**	2713
18000	11276	11309	**11480**	3645	**3631**	3556	3098	**3080**	2983



Figuur 4-1 Verdeling van de afvoer bij de Pannerdensche Kop en IJsselkop voor de uiterwaardgeulen-variant.



Figuur 4-2 Verdeling van de afvoer bij de Pannerdensche Kop en IJsselkop voor de oevergeulen-variant.

4.1.2 Lage afvoeren (≤2.020 m^3/s)

Beide varianten versmallen het zomerbed met 30 meter wat resulteert in hogere waterstanden dan in de huidige situatie (Referentie). Wanneer de waterstand op de Waal ten opzichte van het Pannerdensch Kanaal relatief omhoog gaat zorgt dit voor minder afvoer naar de Waal. De ordegrootte waarmee de afvoerverdeling verschuift is vergelijkbaar voor beide varianten, zie Tabel 4-1. Het grootste absolute verschil met de referentie zien we bij een afvoer van 1.020 m^3/s (OLA) en bedraagt 10 en 14 m^3/s voor respectievelijk de uiterwaardgeulen en oevergeulen. Deze afvoer stroomt in noordelijke richting naar de IJssel. Het maximale verschil (minder naar de Waal, meer naar het Pannerdensch Kanaal) zien we bij OLA omdat de inlaatdrempels van de MGS-varianten gedimensioneerd zijn op de overeengekomen lage rivierstand (OLR). Bij afvoeren boven OLA gaan de geulen mee stromen, waardoor waterstanden dalen en de Waal weer meer afvoer gaat trekken ten koste van het Pannerdensch Kanaal.

In de gebruikte schematisatie zijn de inlaatdrempels gedimensioneerd op OLR van de referentiesom en toegepast op de twee MGS-varianten. Echter, door het opstuwende effect van de langsdammen en de verlengde kribben stromen de meeste geulen nu al in bij een iets lagere afvoer dan OLA (de OLR berekend in de referentie wordt bij het MGS al bij lagere afvoeren bereikt). Wanneer de inlaatdrempels gedimensioneerd zijn op de OLR behorend bij de MGS-variant zal het effect op de afvoerverdeling bij OLA groter zijn dan dat we nu zien.

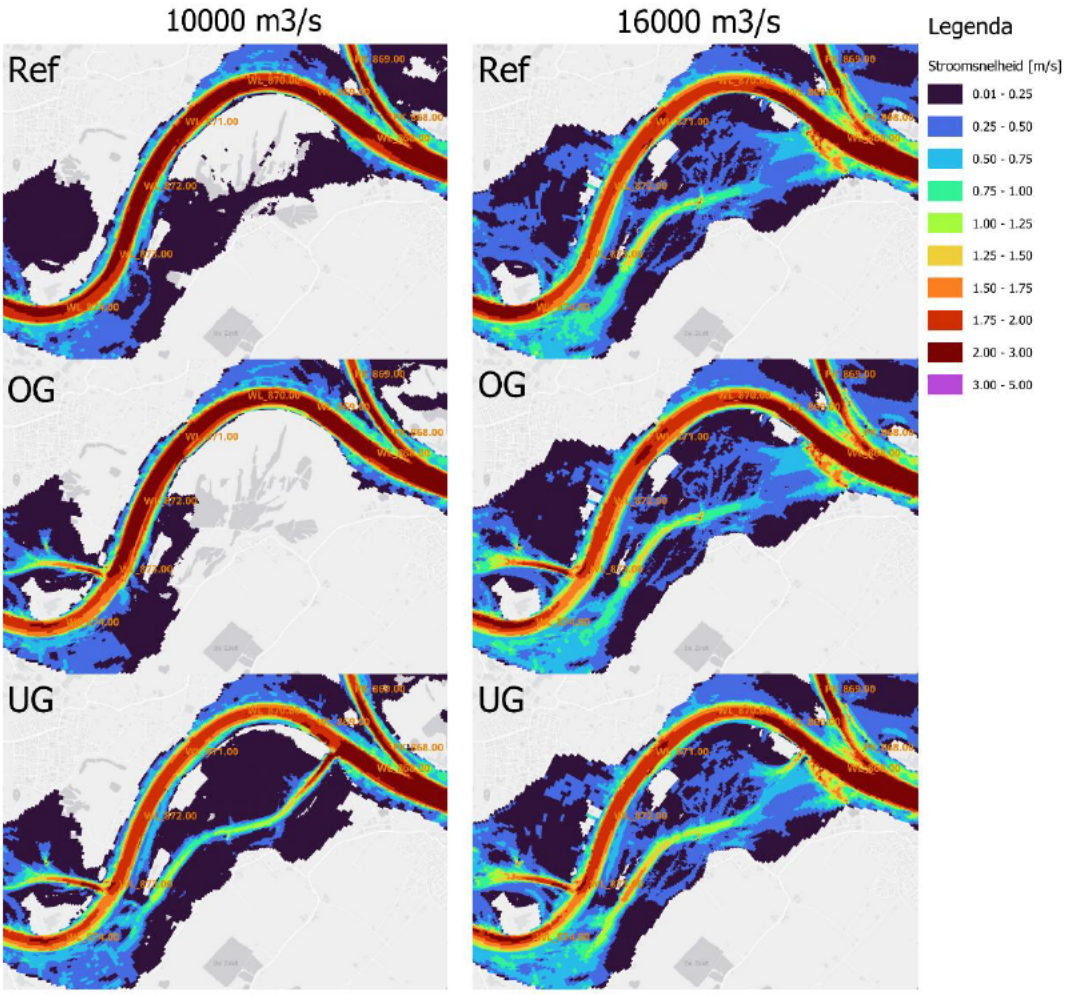
Bij de afvoeren variërend van 1.300 tot ruim 1.600 m^3/s is het verloop van de afvoerverdeling over de splitsingspunten zeer vergelijkbaar met de huidige situatie (Figuur 4-1 en Figuur 4-2). De grote verandering in afvoerverdeling die optreedt bij een afvoer van 2020 m^3/s (zichtbaar op alle riviertakken) wordt veroorzaakt door het opengaan van de vizierbogen van stuw Driel. Er gaat hierdoor relatief meer water naar het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn. In werkelijkheid zal deze verschuiving geleidelijker zijn wanneer het stuwprogramma bij een Lobithafvoer van 1590 m^3/s al in werking treedt.

4.1.3 Middelhoge en hoge afvoeren (>2020 m^3/s)

Bij een afvoer boven de 2020 m^3/s gaat er met de MGS-varianten meer afvoer naar de Waal dan in de referentiesituatie. Bij afvoeren tot 3220 m^3/s laten de UG- en de OG-variant nagenoeg hetzelfde effect zien.

Bij de middelhoge afvoeren (4350 - 8400 m^3/s) onstaat er een verschil tussen de twee varianten. De variant met uiterwaardgeulen trekt tussen de 20 – 55 m^3/s meer afvoer naar de Waal dan de oevergeulenvariant. Dit verschil wordt veroorzaakt door het eerder instromen van de uiterwaarden. Met het aanleggen van uiterwaardgeulen worden de zomerkades doorgestoken. Hierdoor stroomt er al bij een lagere afvoer water door de uiterwaard, waardoor de waterstand daalt. Ook bij de afvoer van 10.000 m^3/s is dit effect nog zichtbaar, maar kleiner dan bij 8400 m^3/s. Dit komt doordat bij deze afvoer de uiterwaarden in de oevergeulenvariant ook volop mee stromen.

Boven 10.000 m^3/s draait dit effect om. De variant met oevergeulen trekt meer afvoer naar de Waal dan de uiterwaardgeulenvariant. De afvoerverdeling van de uiterwaardgeulenvariant is vergelijkbaar met de huidige situatie (Tabel 4-1). De verschuiving in afvoerverdeling is toe te schrijven aan het eerder mee stromen van de uiterwaarden in de UG-variant. In Figuur 4-3 is te zien dat bij 10.000 m^3/s de Millingerwaard in de referentie nog niet mee stroomt. De UG-variant heeft een groot effect op de afvoerverdeling tot en met 10.000 m^3/s omdat de Millingerwaard daarin wel mee stroomt. Bij 16.000 m^3/s stroomt deze uiterwaard ook mee in de referentie en de OG-variant, waardoor de afvoeren naar de Waal relatief gezien meer toenemen dan in de UG-variant. Daarnaast zien we in de OG-variant hoge stroomsnelheden over een groter oppervlak van het zomerbed dan in de UG-variant, met name in de oeverzone.



Figuur 4-3. Stroomsnelheden rond het splitsingspunt tussen Waal en het Pannerdensch kanaal bij 10.000 en 16.000 m^3/s.

Met de beschikbare data is geen eenduidig antwoord te geven op de vraag wat het verschil tussen de UG-variant en de OG-variant bij afvoeren van 16.000 m^3/s of hoger veroorzaakt. Dit verschil zou toegewezen kunnen worden aan de effectiviteit van uiterwaardgeulen, de verlengde (maar niet verlaagde) kribben in de UG-variant of de manier waarop de uiterwaardgeulen geschematiseerd zijn. Hiervoor zouden extra simulaties gedaan moeten worden om één voor één het effect van de doorgevoerde maatregelen te beschouwen. Wel kunnen we aan de hand van de resultaten de volgende mogelijke oorzaken onderscheiden:

- Oevergeulen hebben over het algemeen een groter verhang dan de uiterwaardgeulen en trekken daardoor meer debiet, ook bij zeer hoge afvoeren. Dit verlaagt de waterstanden.
- Bij de uiterwaardgeulenvariant is de versmalling gerealiseerd met kribverlenging. Mogelijk dat de kribverlenging, zonder verlaging, bij deze afvoeren de waterstand opstuwt. Dit kan onderzocht worden door een model te draaien met alleen de kribverlengingsmaatregel.
- Bij de UG-variant vindt rond de Millingerwaard minder consequent verruiming in de langsrichting plaats dan in de OG-variant. Het benedenstroomse deel van de uiterwaardgeul in de Millingerwaard bestaat namelijk al en wordt nauwelijks extra verruimd.

4.2 Waterstanden

De waterstanden worden beïnvloed door de genomen maatregelen. Om deze invloeden te begrijpen, vergelijken we de twee varianten met de referentiesituatie. Omdat het effect sterk afhankelijk is van de rivierafvoer bespreken we de effecten bij lage, middelhoge en hoge afvoeren. De waterstandsverschillen zijn voor alle riviertakken als *heatmaps* weergegeven in Figuur 4-4 (uiterwaardgeulen) en Figuur 4-5 (oevergeulen), en voor de Waal ook als langsprofiel voor beide varianten (Figuur 4-6 en Figuur 4-7). De verschillen tussen de varianten worden besproken in paragraaf 4.2.3.

4.2.1 Lage afvoeren (≤2.020 m^3/s)

Op vrijwel alle riviertakken neemt de waterstand tot en met een afvoer van 1320 m^3/s toe. Uitzonderingen hierop zijn de Beneden-Waal en de stuwpanden op de Nederrijn-Lek. De waterstand neemt het meest toe bij een afvoer van 1.020 m^3/s (OLA). Bij deze afvoer stromen de oever- en uiterwaardgeulen nog niet (volledig) mee waardoor het water nog grotendeels door het versmalde zomerbed stroomt. Het moment van instromen en de bijbehorende stroomsnelheden in alle uiterwaard- en oevergeulen zijn weergegeven in Figuur 4-14 en Figuur 4-16. Over het algemeen stromen de oevergeulen al bij een lagere afvoer mee dan de uiterwaardgeulen. Dit komt doordat de versmalling met langsdammen in het model meer opstuwing geeft dan versmalling met kribverlenging. Bij OLA neemt de waterstand op de Midden-Waal maximaal met 20 cm toe, waar dit voor de uiterwaardgeulen ongeveer 12 cm is. Alleen op de Beneden-Waal is een (zeer beperkte) waterstandsdaling van 1-2 cm te zien. Op dit traject zijn geen maatregelen toegepast en de Waalafvoer is tijdens deze lage afvoeren wat lager. De waterstand op de Boven- en Midden-IJssel (tot Deventer, rkm 944) neemt met zo'n 15 en 10 cm toe. Op de Beneden-IJssel is het verschil kleiner.

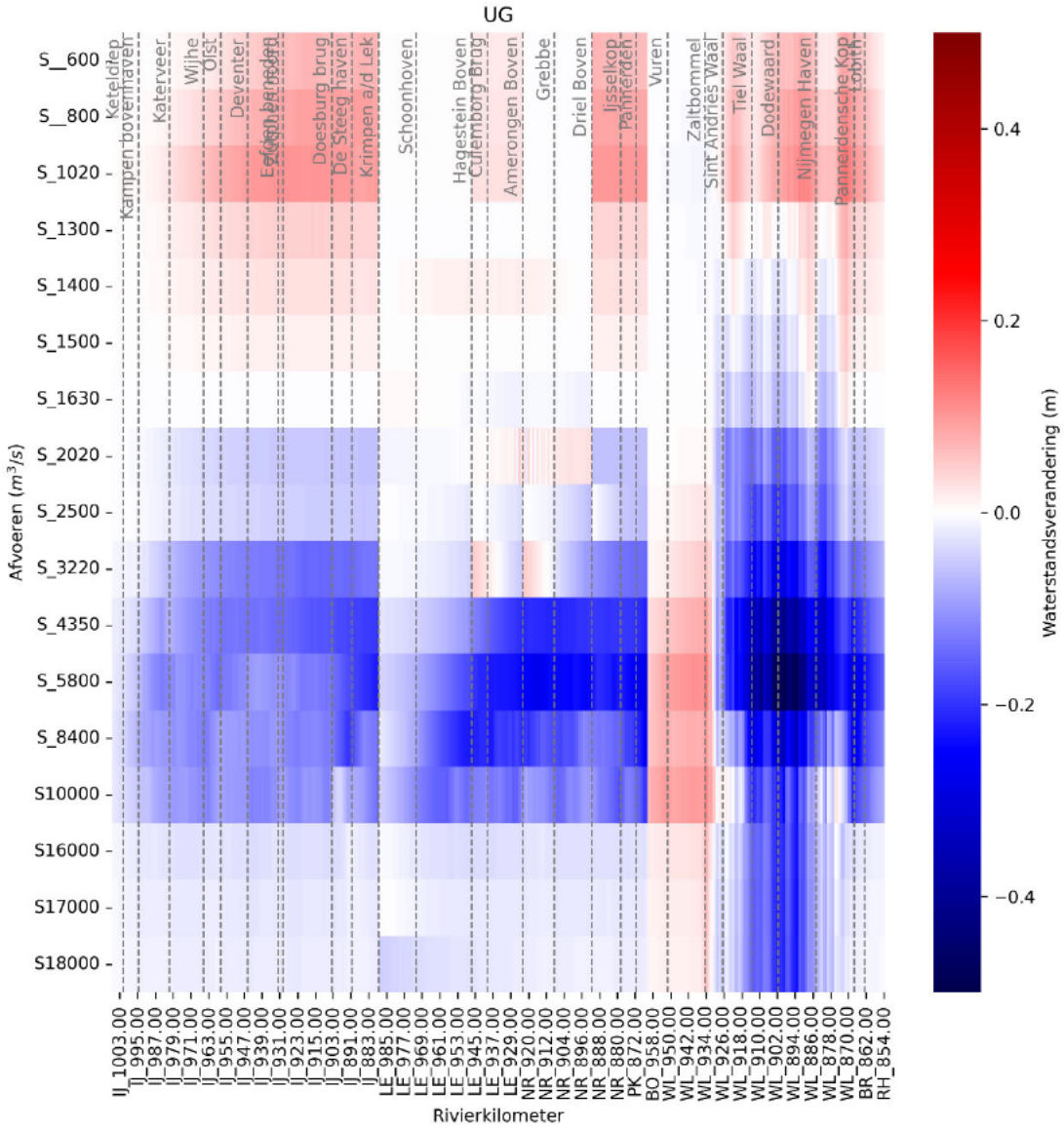
Bij toenemende afvoeren stromen de geulen steeds meer mee wat resulteert in een vergelijkbare of lagere waterstand dan in de huidige (referentie)situatie. Bij een afvoer van 2.020 m^3/s zien we op alle takken een waterstandsverlaging ten opzichte van de referentiesituatie. De grootste waterstandsdalingen, tot zo'n 25 cm (OG) en 15 cm (UG), zijn terug te vinden op de Waal tussen rkm 878 en 926. Alleen op de Beneden-Waal is sprake van een waterstandsstijging doordat hier geen maatregelen zijn geïmplementeerd. De waterstand neemt hier toe als gevolg van de verschuiving van de afvoerverdeling (meer naar de Waal, minder naar Pannerdensch Kanaal). Ook op de IJssel wordt de waterstand direct beïnvloed door de afvoerverdeling. Aangezien bij deze afvoeren de afvoer naar de IJssel afneemt neemt ook de waterstand af met zo'n 5 tot 8 cm.

4.2.2 Middelhoge en hoge afvoeren (>2.020 m^3/s)

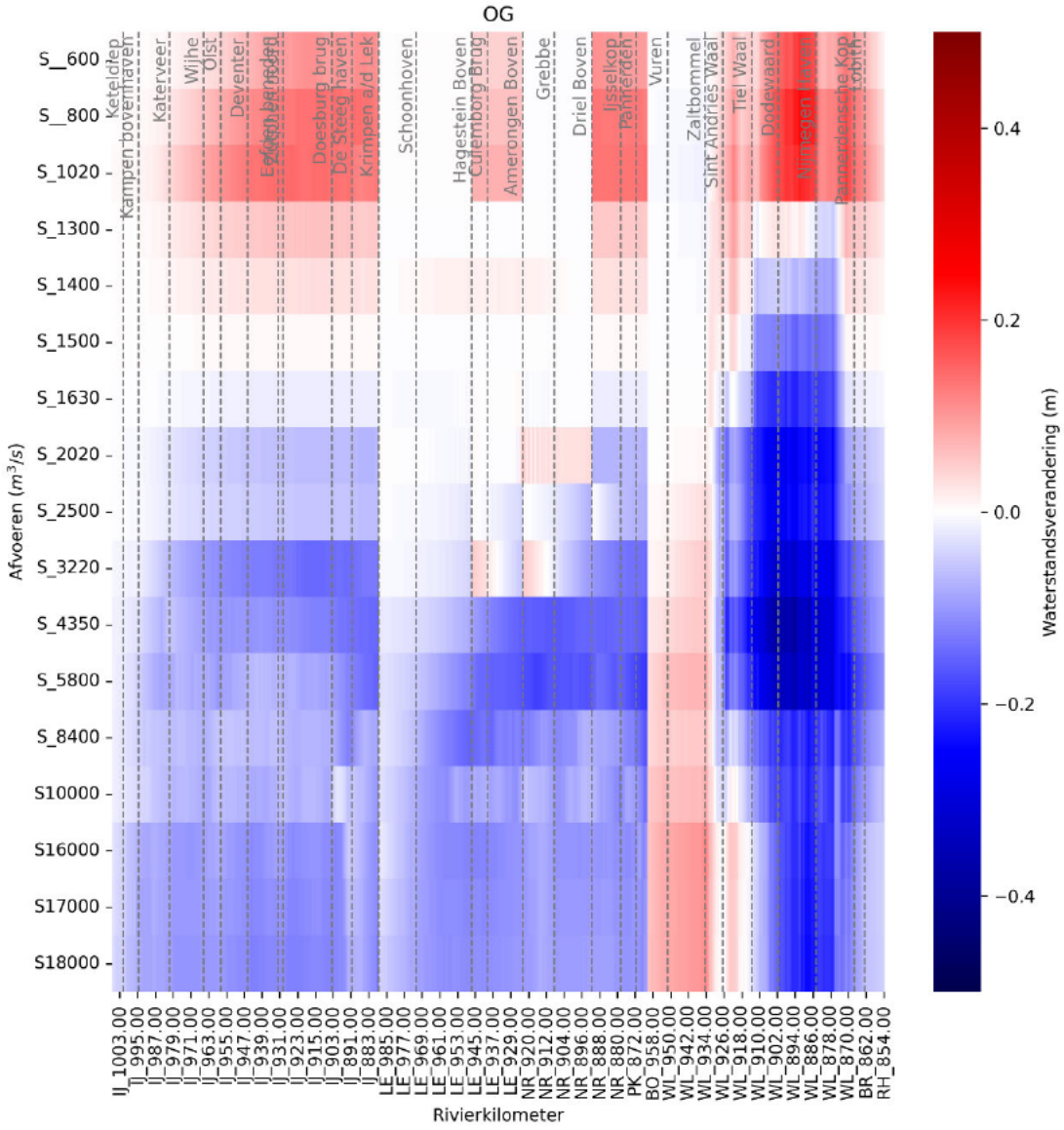
Bij toenemende afvoer daalt de waterstand steeds meer ten opzichte van de referentie. Bij deze afvoeren stromen de uiterwaard- en oevergeulen allemaal mee. De grootste effecten zijn terug te zien op de Midden-Waal bij afvoeren tussen 4350 en 8400 m^3/s. Bij een afvoer van 5800 m^3/s is de waterstandsdaling het grootste: 50 cm voor de uiterwaardgeulvariant en 35 cm voor de oevergeulvariant (tussen rkm 890 en 904). Ook op de Nederrijn-Lek en de IJssel zien we over de gehele loop een waterstandsdaling welke het grootste is op de bovenloop van deze riviertakken. De waterstandsdaling ligt tussen 15 en 25 cm. Bij een toenemende afvoer neemt het waterstand verlagende effect weer af. Dit kan verklaard worden doordat vanaf een afvoer van 6000 m^3/s de uiterwaarden op de riviertakken grotendeels mee stromen. Een toename van de afvoer leidt dan tot een minder sterke toename van de waterstand[6]. Tegelijkertijd blijft de waterstand op de Beneden-Waal toenemen tot maximaal 10 cm nabij Zaltbommel.

[6] De Qh-relatie is bij hoge afvoeren wanneer de uiterwaarden mee stromen vlakker dan in het afvoerbereik waarbij de stroming beperkt is tot het zomerbed.

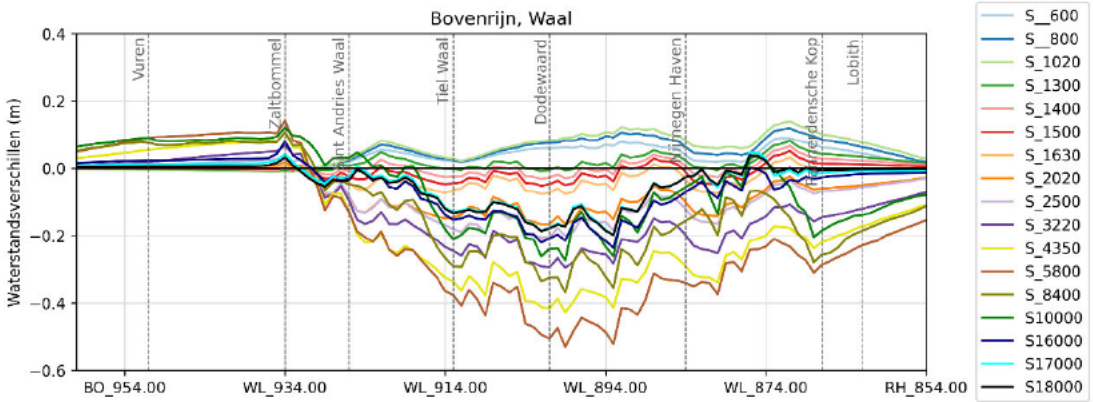
Bij (extreem) hoge afvoeren is op de Waal nog steeds een waterstandsdaling zichtbaar, maar is het effect kleiner dan bij de midden-afvoeren. Voor de uiterwaardgeulvariant neemt het waterstand verlagend effect bij afvoeren groter dan 10.000 m^3/s op de Waal af. In de waterstand is terug te zien dat deze met maximaal 5 cm toeneemt ter hoogte van rkm 873 tot 877 (Waalbochten) ten opzichte van de referentiesituatie. Bij deze extreem hoge afvoeren stroomt er in de simulaties ten opzichte van de oevergeulenvariant meer afvoer naar het Pannerdensch Kanaal en minder naar de Waal. Dit resulteert in hogere waterstanden op de Nederrijn-Lek en de IJssel bij de uiterwaardgeulenvariant dan bij de oevergeulenvariant. Op de Midden-Waal is de waterstandsdaling wel weer aanwezig. Deze bedraagt maximaal 20 cm. Bij de oevergeul-variant blijft het verlagende effect vrij constant naarmate de afvoer toeneemt (ook rond -20 cm).



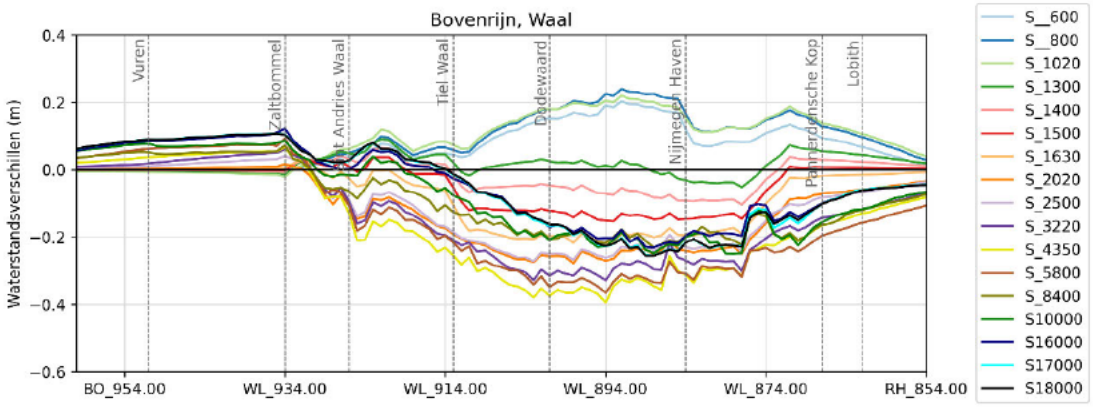
Figuur 4-4 Waterstandsverschillen voor alle riviertakken tussen de uiterwaardgeulenvariant en de referentiesituatie. Rood betekent een waterstandsstijging ten opzichte van de referentie en blauw een waterstandsdaling. De geulen stromen iets te vroeg in door dimensionering van de inlaatdrempel op OLR – Referentie (anders zou de overgang van rode naar blauwe kleuren bij iets hogere afvoeren plaatsvinden).



Figuur 4-5 Waterstandsverschillen voor alle riviertakken tussen de oevergeulenvariant en de referentiesituatie. Rood betekent een waterstandsstijging ten opzichte van de referentie en blauw een waterstandsdaling. De geulen stromen iets te vroeg in door dimensionering van de inlaatdrempel op OLR – Referentie (anders zou de overgang van rode naar blauwe kleuren bij iets hogere afvoeren plaatsvinden).



Figuur 4-6 Waterstandsverschillen voor de Boven-Rijn en de Waal voor de uiterwaardgeulenvariant.



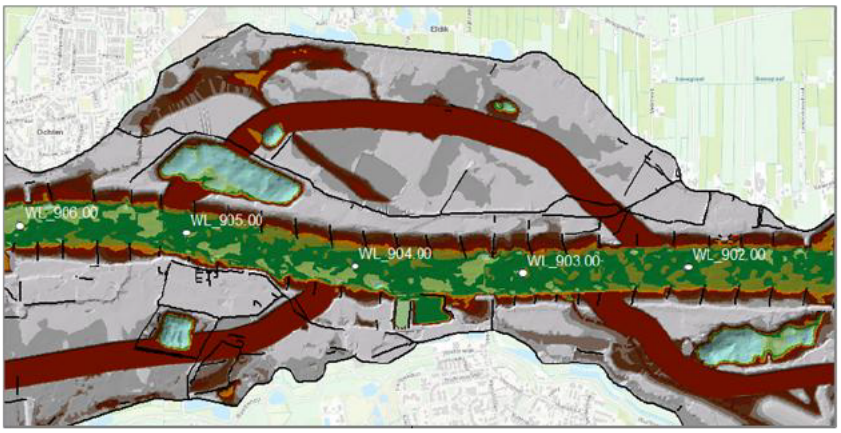
Figuur 4-7 Waterstandsverschillen voor de Boven-Rijn en de Waal voor de oevergeulenvariant.

4.2.3 Verschil tussen de uiterwaardgeul- en oevergeulvariant

Beide varianten hebben een vergelijkbaar effect op de waterstand. Bij lage afvoeren neemt de waterstand op de riviertakken toe met een maximale toename rond OLA. De maximale waterstandsdaling treedt op rond een afvoer van 6000 m^3/s. Wel zijn er verschillen in de mate van stijging of daling van de waterstand bij de berekende varianten. Figuur 4-9 laat de verschillen tussen de varianten zien. Hieronder worden voor lage, middelhoge en hoge afvoeren de belangrijkste verschillen geduid.

- Lage afvoeren (≤1020 m^3/s): Over de hele Waal leidt de oevergeulvariant tot ~10 cm hogere waterstanden dan de uiterwaardgeulvariant. De verschuiving in de afvoerverdeling is ook iets groter bij de oevergeulenvariant. Het model suggereert dat de versmalling met oevergeulen waterstanden meer opstuwt dan de kribverlenging. Mogelijk is de manier van schematiseren van invloed op dit verschil.
- Midden-afvoeren (1300-3220 m^3/s): Op de Boven- en Midden-Waal zien we hogere waterstanden bij de uiterwaardgeulenvariant. Dit verschil is het grootste bij een afvoer rond 1600 m^3/s met 20 cm. Het waterstandsverschil wordt mogelijk verklaard door de manier waarop de maatregelen geschematiseerd zijn. De kribverlenging zonder kribverlaging lijkt de waterstand meer op te stuwen dan de langsdammen. Daarnaast zijn de stroomsnelheden in de oevergeulen hoger dan in de uiterwaardgeulen.
  Benedenstrooms van rkm 912 zien we een omslag naar hogere waterstanden bij de oevergeulvariant. Dit wordt veroorzaakt door de ligging van de huidige langsdammen tussen rkm 912 en 922. Deze langsdammen zijn ook onderdeel van de uiterwaardgeulvariant. De toevoeging van uiterwaardgeulen op dit traject vergroot de waterstandsdaling.
  Daarnaast is vanaf het moment dat de geulen mee stromen het verloop van de waterstandsdaling over de lengte van de Waal bij de oevergeulen regelmatiger dan bij de uiterwaardgeulenvariant. Dit komt doordat er bij de uiterwaardgeulenvariant locaties met dubbele verruiming zijn en locaties zonder verruiming. Bij de oevergeulenvariant is er niet dubbel verruimd en komen stukken zonder verruiming minder voor. Dit effect is het grootste bij midden-afvoeren, maar werkt door tot in de extreme afvoeren.
- Middelhoge afvoeren (4350-8400 m^3/s): Dit is het afvoerbereik waarin de uiterwaarden mee beginnen te stromen. Bij de uiterwaardgeulvariant beginnen de uiterwaarden eerder mee te stromen doordat de bestaande zomerkades zijn doorsneden. Dit zorgt tussen rkm 878 en rkm 922 voor een lagere waterstand op de Waal bij de uiterwaardgeulvariant. Vanaf de afvoer 4350 m^3/s is dit terug te zien in de afvoerverdeling: De uiterwaardgeulvariant trekt beduidend meer afvoer (>20-60 m^3/s) dan de oevergeulvariant (Tabel 4-1).

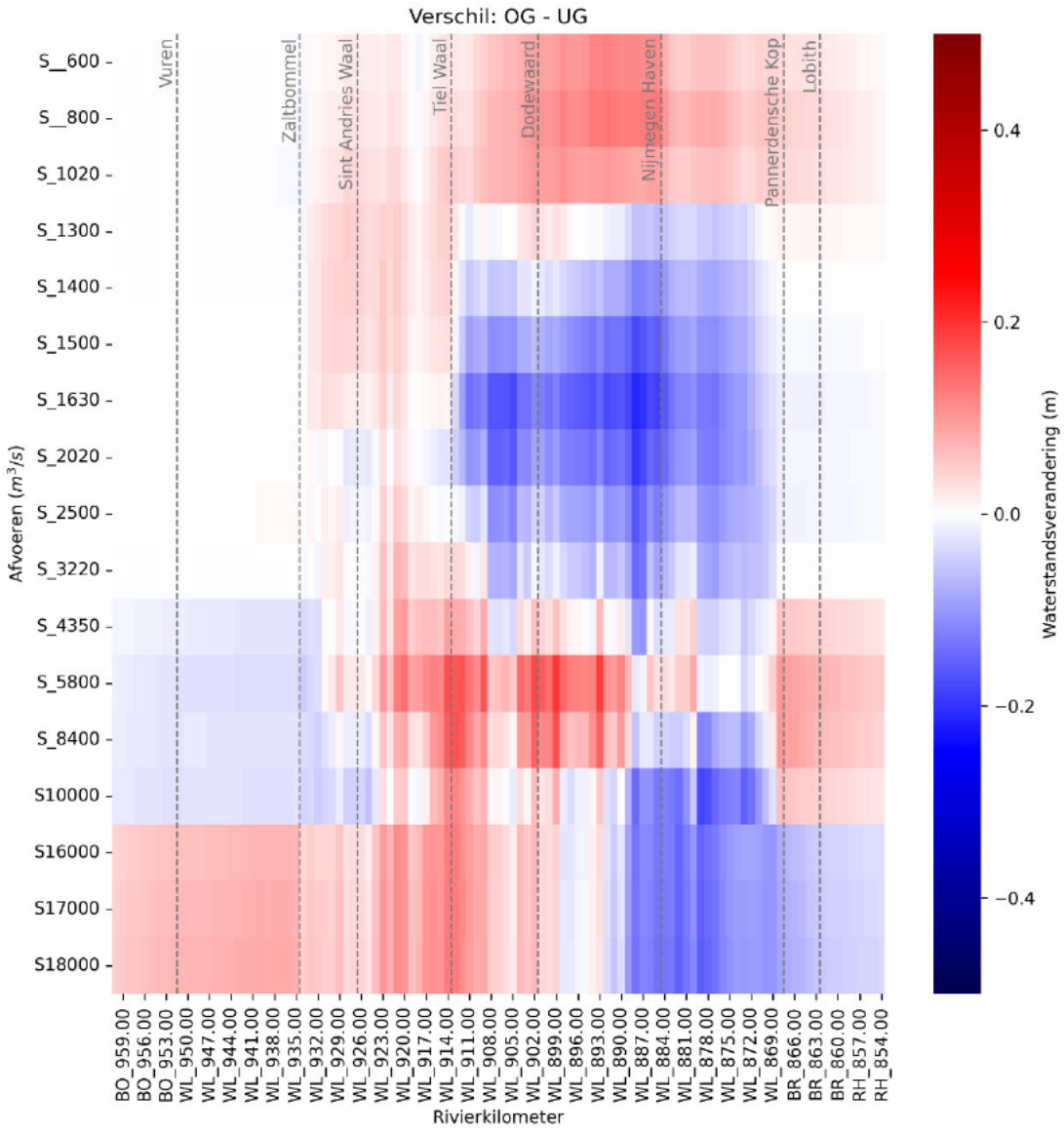
- Hoge afvoeren (10.000-18.000 m^3/s): Bij deze afvoeren zien we ter hoogte van de Waalbochten hogere waterstanden bij de uiterwaardgeulvariant dan bij de oevergeulvariant. Ter hoogte van rkm 902 slaat dit om. Benedenstrooms van deze locatie is de waterstand lager in de uiterwaardvariant dan de oevergeulvariant. Op deze locatie is er veel ruimte in de uiterwaardgeulvariant (Figuur 4-8). Hier overlappen de geulen van de noordelijke en zuidelijke uiterwaard elkaar waardoor de waterstand er sterker afneemt dan bij de oevergeulenvariant. De lagere waterstand verder benedenstrooms is gekoppeld aan de afvoerverdeling.



Figuur 4-8 Locatie met dubbele verruiming in de uiterwaardgeulenvariant doordat geulen overlappen.

Effecten op de Nederrijn-Lek en de IJssel:

- Lage afvoeren (≤1020 m^3/s): Bij de oevergeulvariant neemt de waterstand iets verder toe dan bij de uiterwaardgeulvariant. Er gaat ongeveer 5 tot 15 m^3/s meer naar het Pannerdensch Kanaal en daarmee de IJssel. Dit zorgt voor een waterstandsstijging van maximaal 15 cm op de bovenloop van de IJssel. Bij deze afvoeren is stuw Driel in het model nog volledig gesloten (tot en met 2020 m^3/s) en laat deze een vast debiet van 30 m^3/s door).
- Middelhoge afvoeren (1300 tot en met 8400 m^3/s): Het verschil tussen de twee varianten is minimaal. Vanaf 4350 m^3/s neemt de waterstand 5 tot 10 cm meer toe bij de oevergeulenvariant. Dit is ook weer toe te schrijven aan de verschuiving van de afvoerverdeling. Bij deze afvoeren trekt de Waal bij de uiterwaardgeulvariant meer water dan bij de oevergeulvariant wat de waterstand op de overige riviertakken verlaagt.
- Hoge afvoeren (10.000 tot en met 18.000 m^3/s): Overal hogere waterstand bij de uiterwaardgeulvariant. Ook dit is weer de verklaren door de verschuiving van de afvoerverdeling. Bij de hoogste afvoeren trek de Waal meer afvoer bij de oevergeulvariant en gaat er dus minder naar het Pannerdensch Kanaal.



Figuur 4-9 Waterstandverschillen tussen de oevergeul- en uiterwaardgeulvarianten. Rood betekent een hogere waterstand in de oevergeulvariant en blauw een hogere waterstand in de uiterwaardgeulvariant.

4.3 Stroomsnelheden

4.3.1 Instromen van de geulen

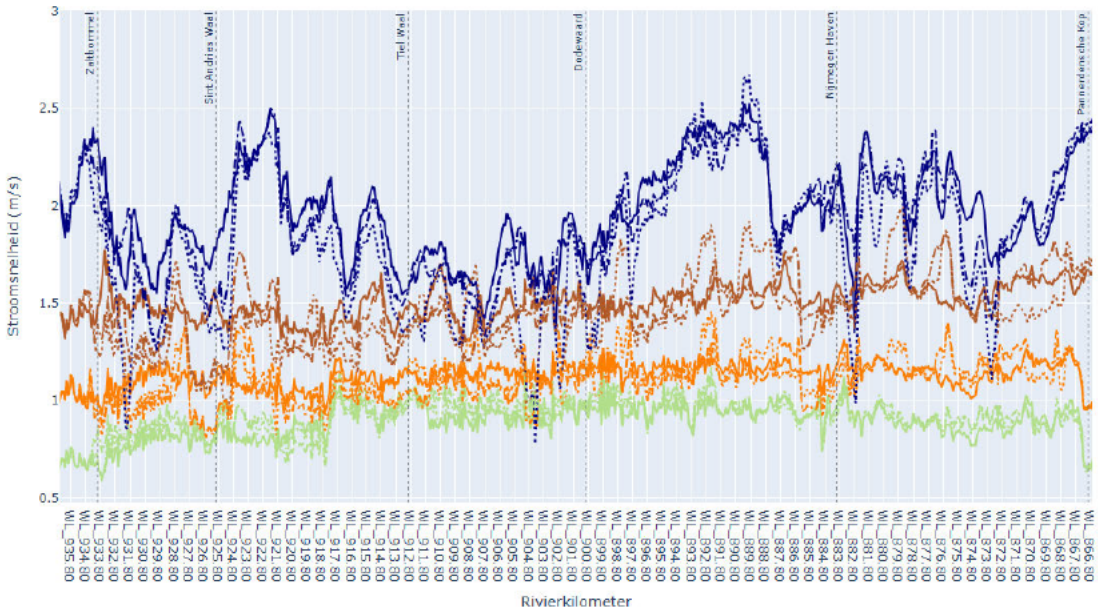
De hoogte van de inlaatdrempels van zowel de uiterwaard- als oevergeulen zijn gedimensioneerd op de OLR uit de referentiesom. Doordat de kribverlenging en de langsdammen de waterstand op de Waal bij lage afvoeren verhogen neemt de OLR in beide varianten ook toe. Resultaat is dat de geulen in de meeste gevallen te vroeg instromen en al mee stromen bij OLA.

In de uiterwaardgeulenvariant stromen de eerste geulen in vanaf 1020 m^3/s en stromen ze allemaal mee vanaf 1300 m^3/s (Figuur 4-14). De nieuw toegevoegde oevergeulen stromen allemaal mee vanaf 1020 m^3/s (Figuur 4-16). Dit is iets eerder dan bij de uiterwaardgeulen omdat de langsdammen in het model meer opstuwing geven dan de kribverlenging. Enkel de bestaande oevergeulen (og14a-b-c) wijken hier vanaf aangezien daar de drempel niet is aangepast op OLR, maar de huidige hoogte is gehandhaafd.

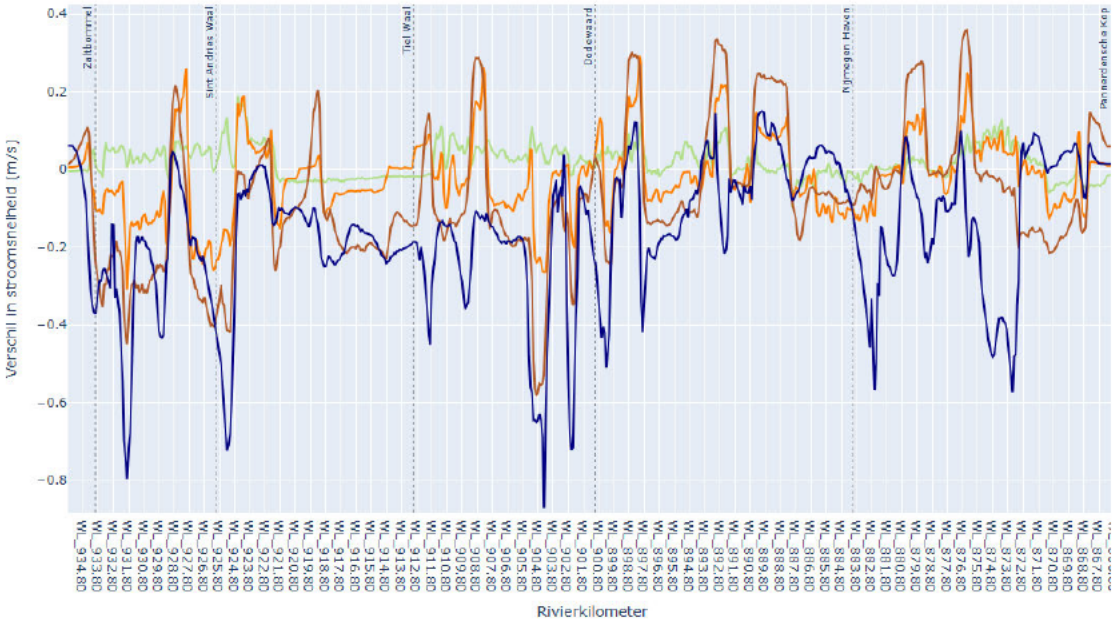
4.3.2 Stroomsnelheden in de hoofdgeul

De geulen beïnvloeden de stroomsnelheden in de hoofdgeul. Er ontstaan meer verschillen op de plekken ter hoogte van de in- en uitstroomlocaties van de geulen (Figuur 4-10). De ruimtelijke verschillen nemen toe naarmate de geulen beter mee gaan stromen. Zo zien we bij OLA dat de variaties in de stroomsnelheid nog op ongeveer dezelfde plek liggen als in de referentie, maar dat de stroomsnelheden over het algemeen hoger zijn als gevolg van de versmalling door langsdammen of kribverlenging. Bij hogere afvoeren nemen de ruimtelijke variatie in stroomsnelheden en de verschillen ten opzichte van de referentie toe. Op plekken waar niet is verruimd met geulen neemt de stroomsnelheid toe en op plekken waar de geulen zijn neergelegd neemt deze af. Hoe meer ruimte er is gerealiseerd, hoe groter de afname van de stroomsnelheid. Het verschil in stroomsnelheid tussen de varianten en de referentiesituatie is weergegeven in Figuur 4-11 (uiterwaardgeulen) en Figuur 4-12 (oevergeulen).
Bij de afvoeren <5800 m^3/s zijn de ruimtelijke variaties in beide varianten vergelijkbaar: een afname op de plek waar de geulen mee stromen en toename op de rivierkilometers daartussenin. Bij de oevergeulenvariant blijft dit patroon ook zichtbaar bij de hoge afvoeren. De grootste afnames zien we terug op de locaties waar uiterwaardgeulen in plaats van oevergeulen zijn meegenomen in de schematisatie; Gendtse Waard (rkm 873-875), vaste laag Nijmegen (rkm 886) en Heesselt (rkm 925). Benedenstrooms van deze locaties neemt de stroomsnelheid weer toe en wordt deze hoger dan in de referentiesituatie omdat daar niet verruimd is.

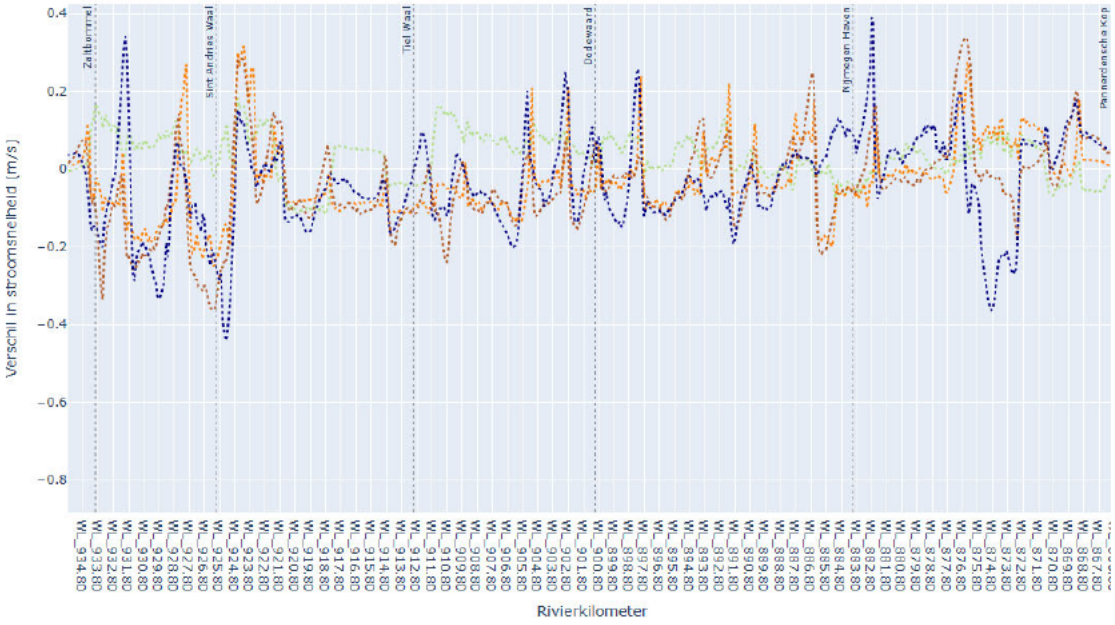
Bij afvoeren >5800 m^3/s verandert dit patroon bij de uiterwaardgeulenvariant. Op locaties waar grote of overlappende geulen zijn aangelegd neemt de stroomsnelheid met maximaal 0,8 m/s af ten opzichte van de referentie. Figuur 4-13 geeft een voorbeeld van de ruimtelijke variatie in stroomsnelheden rond rkm 904 waar overlappende geulen zijn gerealiseerd. De geulen trekken een groot deel van het debiet, waardoor de stroomsnelheid in de hoofdgeul afneemt. De stroomsnelheid bij de bovenstroomse inlaat van de geulen is het grootste waarna deze in de loop van de geul afneemt.



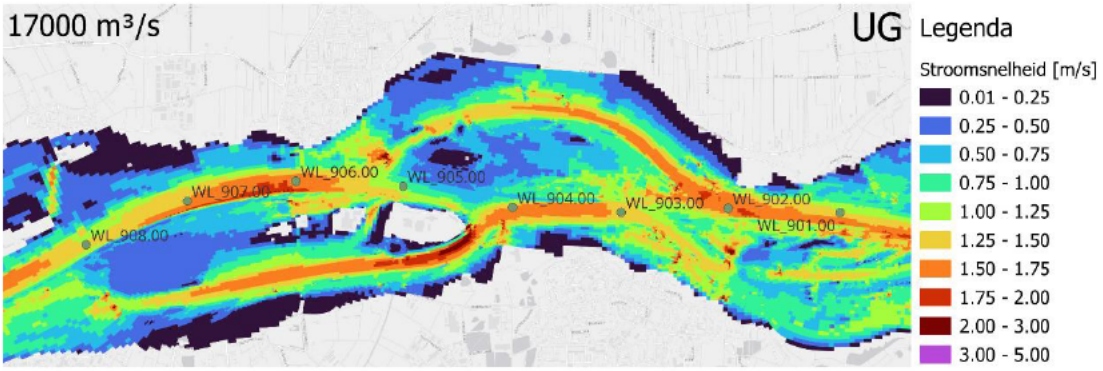
Figuur 4-10 Stroomsnelheden over de as van de rivier bij de referentie (–), uiterwaardgeulen- (•••) en oevergeulenvariant (-•-) bij vier afvoeren: 1020 m^3/s (groen), 2020 m^3/s (oranje), 5800 m^3/s (bruin) en 16.000 m^3/s (paars). Weergegeven is het deel van de Waal waar de geulen zijn toegepast (Pannerdensche Kop – Zaltbommel). De volledige figuur is opgenomen in bijlage B.3.



Figuur 4-11 Verschil in stroomsnelheid tussen de referentie en de uiterwaardgeulenvariant bij vier afvoeren: 1020 m³/s (groen), 2020 m³/s (oranje), 5800 m³/s (bruin) en 16.000 m³/s (paars). Weergegeven is het deel van de Waal waar de geulen zijn toegepast (Pannerdensche Kop – Zaltbommel). De volledige figuur is opgenomen in bijlage B.3.



Figuur 4-12 Verschil in stroomsnelheid tussen de referentie en de oevergeulenvarianten bij vier afvoeren: 1020 m³/s (groen), 2020 m³/s (oranje), 5800 m³/s (bruin) en 16.000 m³/s (paars). Weergegeven is het deel van de Waal waar de geulen zijn toegepast (Pannerdensche Kop – Zaltbommel).De volledige figuur is opgenomen in bijlage B.3.



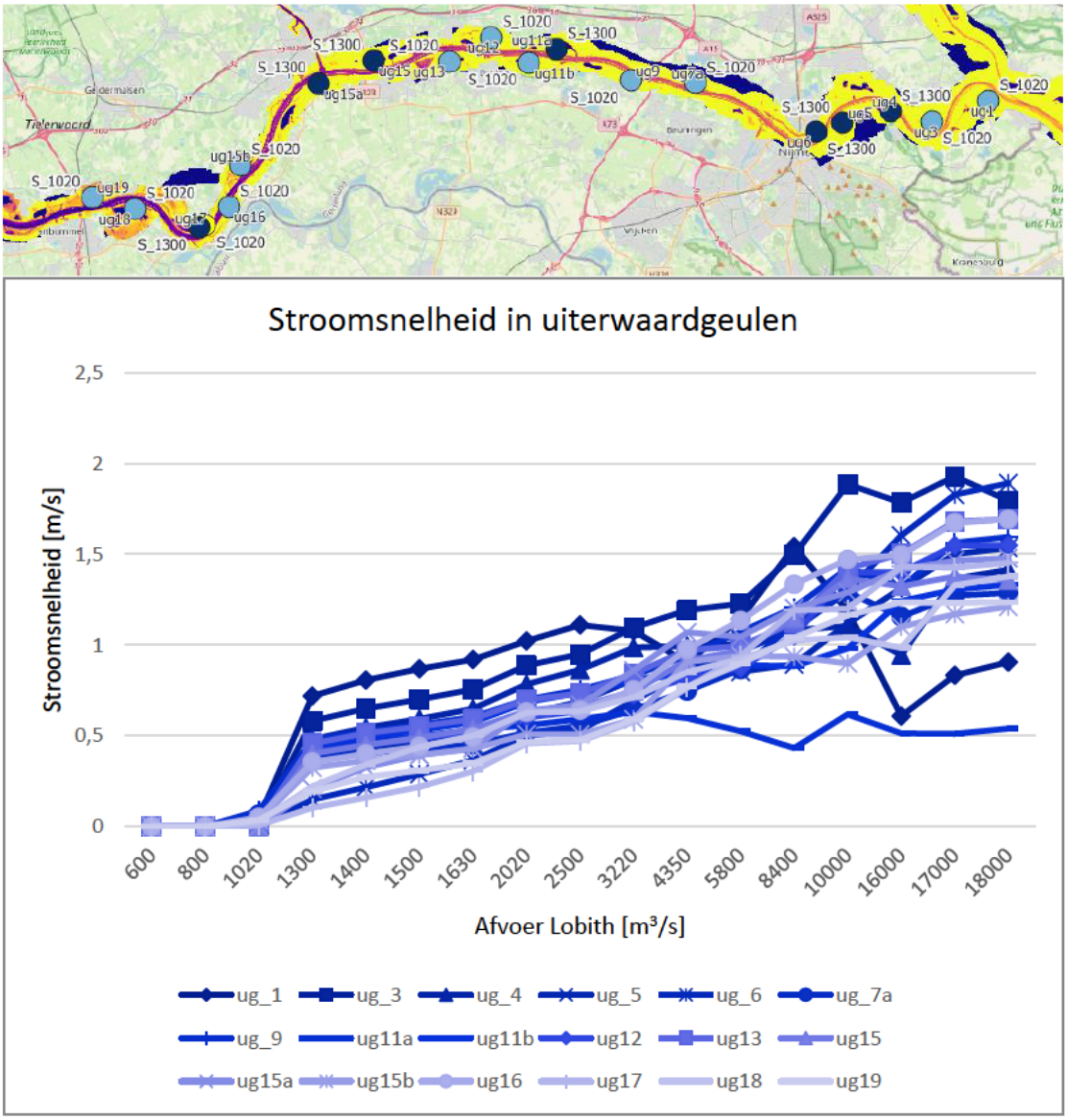
Figuur 4-13 Ruimtelijke variatie in stroomsnelheid bij een afvoer van 17.000 m³/s ter hoogte van Druten waar overlappende uiterwaardgeulen zijn geschematiseerd in het model.

4.3.3 Stroomsnelheid in de geulen

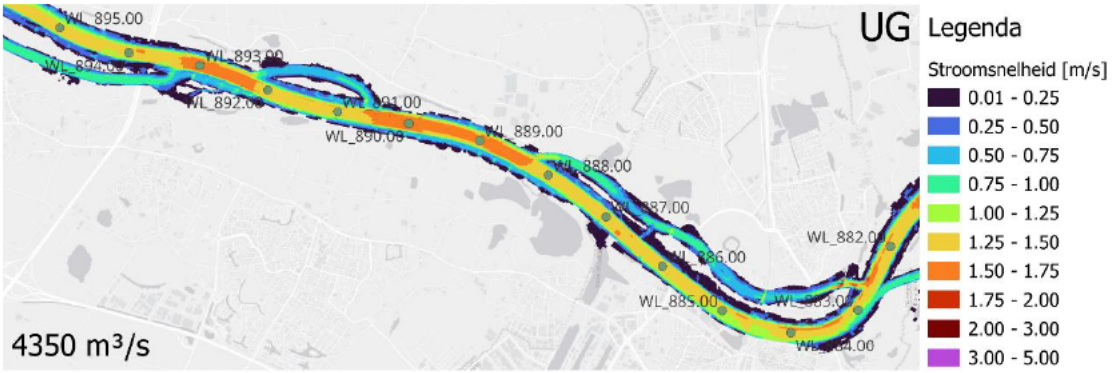
Uiterwaardgeulen

De stroomsnelheden in de geulen variëren over de lengte van de Waal met ongeveer 1 m/s bij dezelfde afvoer. De hoogste stroomsnelheden zijn terug te zien bij de inlaat van de geulen en nemen in benedenstroomse richting af. Over het algemeen zien we dat de geulen die de binnenbocht afsnijden zeer effectief mee stromen. Hier neemt het verhang toe. In Figuur 4-14 zien we bijvoorbeeld voor de geul door de Millingerwaard (ug_1) de hoogste stroomsnelheden over het afvoerbereik tot en met 3220 m³/s. Bij deze afvoer bedraagt de stroomsnelheid 1,1 m/s in de geul. Wanneer bij hogere afvoeren de rest van de Millingerwaard begint mee te stromen nemen de stroomsnelheden iets af. Wanneer de gehele uiterwaard mee stroomt zien we de stroomsnelheden weer toenemen tot maximaal 1,5 m/s. De hoogste stroomsnelheden komen zoals verwacht voor bij de hoogste afvoeren maar blijven overal onder 2 m/s.

Figuur 4-15 geeft de ruimtelijke variatie van de stroomsnelheden in de uiterwaardgeulen weer in vergelijking met de variatie in de hoofdgeul Figuur 4-17



Figuur 4-14 Boven: De ligging van de uiterwaardgeulen en de afvoer waarbij deze mee beginnen te stromen. Onder: Stroomsnelheden in de uiterwaardgeulen bij de doorgerekende afvoeren. De kleuren worden lichter in de stroomafwaartse richting



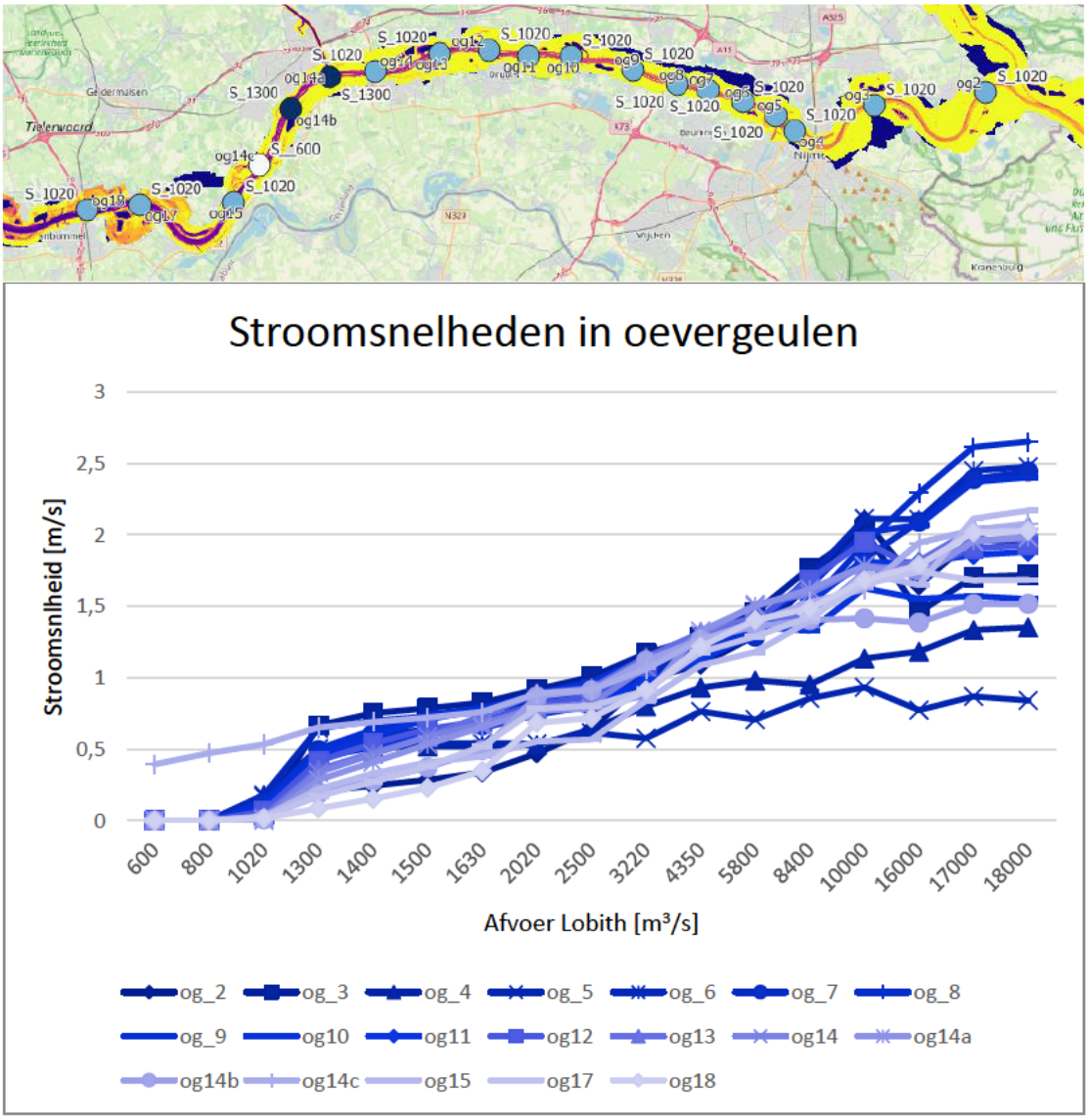
Figuur 4-15. Stroomsnelheden bij 4350 m³/s in de UG-variant ter hoogte van Nijmegen.

Oevergeulen

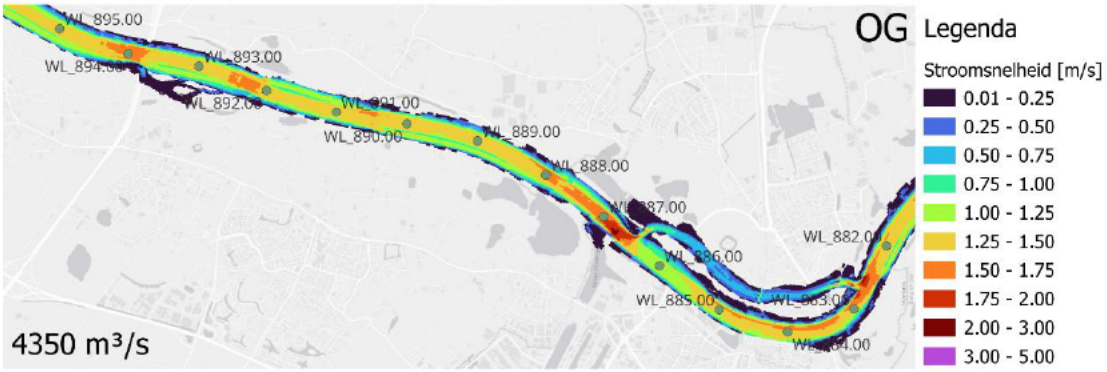
De stroomsnelheden in de oevergeulen zijn tot een afvoer van 3220 m^3/s iets hoger maar vergelijkbaar met die in uiterwaardgeulen. De stroomsnelheid komt nog vrijwel niet boven de 1 m/s. Bij toenemende afvoer zien we een verschil ontstaan en nemen de stroomsnelheden in de oevergeulen meer toe dan in de uiterwaardgeulen.

De maximale stroomsnelheid is 2,6 m/s bij oevergeul 8 (og_8) ter hoogte van rkm 893. Ook bij de aanliggende oevergeulen (og_7 en og_9) zien we stroomsnelheden van 2,5 m/s bij de extreem hoge afvoeren. Deze geulen liggen op een stuk van de Waal waar de uiterwaarden relatief smal zijn en er geen extra nevengeulen aanwezig zijn waar dat boven- en benedenstrooms wel het geval is. De laagste stroomsnelheden zien we terug bij oevergeul 4 (og_4, rkm 887) welke parallel aan de Spiegelwaal en tegenover de vaarweg richting sluis Weurt ligt. Hier is dus al veel verruiming bij de hoge afvoeren wat de stroomsnelheden minder doet stijgen.

Figuur 4-17 geeft de ruimtelijke variatie van de stroomsnelheden in de oevergeulen weer in vergelijking met de variatie in de hoofdgeul bij een afvoer van 4350 m^3/s.



Figuur 4-16 Boven: De ligging van de oevergeulen en de afvoer waarbij deze mee beginnen te stromen. Onder: Stroomsnelheden in de oevergeulen bij de doorgerekende afvoeren. De kleuren worden lichter in de stroomafwaartse richting



Figuur 4-17. Stroomsnelheden bij 4350 m³/s in de OG-variant ter hoogte van Nijmegen.

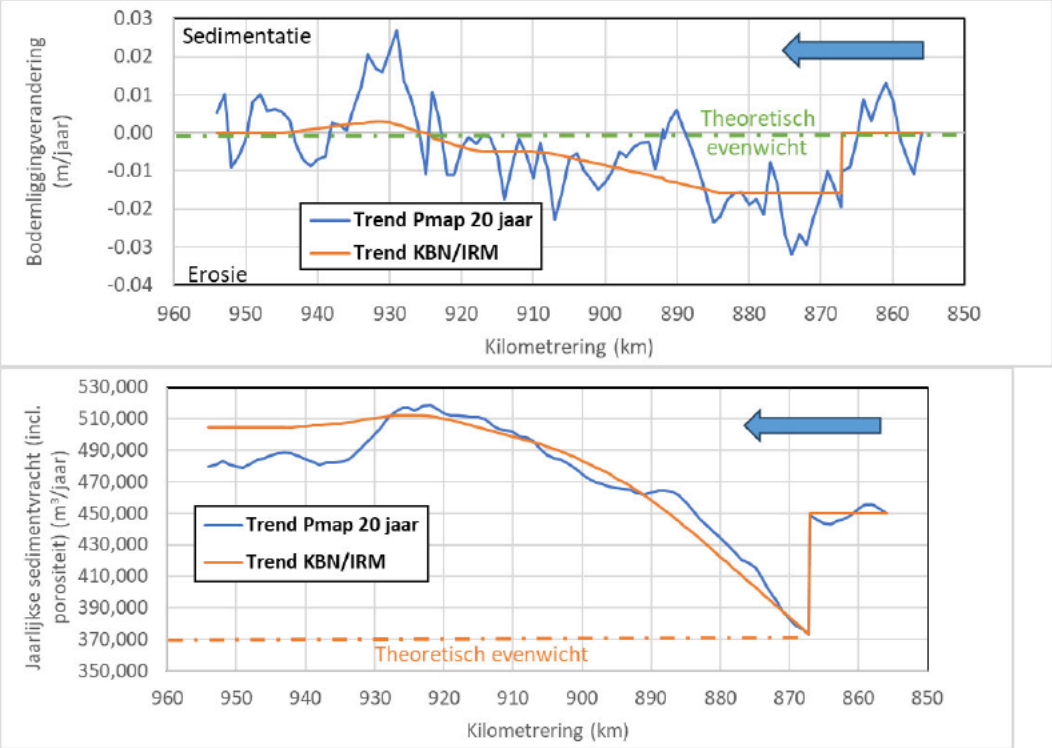
5 Effect MGS op rivierbodemerosie

5.1 Uitgangssituatie bodemtrends en sedimenttransportgradiënt

De opgave voor het stoppen van de grootschalige erosietrend met het meergeulensysteem is het elimineren van de sedimenttransportgradiënt die deze erosie opwekt. Voor deze opgave wordt uitgegaan van de prognose voor bodemerosietrends tot 2050. Sloff (2019) heeft deze prognose opgesteld op basis van trends in bodemmetingen tussen 2000 en 2018. De resulterende prognose, en de achterliggende historische trend, zijn getoond in het bovenste deel van Figuur 5-1. Het gaat om een globale inschatting, waarbij duidelijk in het rapport is aangegeven dat extrapolatie van historische trends beperkingen kent. Ondanks deze onzekerheden geeft de prognose voldoende richting voor gebruik in beleidsstudies.

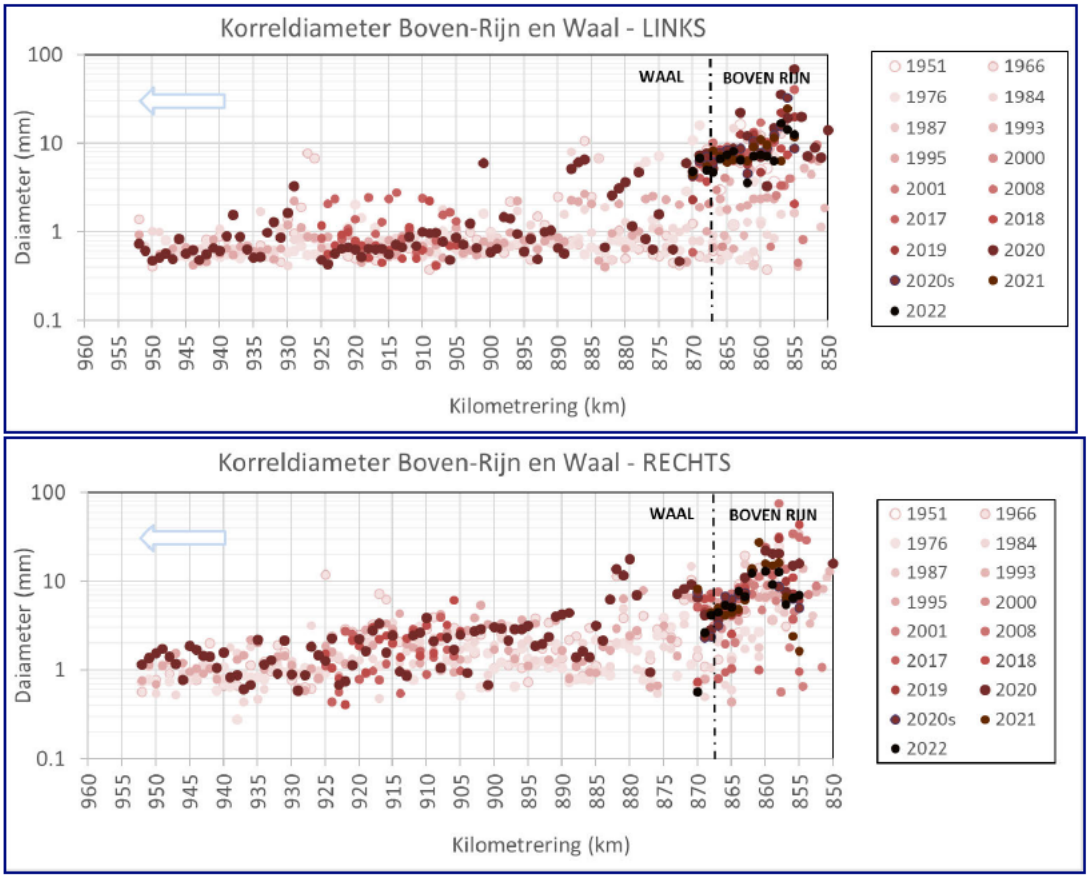
De verwachte erosie vertaalt zich naar veranderingen in sedimenttransport: een toename van sedimenttransport stroomafwaarts leidt doorgaans tot erosie, terwijl een afname juist sedimentatie veroorzaakt. De berekende sedimenttransportcapaciteit die leidt tot de historische en verwachte toekomstige erosie is getoond in het onderste deel van Figuur 5-1. Voor de Waal wordt tot 2050 een toename van sedimenttransportcapaciteit verwacht tussen de Pannerdensche Kop en Zaltbommel (kilometer 867–930) van **circa 140.000 à 150.000 m³ per jaar** (inclusief poriën in het bodemmateriaal).

Ook voor dit getal geldt dat het een ruwe indicatie is van de opgave om erosie te stoppen. Modelberekeningen laten zien dat deze waarde kan variëren door verschillen in klimaatscenario's. Zo kan de gradiënt onder natte of droge omstandigheden (zoals in het KNMI-scenario Hd2050) ongeveer 20.000 m³ per jaar hoger of lager uitvallen. Dit benadrukt dat beleidskeuzes rekening moeten houden met onzekerheden en robuuste maatregelen vereisen.



Figuur 5-1 Boven: prognose van trend in bodemverandering voor KBN- en IRM-studies uit Sloff (2019), en de historische trend van de periode 2000-2018 uit Pmap-gegevens. Onder: verloop van de jaarlijkse sedimenttransporten dat leidt tot het erosiegedrag in de bovenste figuur. In beide figuren duidt de streep-stiplijn het verloop aan dat nodig is om erosie volledig te stoppen.

De toename van sedimenttransport stroomafwaarts in de Boven-Rijn en Waal wordt vooral veroorzaakt door een geleidelijke verfijning van het rivierbodemmateriaal. Terwijl de stroomsnelheid en bodemruwheid langs de rivier relatief constant blijven, neemt de korreldiameter van het mengsel af. Hoe fijner het materiaal, hoe groter de transportcapaciteit van de stroming. Concreet betekent dit dat het aandeel zand in het mengsel toeneemt van ongeveer 30% bij de Pannerdensche Kop tot circa 80% bij Zaltbommel. Het aandeel grind daalt op dit traject van 70% naar 20%, waarbij ook de gemiddelde grinddiameter sterk afneemt. Metingen over de afgelopen 70 jaar bevestigen deze stroomafwaartse verfijning, zoals weergegeven in Figuur 5-2. De aanzienlijke spreiding in de meetgegevens onderstreept de onzekerheid.



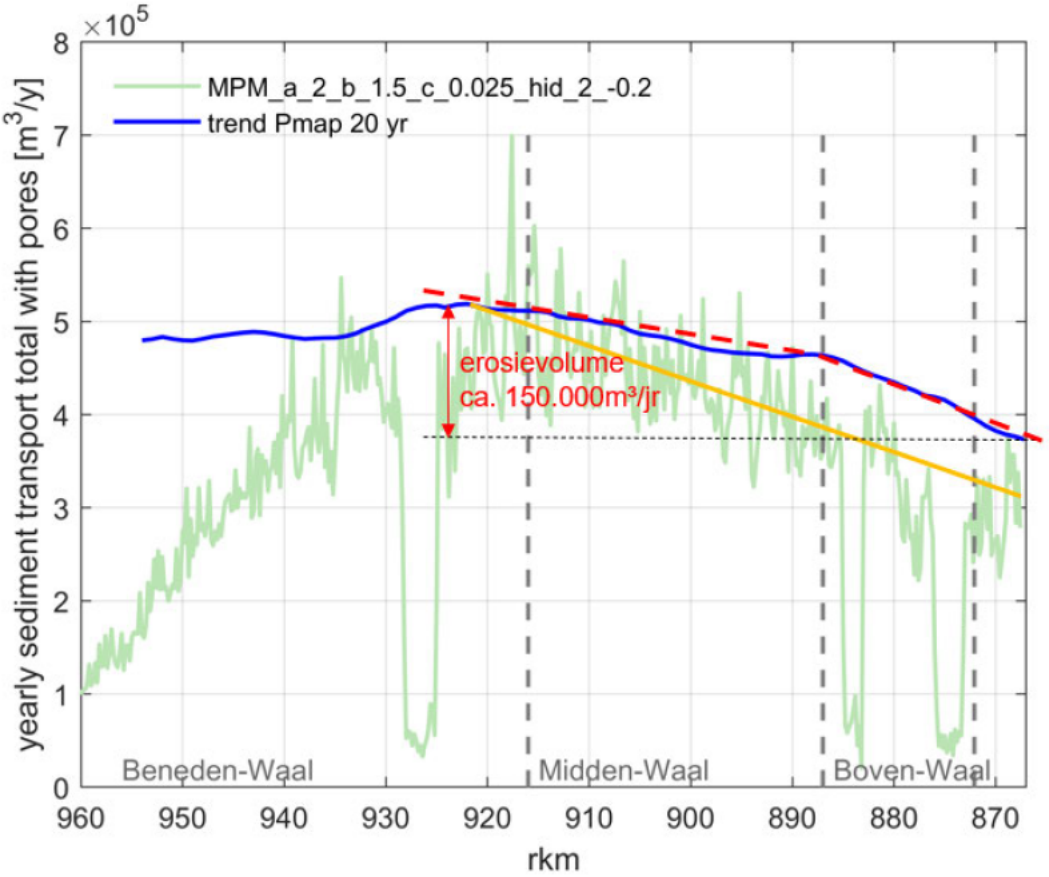
Figuur 5-2 Gemeten mediane korreldiameter D50 langs de Waal voor linkerzijde en rechterzijde van de rivier-as in het zomerbed voor data sets van 1951 tot en met 2022 (Sloff, 2022).

5.2 Validatie

Omdat voor dit onderzoek de morfologische instellingen van het DVR-model in Delft3D 4 zijn gebruikt in combinatie met een hydraulisch model in D-HYDRO, is gevalideerd of op deze manier nog steeds het juiste jaartransport wordt berekend voor de huidige situatie. Voor deze validatie is het berekende jaartransport vergeleken met de trends die zijn afgeleid uit de erosietrends van Sloff (2019), zie paragraaf 5.1. De vergelijking met de lijn die volgt uit de historische trend is getoond in Figuur 5-3. Tot aan ongeveer rkm 935 volgt de lijn die is berekend met de in paragraaf 3.2 beschreven methode (Figuur 5-3, groene lijn) de lijn van Sloff (2019, blauwe lijn) goed als we de gemiddelde grootschalige gradiënt weergeven met de oranje lijn (de oranje en blauwe lijnen lopen parallel). Benedenstrooms daarvan neemt de transportcapaciteit sterk af, wat aangeeft dat op dit traject sedimentatie plaatsvindt. Dat gebeurt ook in werkelijkheid, echter vindt op dit traject ook zandwinning plaats. Daardoor blijft de bodemligging constant, wat in de schatting van sedimenttransportgradiënten (zoals getoond in Figuur 5-1) leidt tot een constante transportcapaciteit. Morfologische berekeningen met het nieuwe morfologische model in D-HYDRO hebben tijdens de modelkalibratie laten zien dat een sedimentatie in de ordegrootte van de groene lijn inderdaad door de bekende volumes van de zandwinning opgevangen worden. Op de Midden-Waal levert de in dit rapport toegepaste methode met de gemiddelde hydrograaf een iets grotere gradiënt dan de schatting op basis van Sloff (2019). Hierbij past de kanttekening dat de gradiënt van Sloff (2019) ook slechts een schatting is (zie paragraaf 5.1). Hoe groot de gradiënt in werkelijkheid is, en hoe deze varieert in de tijd, is niet bekend, omdat deze niet gemeten kan worden. In paragraaf 5.1 is verder aangegeven dat de gradiënt in sterke mate afhangt van de gradiënt in bodemsamenstelling.

Het is niet bekend of en hoe deze gradiënt in de bodemsamenstelling zou kunnen veranderen als langs de hele Waal grootschalig het MGS wordt toegepast. Deze onzekerheid moet in het achterhoofd gehouden worden bij het beoordelen van de effectiviteit van het MGS in de volgende paragrafen.

De drie trajecten met heel laag transport in Figuur 5-3 zijn de locaties van de bodemkribben bij Erlecom en de vaste lagen bij Nijmegen en Sint Andries. De hierboven beschreven aanpak gebruikt de beschikbaarheid van sediment in het morfologische model als uitgangspunt voor het bepalen van het transport. Op de vaste lagen is in dat model geen sediment beschikbaar, waardoor er heel kleine transporten worden uitgerekend. Zo doet immers alleen de binnenbocht naast de vaste laag mee. Dit is een artefact omdat in werkelijkheid sediment van bovenstrooms over de niet-erodeerbare vaste laag heen getransporteerd wordt. De in Figuur 5-3 op basis van stroomsnelheden en bodemsamenstelling gesuggereerde discontinuïteiten treden daarom noch in werkelijkheid op noch in een volledig morfologische berekening.

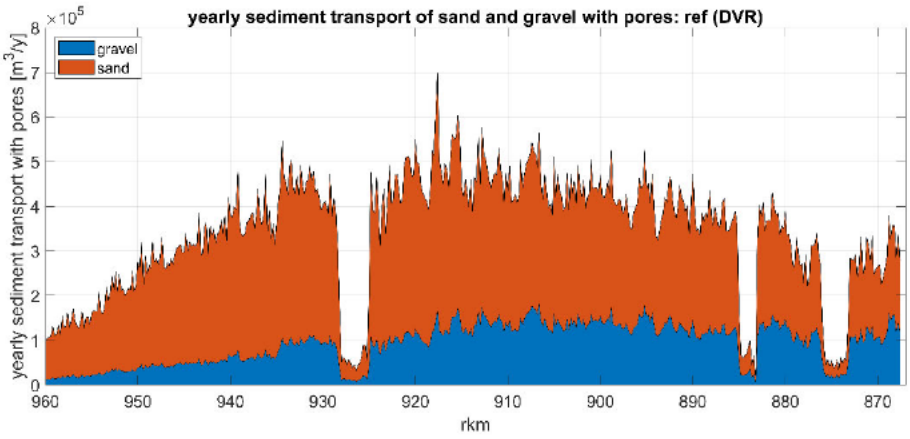


Figuur 5-3 Jaarlijks sedimenttransport (inclusief poriën) geschat volgens de in voorliggend rapport beschreven methode (groene lijn) en geschat uit de trends in bodemverandering in de afgelopen 20 jaar van Sloff (2019) (blauwe lijn). De rode streepjeslijn geeft een schatting van het jaarlijks erosievolume dat gecompenseerd moet worden om de bodemligging constant te houden. De doorgetrokken oranje lijn geeft aan hoe groot dit volume volgens de in dit rapport gebruikte methode zou zijn. De gesuggereerde zeer lage transporten op de drie trajecten met vaste lagen en als vaste lagen geschematiseerde bodemkribben vormen modelartefacten als toegelicht in paragraaf 5.2.

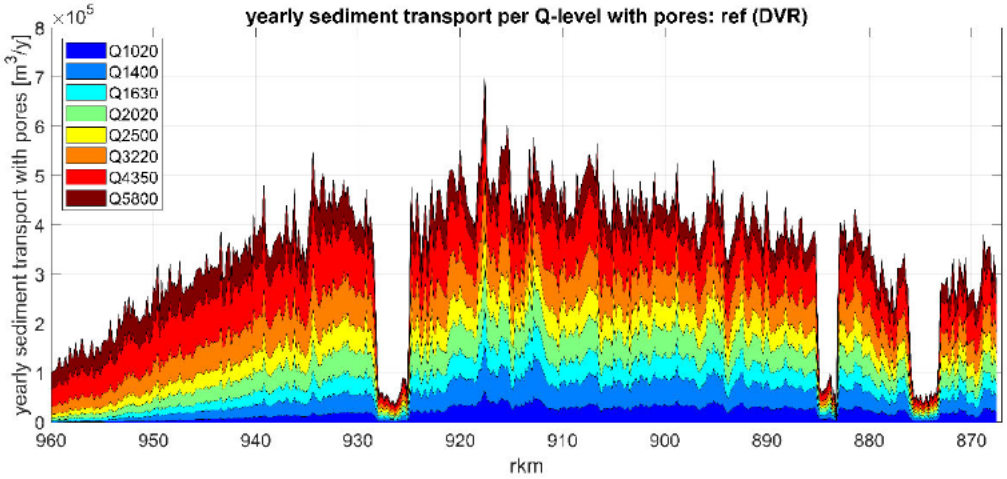
5.3 Analyse referentiesituatie

Figuur 5-4 toont dezelfde schatting van het jaartransport van bodemmateriaal als Figuur 5-3 maar splitst het transport op in zand- en grindtransport. Het transport van grind blijft redelijk constant tot aan rkm 910 en neemt dan geleidelijk af naar benedenstrooms. Het transport van zand neemt toe tot aan rkm 920 en neemt daarna weer af. Dit verloop van de verdeling van het transport over de zand- en grindfractie is een samenspel van de stroomsnelheden enerzijds en de stroomafwaartse verfijning in bodemsamenstelling anderzijds. Stroomsnelheden zijn constant tot aan rkm 920 tot 940, afhankelijk van het afvoerniveau, en nemen vervolgens sterk af wat leidt tot een afname van transportcapaciteit van zowel zand als grind. De toename van transport van de zandfractie tot circa km 935 hangt samen met de toename van het aandeel zand in de bedding (paragraaf 5.1). Het aandeel grind neemt evenredig af, maar doordat dat aandeel ook iets fijner wordt (aandeel grof grind en stenen neemt sterk af stroomafwaarts) zal het transport van grind tot circa km 910 relatief constant blijven met de gebruikte rekenmodellen.

Figuur 5-5 laat de bijdrage van de verschillende afvoerniveaus zien voor de gekozen gemiddelde jaarhydrograaf en berekend met de gekozen en gekalibreerde sedimenttransportrelatie. Daaruit wordt duidelijk dat ook de lage afvoerniveaus een belangrijke bijdrage leveren, ondanks dat bij deze condities het sedimenttransport relatief laag is. Dit komt door de vrij lange duur van deze afvoerniveaus in de gemiddelde hydrograaf. Daarbij moet worden opgemerkt dat bij berekeningen met een nat klimaatscenario de lage afvoeren korter duren en daardoor minder bijdragen. Nadere analyse van de afzonderlijke bijdragen leert verder dat in de huidige situatie alle afvoerniveaus bijdragen aan de transportgradiënt, dus bij alle afvoeren neemt het transport in benedenstroomse richting toe. Dit komt doordat de gradiënt wordt veroorzaakt door een gradiënt in de bodemsamenstelling, terwijl de stroomsnelheid langs de Boven- en Midden-Waal vrijwel constant blijft.



Figuur 5-4 Schatting van het jaarlijks sedimenttransport (inclusief poriën) in de huidige situatie, gesplitst in zand en grind. De gesuggereerde zeer lage transporten op de drie trajecten met vaste lagen en als vaste lagen geschematiseerde bodemkribben vormen modelartefacten als toegelicht in paragraaf 5.2.



Figuur 5-5 Schatting van het jaarlijks sedimenttransport (inclusief poriën) in de huidige situatie met bijdrage per afvoerniveau van de gemiddelde jaarhydrograaf. De gesuggereerde zeer lage transporten op de drie trajecten met vaste lagen en als vaste lagen geschematiseerde bodemkribben vormen modelartefacten als toegelicht in paragraaf 5.2.

5.4 Effect meergeulensysteem

Toepassing van het meergeulensysteem verkleint duidelijk de transportgradiënt, zowel voor OG als UG (Figuur 5-6 en Figuur 5-7). In beide varianten lopen de maatregelen (realisatie van MGS) door tot aan rkm 934. Figuur 5-7 laat zien dat de jaartransporten in beide varianten rond de streeflijn zonder transportgradiënt schommelen. Dat betekent dat beide varianten in staat zijn om de grootschalige transportgradiënt te verwijderen en dus de grootschalige erosie te stoppen. De volgende alinea's analyseren de grote variatie rond de streeflijn in meer detail. Daaruit wordt duidelijk dat deze voor een groot deel teniet gedaan kunnen worden door lokale optimalisatie van het ontwerp, zoals betere aansluiting van oever- of uiterwaardgeulen aan weerskanten van de rivier (geen dubbele verruiming of trajecten zonder verruiming). Deze variaties mogen dus geen rol spelen bij de beoordeling van het grootschalige gedrag met de twee varianten.

De maatregelpakketten laten zowel het grindtransport als het zandtransport afnemen, maar het grindtransport iets meer (Figuur 5-6). De bijdrage van de laagste afvoer 1020 m^3/s blijft, ondanks de toename van de stroomsnelheden voor die afvoer, vergelijkbaar met die in de referentiesituatie (Figuur 5-7). Dit is beter te zien in de figuren per afvoerniveau in bijlage C.1. Vanaf het moment dat de geulen mee stromen, dus vanaf 1400 m^3/s, nemen de transporten voor zowel OG als UG af ten opzichte van de huidige situatie, omdat de stroomsnelheden in de hoofdgeul afnemen. Dit effect neemt toe tot aan afvoerniveau 3220 m^3/s. Bij de hogere afvoeren, 4350 m^3/s en 5800 m^3/s, neemt het effect weer af, omdat dan de uiterwaarden beginnen mee te stromen en de invloed van de verruiming op de stroomsnelheden in de hoofdgeul minder groot is.

In de variant met UG neemt het jaartransport tussen de Pannerdensche Kop en ongeveer rkm 910 nog steeds toe. De grootschalige gradiënt is dus niet volledig verwijderd. Om deze uit het systeem te halen zou helemaal bovenstrooms niet of nauwelijks verruimd moeten worden, en zou de verruiming richting benedenstrooms heel geleidelijk moeten toenemen. In de huidige variant met UG zorgen echter de geulen op de Boven-Waal nog voor te veel verruiming, waardoor het jaartransport op de bovenrand zelfs onder dat van de huidige situatie uitkomt. Verder benedenstrooms wordt er juist te weinig verruimd. Er moet worden bekeken of het mogelijk is om de geulen hier iets dieper te leggen of breder te maken om tot de juiste hoeveelheid verruiming te komen.

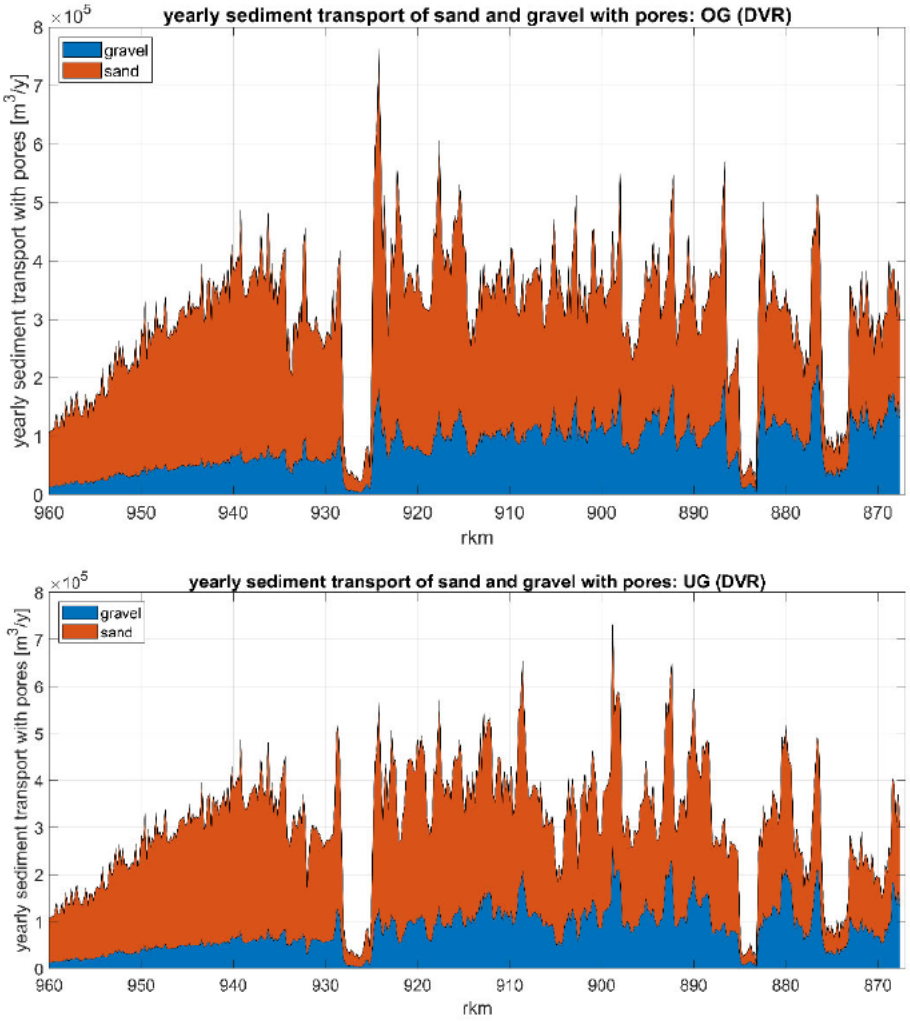
Rond de grootschalige gradiënt langs de Waal ontstaat in de variant met UG veel variatie in het jaartransport. Deze is te wijten aan trajecten waarop geen verruiming is toegepast (pieken) of waar aan beide kanten van de rivier is verruimd (dalen). Figuur 5-10 en Figuur 5-11 tonen twee voorbeelden hiervan. Op locaties zonder verruiming maar wel met verlengde kribben nemen de stroomsnelheden en dus het sedimenttransport in de hoofdgeul toe ten opzichte van de huidige situatie. Op trajecten met dubbele verruiming nemen beide sterker af dan bij verruiming aan één kant van de rivier. Deze onregelmatigheid in het transport is ongewenst, omdat elke toename of afname van het transport langs de rivier leidt tot een morfologische reactie van de rivierbodem. Op locaties met een sterke toename zal erosie plaatsvinden en op locaties met een sterke afname sedimentatie.

In de variant met OG is het beter gelukt om de verruiming richting benedenstrooms geleidelijk te laten toenemen. De grootschalige gradiënt is dan ook verdwenen. Echter ontstaan ook in de variant met OG op meerdere locaties pieken in het jaartransport. Ook hier gaat het om locaties waar geen verruiming is toegepast maar wel de kribben zijn verlengd. Enkele voorbeelden hiervan zijn te zien in Figuur 5-9. Locaties met oevergeulen aan beide kanten komen in deze variant niet voor.

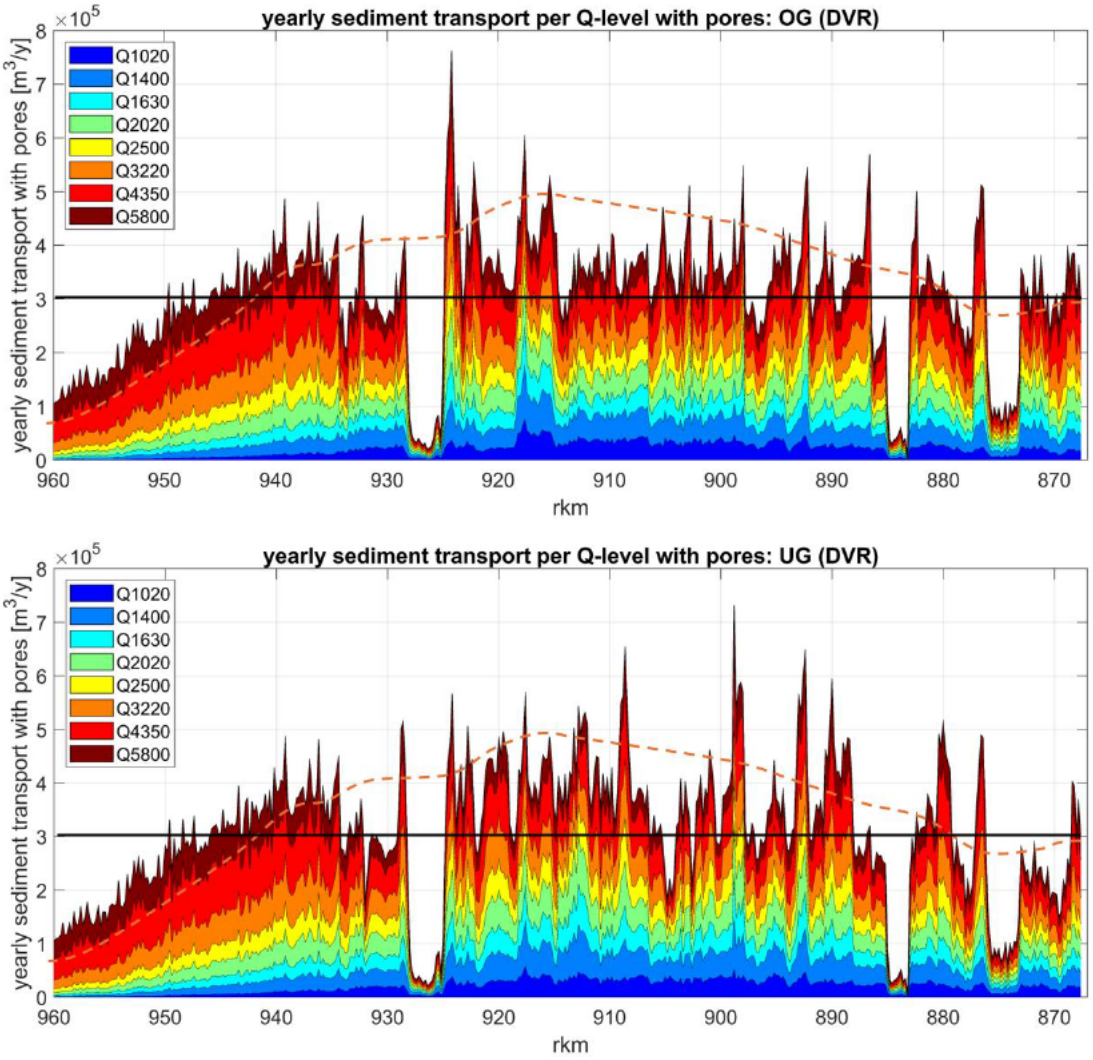
De variant met OG vergroot het transport aan de bovenstroomse kant van de Waal ten opzichte van de referentie. Dat komt doordat de meest bovenstroomse OG, OG_1, niet heel zuiver verruimd is. De geul achter die langsdam is aan de bovenkant smaller dan verder benedenstrooms (Figuur 5-8). Bij de bestaande langsdam bij Dreumel neemt het transport ook minder af dan boven- en benedenstrooms ervan. Dit komt waarschijnlijk omdat de hoogte van de inlaatdrempel van deze langsdam niet is verlaagd op OLA-niveau en deze dus pas bij hogere afvoeren begint mee te stromen dan die van de andere langsdammen. In de berekeningen die voor de morfologische effectbepaling zijn gebruikt stroomt de geul achter langsdam Ophemert wel al vanaf 1020 m^3/s mee. De oevergeulen bij Wamel (rkm 912) en bij km 894 hebben juist meer verruimend effect dan de omliggende oevergeulen en verlagen het transport te veel.

De grote invloed van dit soort variaties in verruiming laat zien hoe belangrijk het is om de verruiming zorgvuldig te ontwerpen. In het traject van voorliggend project moesten de geulen in heel korte tijd en dus op een geautomatiseerde manier worden geschematiseerd in het model. Dat heeft geleid tot niet optimale ontwerpen. Optimaal zou een verruiming zijn die naar benedenstrooms geleidelijk toeneemt, precies in de mate die nodig is om de transportgradiënt op te heffen. Bij voorkeur komen er dus geen trajecten met verruiming aan twee kanten van de rivier voor, of locaties die niet zijn verruimd. Het onderzoek met het morfologische 2D-model (Barneveld et al., 2025) heeft bovendien laten zien dat de overgang tussen geulen aan verschillende kanten van de rivier een aandachtspunt is. Deze beïnvloeden de stroming in de hoofdgeul lokaal en kunnen daardoor tot lokale morfologische reacties leiden.

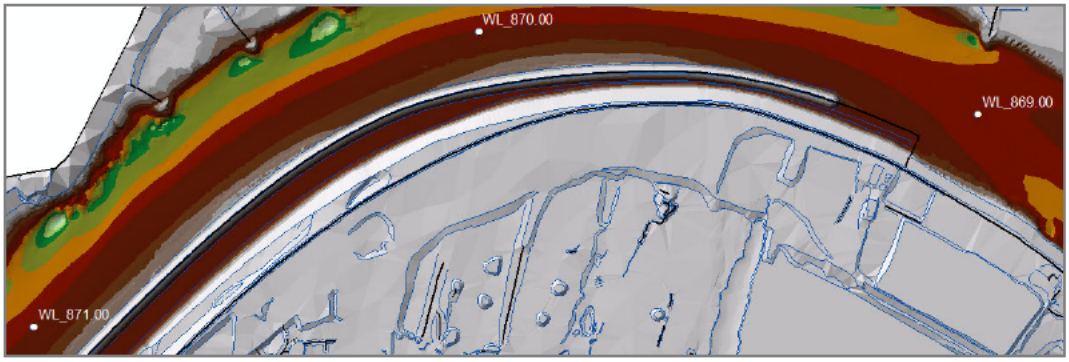
De resultaten tonen wel dat het met zowel oevergeulen als uiterwaardgeulen in principe mogelijk is om de transportgradiënt uit het systeem te verwijderen. Beide types maatregelen kunnen voor voldoende verruiming zorgen. De vraag is wel of het met beide types maatregelen lukt om de verruiming voldoende geleidelijk te laten verlopen langs de rivier. Ook is het mogelijk dat de complexe stromingspatronen bij de instroom en uitstroom naar en van de geulen voor de ene variant ongunstiger uitpakken dan voor de andere. Dat kan met de huidige studie niet onderzocht worden. Hiervoor zijn berekeningen met een morfologisch model nodig.



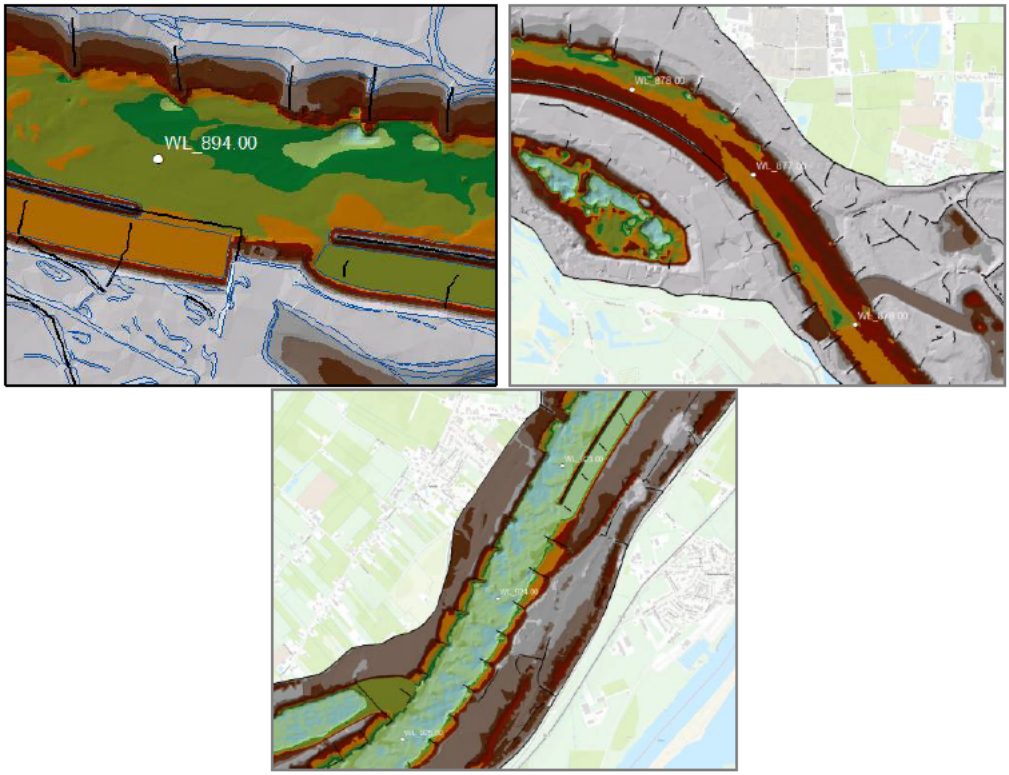
Figuur 5-6 Schatting van het jaarlijks sedimenttransport (inclusief poriën) in de situatie met OG (boven) en UG (onder), opgesplitst in zand- en grindtransport. De gesuggereerde zeer lage transporten op de drie trajecten met vaste lagen en als vaste lagen geschematiseerde bodemkribben vormen modelartefacten als toegelicht in paragraaf 5.2.



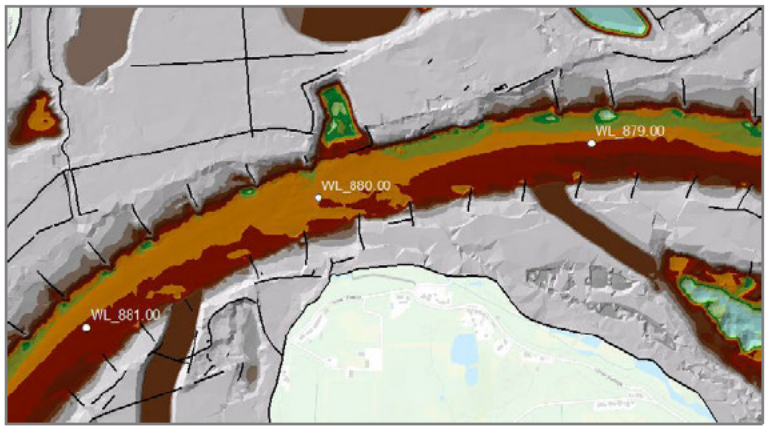
Figuur 5-7 Schatting van het jaarlijks sedimenttransport (inclusief poriën) in de situatie met OG (boven) en UG (onder), met bijdrage per afvoerniveau van de gemiddelde jaarhydrograaf. De oranje lijn is een geschetste lijn die zo goed mogelijk het verloop benadert van de grillige totaal-jaartransport-lijn van de huidige situatie (bovenzijde donkerrode bandje in Figuur 5-5 , inclusief overschatting van de transportgradiënt op de Midden-Waal). De zwarte lijn is de streeflijn zonder transportgradiënt. De gesuggereerde zeer lage transporten op de drie trajecten met vaste lagen en als vaste lagen geschematiseerde bodemkribben vormen modelartefacten als toegelicht in paragraaf 5.2.



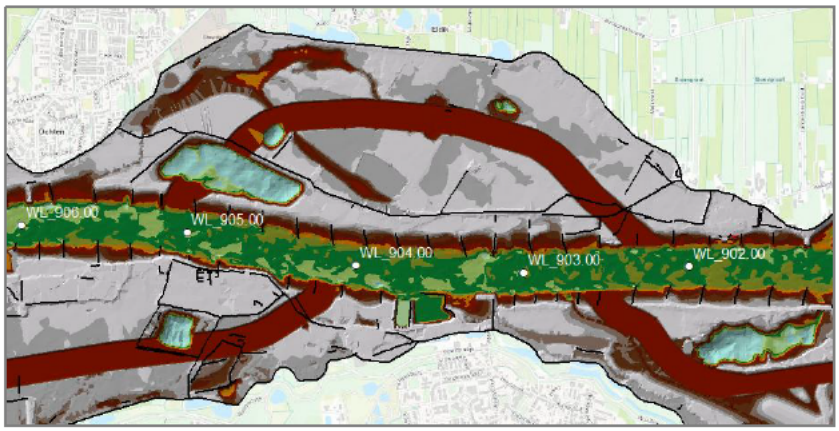
Figuur 5-8 Niet goed verruimde oevergeul achter de langsdam bij rkm 869 in de schematisatie met OG.



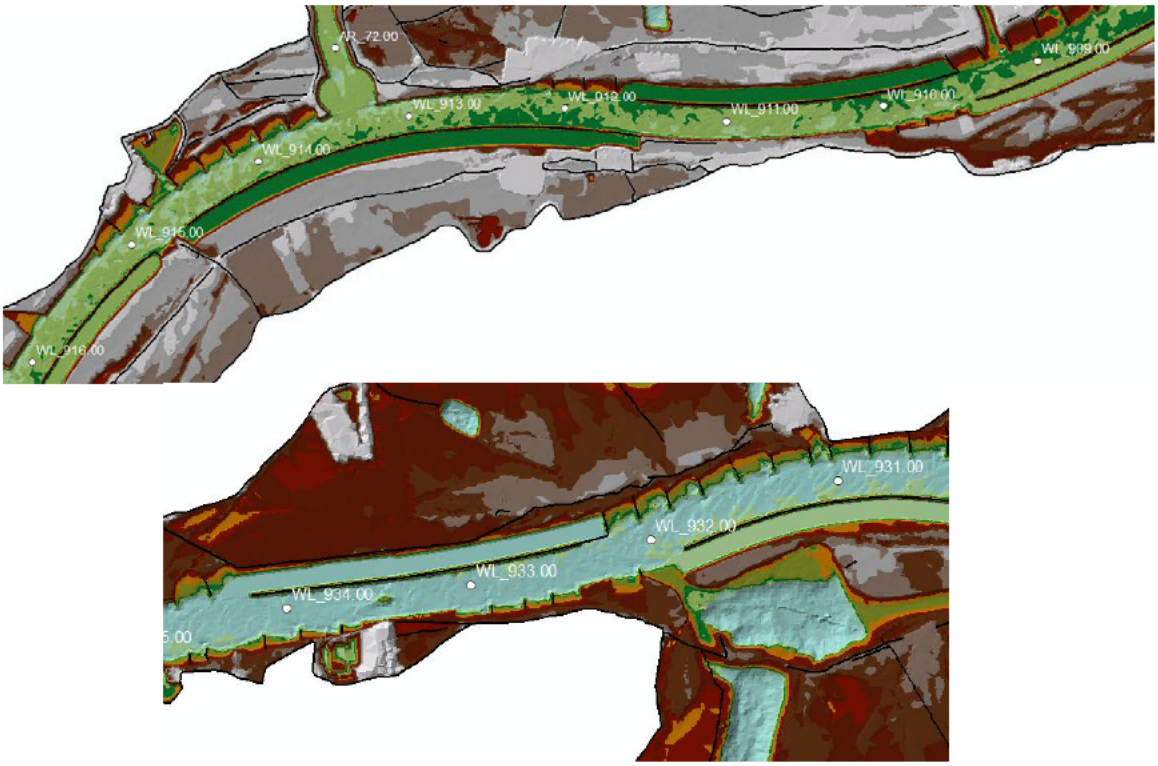
Figuur 5-9 Locaties zonder verruiming maar wel met verlengde kribben in de schematisatie met OG.



Figuur 5-10 Locaties zonder verruiming maar wel met verlengde kribben in de schematisatie met UG.



Figuur 5-11 Locatie met dubbele verruiming in de schematisatie met UG.



Figuur 5-12 Locaties waar de bodemligging in de oevergeulen duidelijk afwijkt van de geul boven- of benedenstrooms ervan De geul die bij rkm 932 start begint op een bodemhoogte van -3,30 m +NAP, terwijl het einde van de voorgaande geul op -2,60 m +NAP ligt.

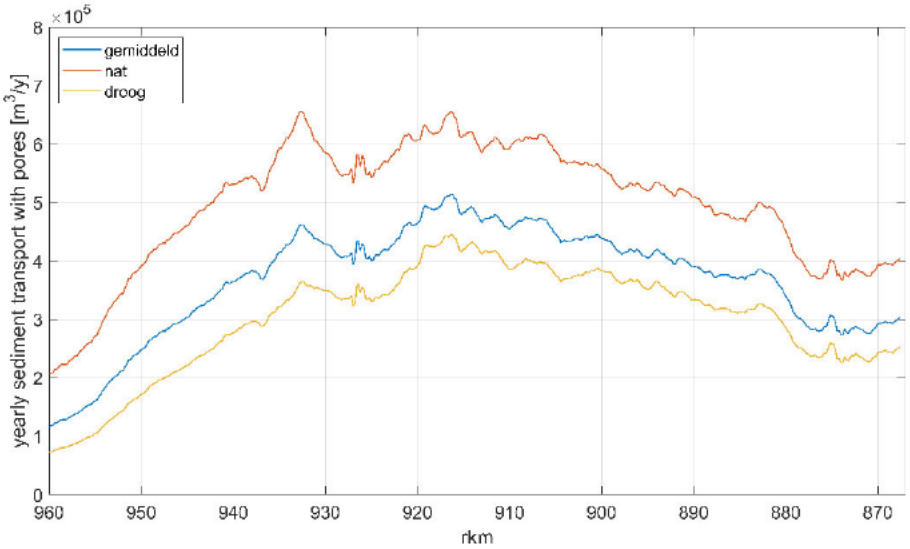
5.5 Invloed klimaat

Figuur 5-13, Figuur 5-14 en Figuur 5-15 laten zien hoe de schatting van het jaartransport verandert als er met verschillende hydrografen wordt gerekend. Dit geeft een indicatie van de gevoeligheid van de werking van de maatregelpakketten voor een veranderend klimaat.

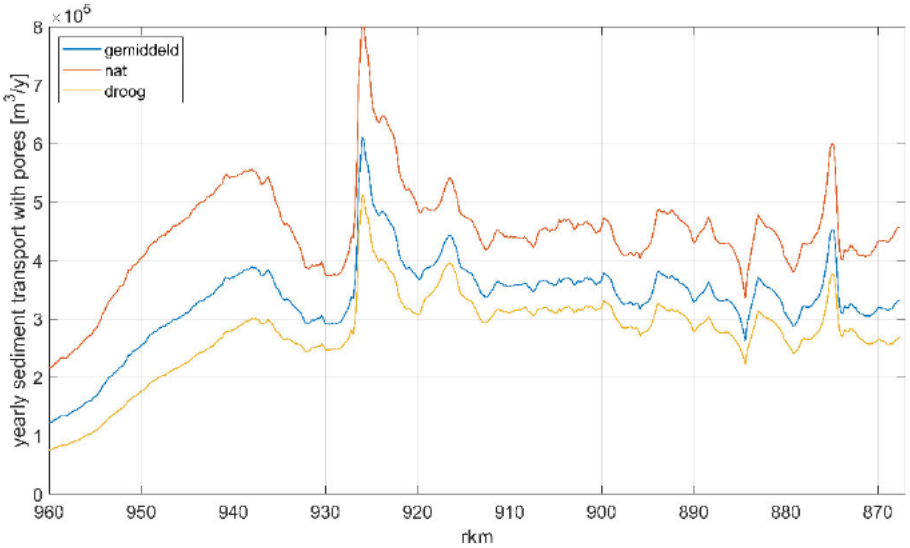
Bij een droger klimaat krijgen de lage afvoeren meer gewicht en daarmee de versmalling door de langsdammen of verlengde kribben. Daardoor zijn de maatregelpakketten bij een droger klimaat iets minder goed in staat om de transportgradiënt op te heffen. Bij een natter klimaat krijgen juist de middelhoge en hogere afvoeren meer gewicht en daarmee tikt het effect van de verruiming op jaarbasis zwaarder door. Daardoor wordt de transportgradiënt juist sterker teruggedrongen. In de variant met OG ontstaat tot aan rkm 910 zelfs een licht negatieve gradiënt, die voor lichte aanzanding zou zorgen. Echter worden in dat geval ook de pieken door ontbrekende verruiming en (bij UG) de dalen door dubbele verruiming vergroot.

Dit betekent dat de optimale dimensies van de oevergeulen of uiterwaardgeulen afhankelijk zijn van het toekomstige klimaat. Omdat dit niet bekend is, is het belangrijk om de geulen te ontwerpen op een manier die toestaat om in de toekomst aanpassingen te maken, bijvoorbeeld aan de hoogte van instroomdrempels of tussenopeningen. Of dit soort aanpassingen voldoende is om toekomstige klimaateffecten op te vangen moet nog nader worden onderzocht.

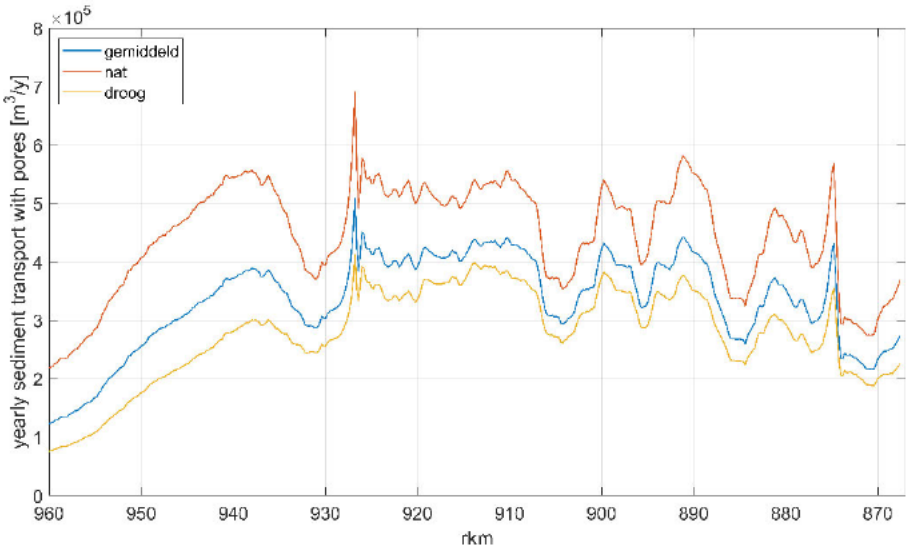
In Bijlage C.2 staan figuren voor de bijdrage per afvoerniveau aan de jaartransporten per hydrograaf. De verschillen ontstaan door de verschillende duur van elk afvoerniveau in de drie hydrografen.



Figuur 5-13 Schatting van het jaarlijks sedimenttransport (inclusief poriën) in de huidige situatie voor verschillende afvoerhydrografen, lopend gemiddelde van de 200-m-resultaten over 2 km.



Figuur 5-14 Schatting van het jaarlijks sedimenttransport (inclusief poriën) in de variant met OG voor verschillende afvoerhydrografen, lopend gemiddelde van de 200-m-resultaten over 2 km.



Figuur 5-15 Schatting van het jaarlijks sedimenttransport (inclusief poriën) in de variant met UG voor verschillende afvoerhydrografen, lopend gemiddelde van de 200-m-resultaten over 2 km.

5.6 Vaargeulonderhoud en geulonderhoud

De gebruikte methodiek is niet geschikt om aan te geven hoeveel vaargeulonderhoud de MGS-varianten zullen veroorzaken. Daarvoor is een analyse met een numeriek model nodig. Het is echter aannemelijk dat er door de geulen – zowel OG als UG – meer dynamiek in de rivierbodem ontstaat. Dit vanwege de vele locaties met complexe 2D- of 3D-stromingspatronen die zullen ontstaan bij de instroom- en uitstroomopeningen van de geulen, en door de overgangen van geulen op de ene kant van de rivier naar geulen op de andere kant. Er is daarom kans dat het vaargeulonderhoud toeneemt. Omdat de instroom en uitstroom van een oevergeul en een uiterwaardgeul principieel anders verlopen, en ook de uitwisseling van water tussen de hoofdgeul en de oever- of uiterwaardgeul, kan het voor het vaargeulonderhoud uitmaken voor welk type geul er gekozen wordt.

Hoeveel onderhoud er nodig zal zijn in de oevergeulen of uiterwaardgeulen kan op dit moment niet goed worden berekend met de beschikbare numerieke modellen. Er is niet voldoende bekend hoeveel sediment er vanuit de hoofdgeul in de oever- of uiterwaardgeulen terecht komt. De huidige numerieke modellen overschatten dit waarschijnlijk. Ook kan oevererosie met de beschikbare technieken nog niet goed worden berekend. Een analyse van de sedimentatie (en erosie) in bestaande oevergeulen en uiterwaardgeulen zou helpen om deze processen beter te begrijpen. Ook berekeningen met geavanceerdere numerieke modellen, zoals CFD-modellen met sedimenttransport, kunnen waardevolle inzichten leveren over hoeveel sediment er bij verschillende inlaatconstructies en aanstroomrichtingen de geul in getransporteerd kan worden. Deze technieken zijn nog niet geschikt voor grootschalige morfologische modellering van bijvoorbeeld het hele Rijntakkengebied. Maar er kunnen numerieke proeven mee uitgevoerd worden, die kunnen helpen inschattingen te doen. En er kunnen rekentechnieken voor grootschalige modellen worden afgeleid uit de resultaten van dit soort proeven met detailmodellen.

6 Effect MGS op rivierfuncties

6.1 Natuur

De aanleg van oevergeulen of uiterwaardgeulen zou een aanzienlijke verandering voor de riviernatuur kunnen betekenen. Door aanpassingen van de geometrie van het rivierbed zal de hydrodynamiek in het gebied veranderen. Denk daarbij aan veranderingen in overstromingsduren en stroomsnelheden. Veranderingen in rivierwaterstanden werken door op het grondwater. De scheiding tussen de oever- en uiterwaardgeulen enerzijds en de rest van het zomerbed anderzijds kan ook van invloed zijn op de riviernatuur (scheiding van functies).

6.1.1 Scheiding van functies vermindert de invloed van scheepvaart

Mosselman et al. (2021) hebben de impact van de bestaande oevergeulen bij Tiel geëvalueerd. Zij concluderen dat het scheiden van functies (hoofdgeul voor scheepvaart, oevergeul voor natuur) over het algemeen een positief effect heeft op macrofauna. Dit komt (mede) doordat de scheiding het effect van scheepsgolven vermindert en de sterkte van het propellergeluid dempt. Naar verwachting is het effect van uiterwaardgeulen nog beter. Waar bij de OG-variant enkel een langsdam de scheiding is (waar propellergeluid doorheen komt), is de scheiding tussen de uiterwaardgeul en de vaargeul veel groter.

6.1.2 Overstromingsduren - habitatdiversiteit

De potentiële ecotoopontwikkeling in een gebied wordt mede bepaald door de overstromingsduren (zie Tabel 6-1). In de effectbepaling van Nulalternatief IRM hebben Asselman et al. (2022a) de ruimtelijke verdeling van areaal horende bij verschillende overstromingsduurklassen in het rivierengebied in kaart gebracht. Zij geven op basis van de verandering in waterstanden ten opzichte van de referentie een indicatie van de verandering in overstromingsduren (zie Figuur 6-3 voor een voorbeeld).

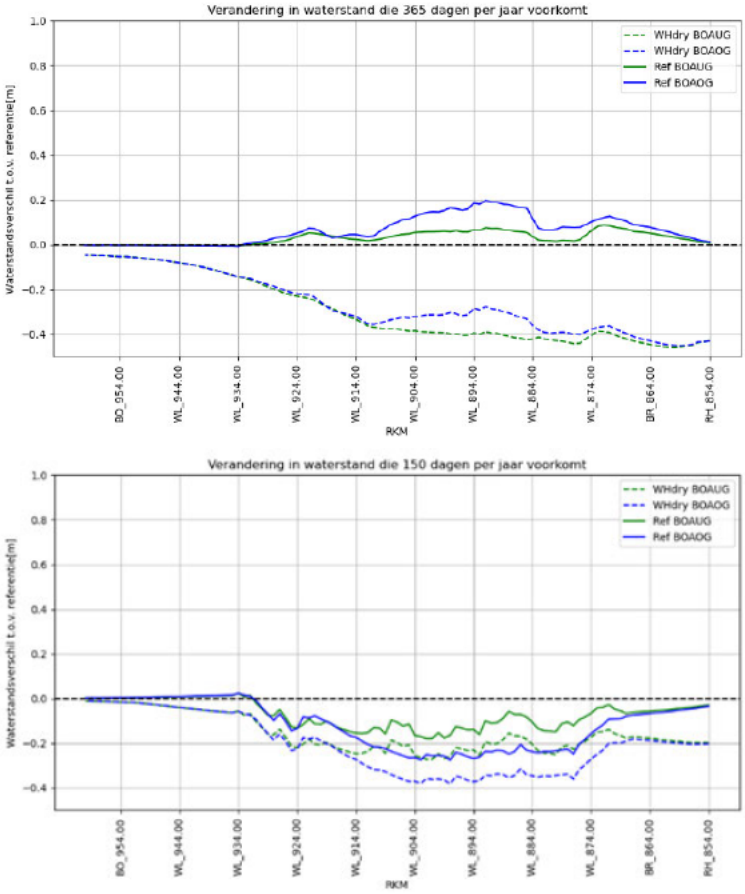
Tabel 6-1 Ecotoopgroepen per overstromingsduurcategorie (bron: Asselman et al., 2022a)

Habitat		PAGW
Ecotopen	overstromingsduur	Ecotopen
Drijf- en waterplantenzone	365 dgn	ondiep tot zeer diep rivierbegeleidend water en zomerbed
Helofytenzone	365 dgn	riet/moerasruigte
Droogvallende zone	150 – 365	geulen en strangen
Zachthoutzone	50 – 150 dgn	zachthoutooibos/struweel & nat grasland
Hardhoutzone (20-50)	20 – 50 dgn	hardhoutooibos
Hardhoutzone (2-20)	2 – 20 dgn	hardhoutooibos & droog grasland
Hoogwatervrije zone	0 – 2 dgn	
Bebouwd	-	bebouwd/verhard
Landbouw	-	productiegrasland/bouwland

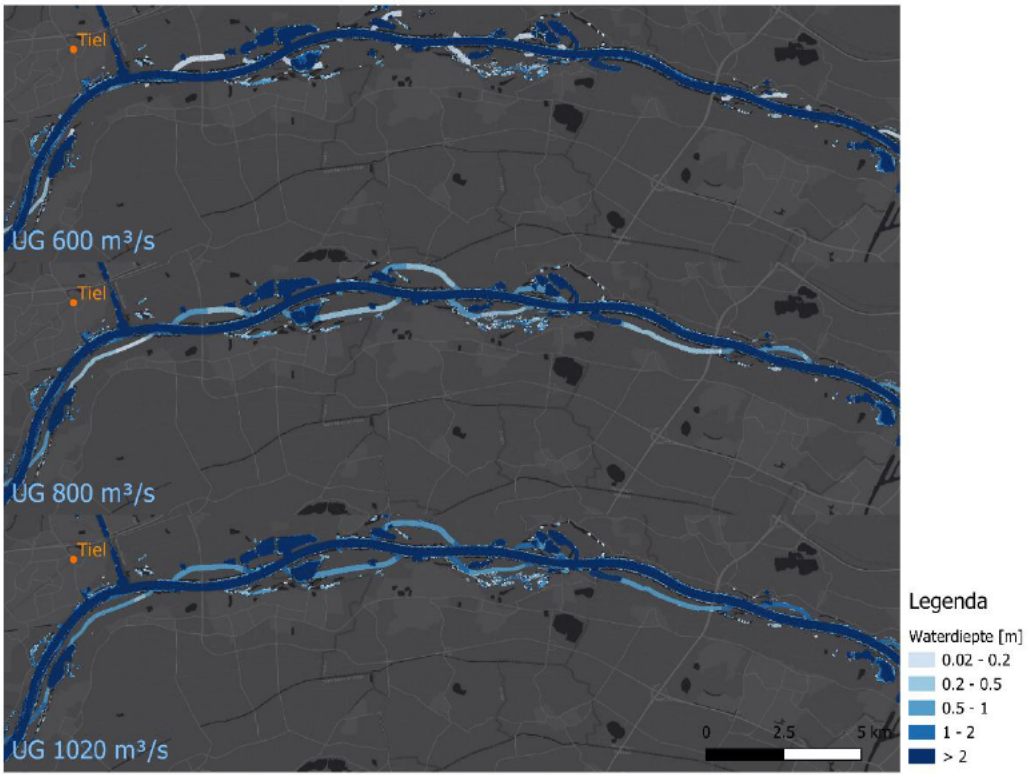
Zowel bij de OG als de UG-variant neemt het oppervlak dat 365 dagen per jaar overstroomt toe. De verwachting was dat die toename groter zou zijn bij de UG-variant dan bij de OG-variant. Echter, een deel van de geschematiseerde uiterwaardgeulen stroomt niet over de gehele lengte 365 dagen per jaar mee en valt daarmee in de klasse 150-365 dagen per jaar overstroomd.

Dit is te zien in Figuur 6-2, waar de waterdiepte bij 600, 800 en 1020 m^3/s is weergegeven. Bij 800 m^3/s zijn de uiterwaardgeulen allemaal nog nat, maar bij 600 m^3/s liggen ze voor een groot deel droog (ondanks de iets hogere waterstanden in de rivier bij deze afvoeren, zie Figuur 6-1).

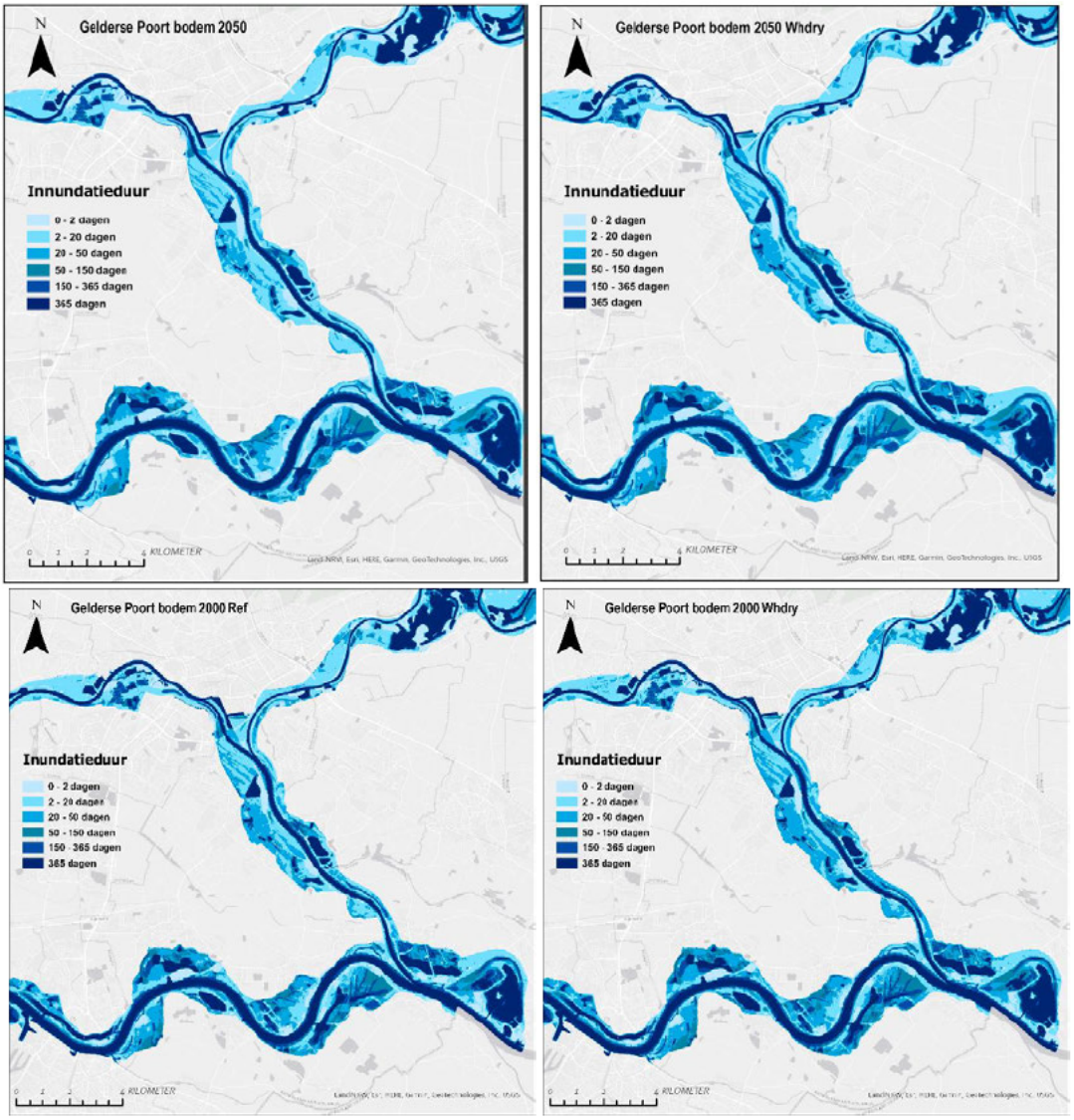
Bij alle overige overschrijdingsduren (150, 50, 20 en 2 dagen per jaar, zie Figuur 6-1 en bijlage D) is een afname te zien van de bijbehorende waterstanden. Toch is de verwachting dat dit bij de OG-variant niet zal leiden tot een grote verschuiving van areaal horende bij de verschillende overstromingsduren naar kortere overstromingsduren. We baseren dit onder meer op de overstromingsduren die zijn berekend bij de diverse bodemliggingen door Asselman et al. (2022b), waaruit bleek dat een aantal decimeters verschil in rivierwaterstand nauwelijks effect had op het areaal per overstromingsduurklasse. Dit komt mede doordat de overstromingsduurklassen zeer breed zijn (zie Tabel 6-1). Er is dus een zeer grote verandering in overstromingsduur nodig voordat dit leidt tot duidelijke verschillen in areaal per overstromingsduurklasse. Bij de UG-variant zal het areaal in deze overstromingsduurklasse wel toenemen door het doorsteken van de zomerkades.



Figuur 6-1 Verandering van de waterstand die 365 (boven) en 150 (onder) dagen per jaar wordt overschreden voor beide MGS-varianten ten opzichte van de referentiesituatie. Tevens is het effect van klimaatverandering (Whdry 2085) weergegeven.



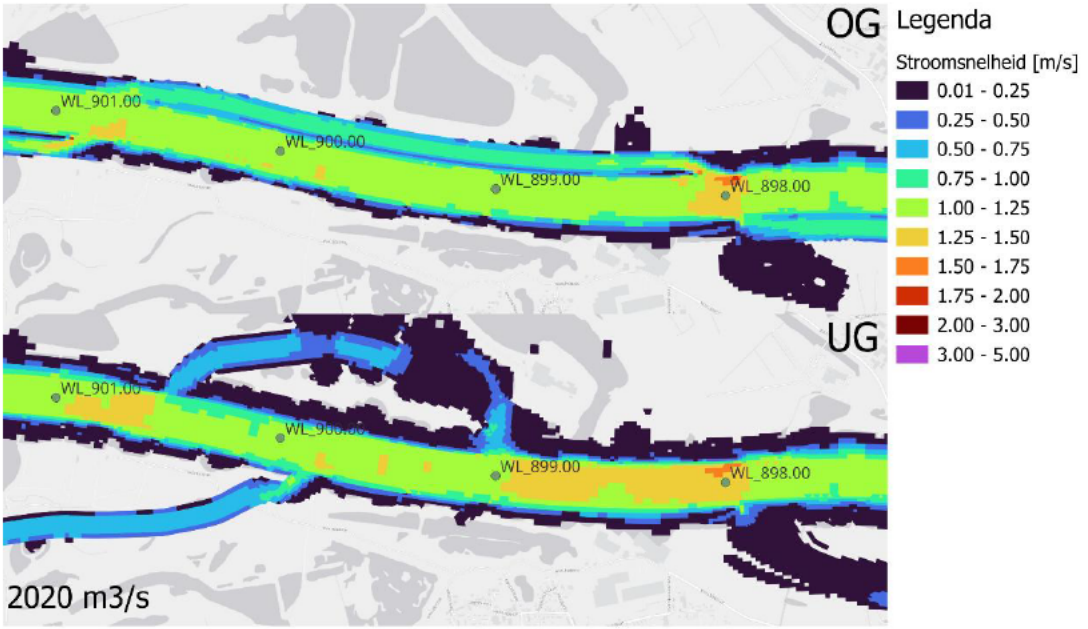
Figuur 6-2. Waterdiepte bij lage afvoeren (600, 800 en 1020 m³/s) in de UG-variant.



Figuur 6-3 Overstromingsduur van de uiterwaarden in de Gelderse Poort bij verschillende rivierbodemliggingen (boven in het jaar 2050, onder rond het jaar 2000) en klimaat (links het huidige klimaat, rechts WHdry). Het verschil in bodemligging was maximaal ~80 cm op de Boven-Waal, wat zich vertaalde in een waterstandsverschil van 50 cm bij lage afvoeren afnemend tot 20 cm bij hoge afvoeren. In deze figuren is geen rekening gehouden met zomerkades (bron: Asselman et al., 2022a,b).

6.1.3 Stroomsnelheden

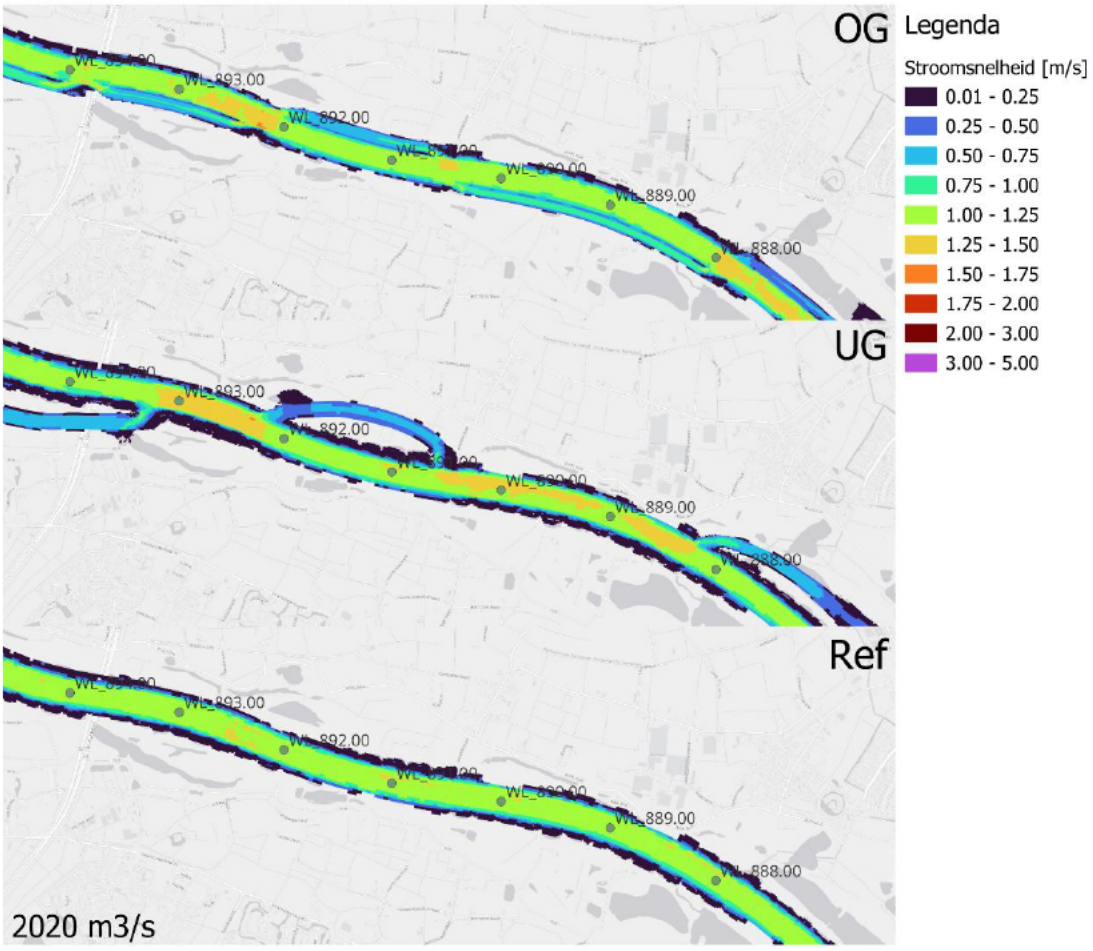
De stroomsnelheden in de aangelegde geulen zijn van belang voor de habitatcondities voor aquatische flora en fauna. De stroomsnelheden in de geulen zijn lager dan in de hoofdgeul. In Figuur 4-14 en Figuur 4-16 is te zien dat voor zowel de lage als middelhoge afvoeren de stroomsnelheden in de uiterwaardgeulen over het algemeen lager zijn dan in de oevergeulen. Dit is ook terug te zien in Figuur 6-5 waar de stroomsnelheden in de uiterwaardgeulen tussen 0 en 0,5 m/s liggen, en in de oevergeulen tussen de 0,5 en 1,5 m/s. Geerling & van Kouwen (2010) noemen dat grote delen van een nevengeul stroomsnelheden tussen 0 en 0,5 m/s zouden moeten bevatten. In de OG-variant worden deze stroomsnelheden dus al met relatief lage afvoeren overschreden (<2020 m^3/s), waardoor de UG-variant qua stroomsnelheden positiever zou zijn voor vissoorten.



Figuur 6-4 Stroomsnelheden bij in- en uitstroom van geulen.

In Figuur 6-4 en Figuur 6-5 is te zien dat in de uiterwaardgeulen de stroomsnelheden afnemen bij verbredingen in de geul, bijvoorbeeld wanneer de geul een bestaande plas kruist. De verbredingen dragen bij aan habitatheterogeniteit door verschillen in waterdieptes en stroomsnelheden in de geul. Hierdoor zijn de uiterwaardgeulen beter geschikt voor soorten die belang hebben bij lage (<0.5 m/s) stroomsnelheden.

In zowel de oever- als de uiterwaardgeulen zal aanzanding plaatsvinden. Hierbij komt de vraag op hoe vaak het nodig zal zijn om de oever- en uiterwaardgeulen uit te baggeren om zo de gewenste doorstroom te kunnen behouden. Wanneer het uitbaggeren frequent moet gebeuren, krijgt de natuur weinig kans om zich te ontwikkelen.



Figuur 6-5. Stroomsnelheden in de verschillende varianten bij een afvoer van 2020 m³/s bij Lobith.

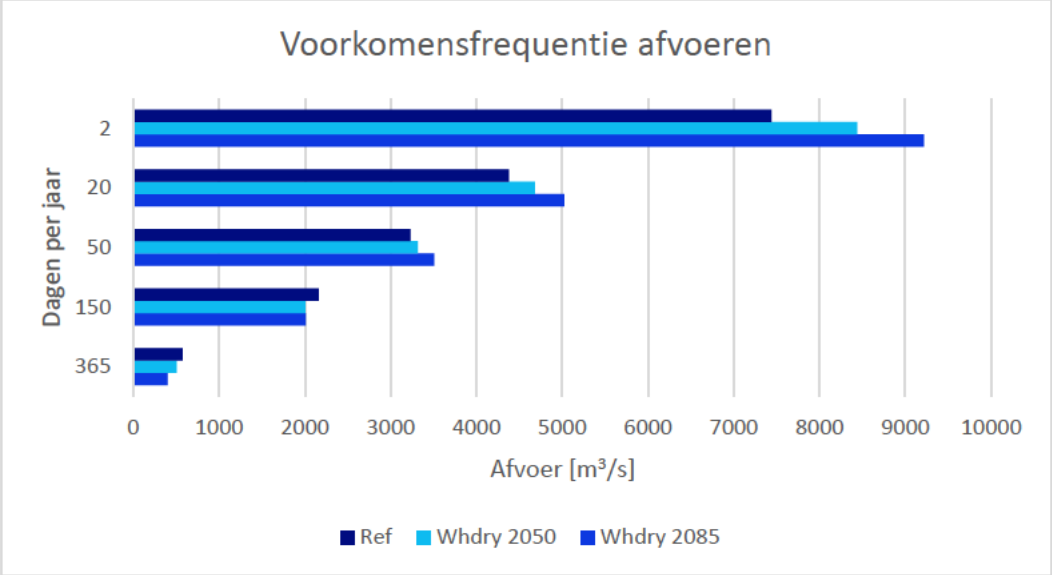
6.1.4 Grondwaterstanden

Doordat bij lage afvoeren de waterstand op de riviertakken in de OG-variant bijna overal omhoog gaat, zullen de grondwaterstanden nabij de rivier minder ver dalen dan in de huidige situatie (toename GLG in de uiterwaarden met ongeveer 5 cm). Bij midden-afvoeren (>2000 m³/s) zijn de waterstanden juist iets lager. Dit kan ook effect hebben op de grondwaterstanden (met name op de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand, GVG, en de gemiddeld hoogste grondwaterstand, GHG). Hoe groot dit effect is, is niet exact bekend, maar waarschijnlijk gaat het om maximaal een paar centimeter en zeker geen decimeters.

In de UG-variant kunnen de grondwatereffecten groter zijn. Door het graven van uiterwaardgeulen kunnen de uiterwaarden zowel naar de hoofdgeul als de uiterwaardgeul draineren, wat naar verwachting grondwaterstanden in de uiterwaarden verlaagt. Wanneer de rivierafvoer lager is dan 1020 m³/s te Lobith zullen de uiterwaardgeulen aan de bovenstroomse zijde niet instromen (in het doorgerekende ontwerp). De waterstand in de uiterwaardgeulen zal dan de waterstand van de benedenstroomse aantakking aannemen (die dan wel weer hoger is dan in de referentie). Om het drainerende effect te verminderen kan aan de benedenstroomse zijde een drempel worden aangelegd. Dit zou echter een negatief effect kunnen hebben op de effectiviteit van de uiterwaardgeulen bij hogere afvoeren.

6.1.5 Klimaatverandering

In Figuur 6-1 is de verandering van waterstanden horend bij een overschrijdingsduur ook weergeven bij het hoge klimaatscenario WHdry 2085 (KNMI '14 scenario's). In Figuur 6-6 zijn de bijbehorende afvoeren bij Lobith weergegeven. De verandering van het afvoerregime door klimaatverandering levert het volgende beeld op: de afvoeren en waterstanden die 365 en 150 dagen per jaar voorkomen nemen af, terwijl de afvoeren en waterstanden in de overige overstromingsduurklassen juist toenemen. De verwachting is echter dat het effect hiervan op de arealen per overstromingsduurklasse gering is (zie ook Figuur 6-3). Het verschil in overstromingsduren van de uiterwaarden wordt vooral bepaald door het wel of niet verwijderen van zomerkades. Wel zal het frequenter voorkomen van lagere afvoeren zorgen voor vaker droogvallende uiterwaardgeulen en het minder vaak mee stromen van oever- en uiterwaardgeulen.



Figuur 6-6. Afvoeren die een x aantal dagen per jaar overschreden worden bij een hoog klimaatscenario, voor verschillende zichtjaren.

6.1.6 Aandachtspunten

Voor zowel de UG- variant als de OG-variant zal het uiteindelijke ontwerp een belangrijke rol spelen op de effecten op natuur. In de huidige studie ten behoeve van de effectbepaling zijn twee specifieke opties uitgewerkt. De UG-variant zorgt hier bijvoorbeeld voor het doorsteken van zomerkades waardoor de uiterwaarden vaker zullen overstromen, maar als het doel is om de overstromingsduur van de uiterwaarden te vergroten zouden ook de zomerkades in de OG-variant doorgestoken kunnen worden. In de UG-variant zitten flauwere oevers met een bredere zone met ondiep water, maar ook bij de OG-variant kunnen de oevers breder en ondieper gemaakt worden, zeker aan de uiterwaardzijde van de geul.

6.2 Zoetwaterbeschikbaarheid

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 Pannerdensche Kop en IJsselkop. De verdeling wordt grotendeels bepaald door de geometrie van de rivieren benedenstrooms van deze verdeelpunten. Met een MGS in de Waal wordt deze verdeling beïnvloed: Bij lage afvoeren neemt de afvoer naar de IJssel toe ten koste van de Waal waar dit bij middelhoge en hoge afvoeren omdraait. Met name de verdeling van de afvoer bij laagwater is van groot belang voor de waterbeschikbaarheid voor onder andere de vullingsgraad van het IJsselmeer, de beschikbaarheid van drinkwater op innamepunten en het tegengaan van verzilting.

6.2.1 Afvoerverdeling laagwater

Door het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) is de voorlopig vastgestelde gewenste afvoerverdeling bij laagwater in grote lijnen gelijk aan die in de 2de Nota Waterhuishouding uit 1984. Dit houdt in dat bij afnemende afvoeren op de Rijn zo lang mogelijk, tot een afvoer van 1300 m^3/s bij Lobith, minimaal 285 m^3/s via de IJssel en 30 m^3/s via de Nederrijn wordt afgevoerd. Dat is bij deze Lobithafvoer circa 57 m^3/s extra naar de IJssel ten opzichte van de huidige situatie.

Een verschuiving van de afvoerverdeling, waarbij minder water wordt afgevoerd via de Waal en meer naar het Pannerdensch Kanaal, is wenselijk vanuit twee doelen:

- Bij zeer lage afvoeren (<1300 m^3/s) wil men de flexibiliteit in de verdeling vergroten, zodat het mogelijk is om extra water via de Nederrijn-Lek naar het westen te sturen om verzilting tegen te gaan.
- Bij afvoeren rond de 1300 en 1500 m^3/s wil men meer water via de IJssel afvoeren naar het IJsselmeer om de zoetwatervoorraad op peil te houden.

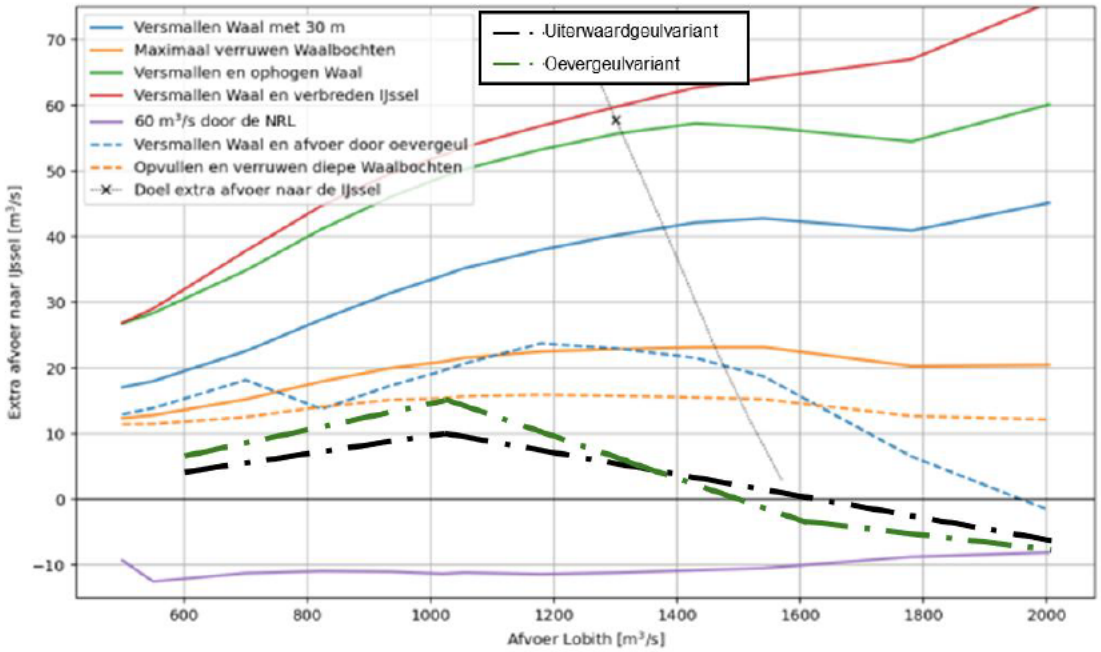
Het effect van de MGS-varianten op de extra afvoer naar de IJssel is weergegeven in Tabel 6-2 en Figuur 6-7. Met de doorgerekende varianten wordt er bij een afvoer van 1300 m^3/s maar 5 m^3/s extra afvoer naar de IJssel gerealiseerd. De extra afvoer wordt steeds minder naarmate de geulen op de Waal meer water trekken. Bij een afvoer van circa 2000 m^3/s stroomt er zelfs minder afvoer naar de IJssel dan in de huidige situatie. De maximale extra afvoer naar de IJssel wordt gerealiseerd bij een afvoer van 1020 m^3/s net voordat de geulen in de Waal mee beginnen te stromen. Deze bedraagt 10 en 14 m^3/s voor respectievelijk de uiterwaardgeulen- en oevergeulenvariant.

Tabel 6-2 Verandering van de afvoer naar de IJssel met de twee MGS-varianten. Afvoeren die meer dan 1% van de referentie afwijken zijn gekleurd in blauw (afname) en oranje (toename).

Afvoer Lobith (m^3/s)	IJsselafvoer (m^3/s)		
	Referentie	Uiterwaardgeulen	Oevergeulen
600	79	83	85
800	118	125	128
1020	165	175	179
1300	228	233	234
1400	251	254	254
1500	273	275	274

Afvoer Lobith (m^3/s)	IJsselafvoer (m^3/s)		
	Referentie	Uiterwaardgeulen	Oevergeulen
1630	302	301	300
2020	376	370	369

In Figuur 6-7 zien we dat de extra afvoer naar de IJssel bij MGS-varianten niet in de buurt komt van de beoogde extra afvoer naar de IJssel. Ondanks de maatregelen blijft er een verschil van 50 m^3/s bestaan bij een afvoer van 1300 m^3/s. In vergelijking met de maatregelen uit de studies van Asselman et al. (2025) en Gensen et al. (2025) over de afvoerverdeling bij lage afvoeren zorgen de MGS-varianten voor beduidend minder extra afvoer naar de IJssel. Dit geldt bij alle Lobith-afvoeren. Dit verschil wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de oevergeulen in de huidige studie eerder mee gaan stromen en doordat het zomerbed in de 2D studie van Gensen et al. (2025) iets meer is versmald (door uitlijning op het rooster). Overigens vonden Gensen et al. (2025) dat enkel een combinatie van maatregelen (versmallen van de Waal en verbreden van de Boven-IJssel) resulteert in het behalen van de boogde afvoerverdeling bij laagwater.



Figuur 6-7 Extra afvoer naar de IJssel als functie van afvoer bij Lobith. Dit is Figuur 5.1 uit Gensen et al. (2025) met toevoegingen van de extra afvoer naar de IJssel zoals berekend in deze studie voor de uiterwaardgeulen- en oevergeulenvariant.

Door optimalisatie van de versmalling van het zomerbed en het instroommoment van de oever- en uiterwaardgeulen is groter effect mogelijk op de afvoerverdeling bij laagwater. Denk hierbij aan het verhogen van de drempels in de meest bovenstrooms gelegen oever- en uiterwaardgeulen (deze hebben het grootste effect op de afvoerverdeling). Een dergelijke optimalisatie is in het kader van voorliggende studie nog niet uitgevoerd.

6.2.2 Vullingsgraad IJsselmeer en watertekort Noord-Nederland

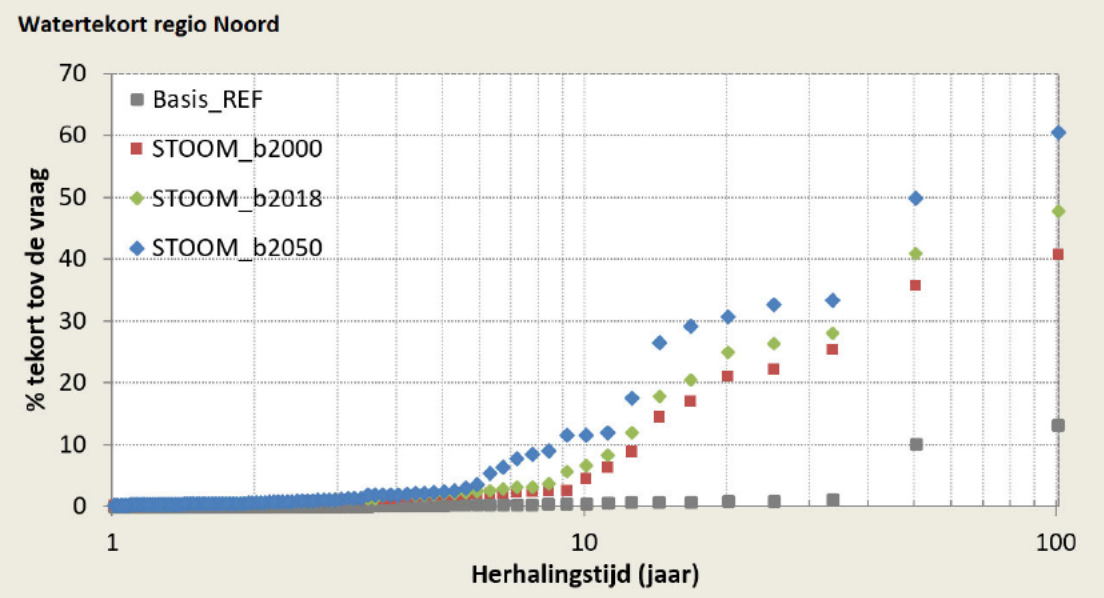
In tijden van langdurig lage afvoeren is het voor de waterbeschikbaarheid in Noord-Nederland van belang dat de vullingsgraad van het IJsselmeer op peil is. Bij een IJsselafvoer van 285 m^3/s kan gegarandeerd worden dat deze ook op peil blijft.

Dit komt overeen met een huidige afvoer tussen 1500 en 1600 m³/s bij Lobith. Bij beide MGS-varianten wordt er bij deze afvoeren geen extra afvoer naar de IJssel meer gerealiseerd. Het effect van het MGS voor de vullingsgraad van het IJsselmeer is dus zeer beperkt.

De afvoerverdeling bij lage afvoeren verschuift circa 15 m³/s bij OLA. Dit komt overeen met de verandering die eerder is berekend voor de bodemligging tussen 2000 en 2018 (Asselman et al., 2022b). Wel is een belangrijk verschil dat bij de bodemligging in 2000 de bodemophoging ook bij hogere afvoeren zorgt voor meer afvoer naar de IJssel dan dat we met de MGS-varianten zien. Het effect op de vullingsgraad van het IJsselmeer zal dus kleiner zijn dan berekend bij het IRM-nulalternatief.

Uit de analyse in Asselman et al. (2022b) blijkt dat er onder T20-droogte[7] in de huidige situatie (huidige bodemligging en klimaat) vrijwel geen watertekort optreedt in Noord-Nederland (grijze vierkantjes in Figuur 6-8). In het STOOM2050-scenario ontstaat echter een tekort van ongeveer 25% van de watervraag bij de huidige bodemligging (groene ruitjes). Wanneer de verschuiving in de afvoerverdeling wordt meegenomen zoals berekend bij de bodemligging uit het jaar 2000, neemt dit tekort af tot circa 21% (bodemligging 2000, rode vierkantjes). Omdat de doorgerekende MGS-varianten niet of nauwelijks effect hebben op de afvoerverdeling bij afvoeren van 1300 tot 1500 m³/s te Lobith, zal het positieve effect van het MGS kleiner zijn dan berekend voor de bodemligging uit het jaar 2000.

In de referentiesituatie komt een tekort van 5% van de watervraag statistisch eens per 40 jaar voor. Voor het STOOM2050-scenario verkort die herhalingstijd tot ongeveer eens per 8 à 9 jaar (groen). Met toepassing van MGS zou de herhalingstijd van het tekort vergelijkbaar blijven.



Figuur 6-8 Frequentieverdeling van het watertekort in Noord-Nederland met drie verschillende bodemliggingen. De MGS-varianten zijn het beste te vergelijken met STOOM_b2000.

[7] Een droogte die gemiddeld eens per 20 jaar wordt overschreden.

6.2.3 Waterinnamepunten

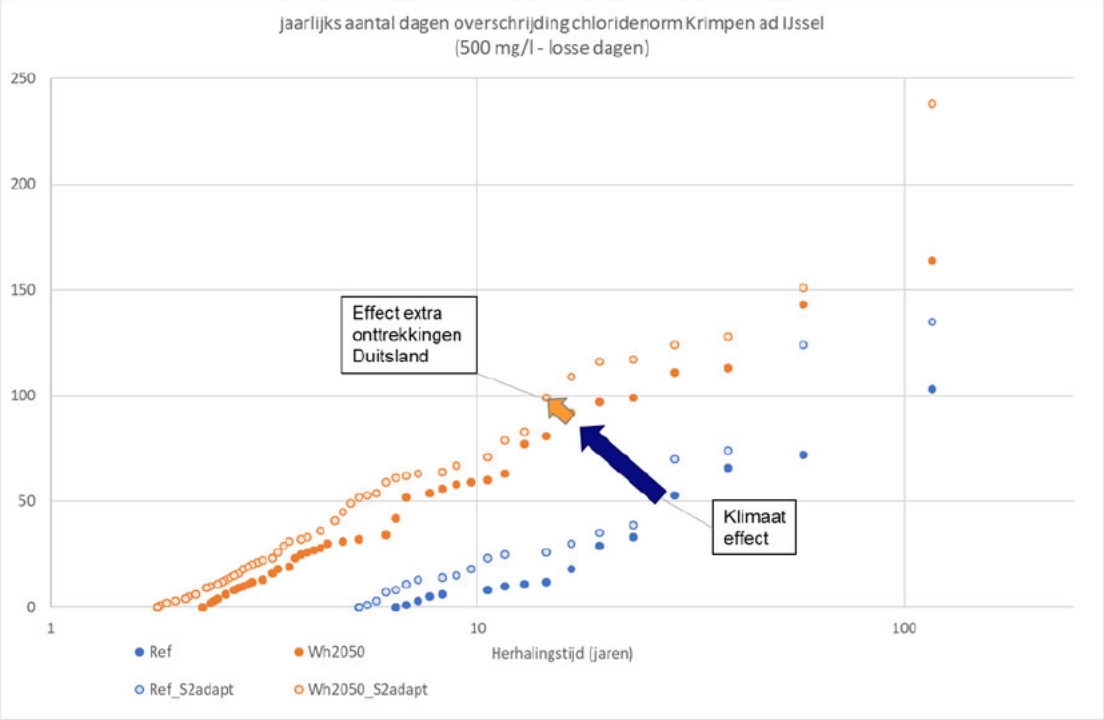
Het MGS verhoogt op nagenoeg alle riviertakken de waterstanden bij lage afvoeren. Hierdoor worden de benodigde waterstanden bij de inlaatpunten minder vaak per jaar onderschreden. De stijging van de waterstand op de IJssel is maximaal 15 cm ter hoogte van het inlaatpunt van het Twentekanaal. Voor de innamepunten langs de Waal (onder andere het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal, ARK) en de Lek bedraagt dit maximaal 20 cm. Het effect van klimaatverandering is echter dusdanig groter dan de met het MGS gerealiseerde waterstandsstijging dat deze inlaatpunten veel vaker per jaar te maken krijgen met een te lage waterstand.

6.2.4 Tegengaan verzilting

Voor het tegengaan van verzilting in West-Nederland is het belangrijk dat bij zeer lage afvoeren (<1300 m^3/s) voldoende water wordt aangevoerd via de Waal en de Nederrijn-Lek (via Driel of ARK-Betuwepand). Met het MGS stroomt er juist minder water naar West-Nederland, met een verschil tot maximaal 15 m^3/s. Asselman et al. (2022a) hebben bekeken wat de verschuiving van de afvoerverdeling doet voor de verzilting in West-Nederland. Zij rekenden niet aan de gevolgen voor verzilting maar lieten in een voorbeeld zien wat het gecombineerde effect is van klimaatverandering en veranderingen in de afvoerverdeling ten koste van de Waal. Het effect van klimaatverandering is het verschil tussen de blauwe en oranje bollen (Figuur 6-9). Daarnaast toont het verschil tussen de donkere en lichte bollen hoe de verzilting verder kan toenemen wanneer er 100 m^3/s minder water via de Waal wordt afgevoerd.

In de huidige situatie wordt de kritieke chloridegrens voor de waterinname bij Krimpen aan de IJssel gemiddeld eens in de 30 jaar gedurende minstens 50 dagen per jaar overschreden. Onder het *whdry2050*-scenario neemt deze kans toe tot ongeveer eens in de 7 jaar. Wanneer de Waalafvoer hypothetisch met 100 m^3/s afneemt, stijgt de overschrijdingskans verder naar circa eens in de 5 à 6 jaar.

Voor een MGS is dit effect aanzienlijk kleiner. Door de maatregelen neemt de Waalafvoer niet met 100 m^3/s af, maar met maximaal 15 m^3/s. Bovendien wil DPZW de extra afvoer naar het Pannerdensch Kanaal benutten om flexibeler te kunnen sturen. De extra afvoer kan dus alsnog via de Nederrijn-Lek naar het westen stromen. De invloed van een MGS op verziltingsrisico's blijft daardoor beperkt.



Figuur 6-9 Voorbeeld van jaarlijks aantal dagen overschrijding chloridenorm Krimpen a/d IJssel bij veranderend klimaat en extra wateronttrekking in Duitsland (uit Asselman et al., 2022a).

6.3 Bevaarbaarheid

De realisatie van een meergeulensysteem in de Waal verandert de toestand van het watersysteem en heeft daarom effect op de bevaarbaarheid. De hier besproken effecten zijn gebaseerd op de analyses uit de effectbepaling van het IRM-nulalternatief (Asselman et al., 2022a,b). De gebruikte methode is daarom ook gelijk aan die in het IRM-nulalternatief, aangevuld met een beschouwing op de te verwachten dwarsstroming. De resultaten focussen op de verschillen tussen de twee meergeulensysteemvarianten en de huidige referentiesituatie. Ook wordt er een doorkijk gegeven naar het effect van klimaatverandering. De toegepaste methode is terug te vinden in hoofdstuk 3.

6.3.1 Waterdiepte bij 1020 m^3/s (de huidige OLA)

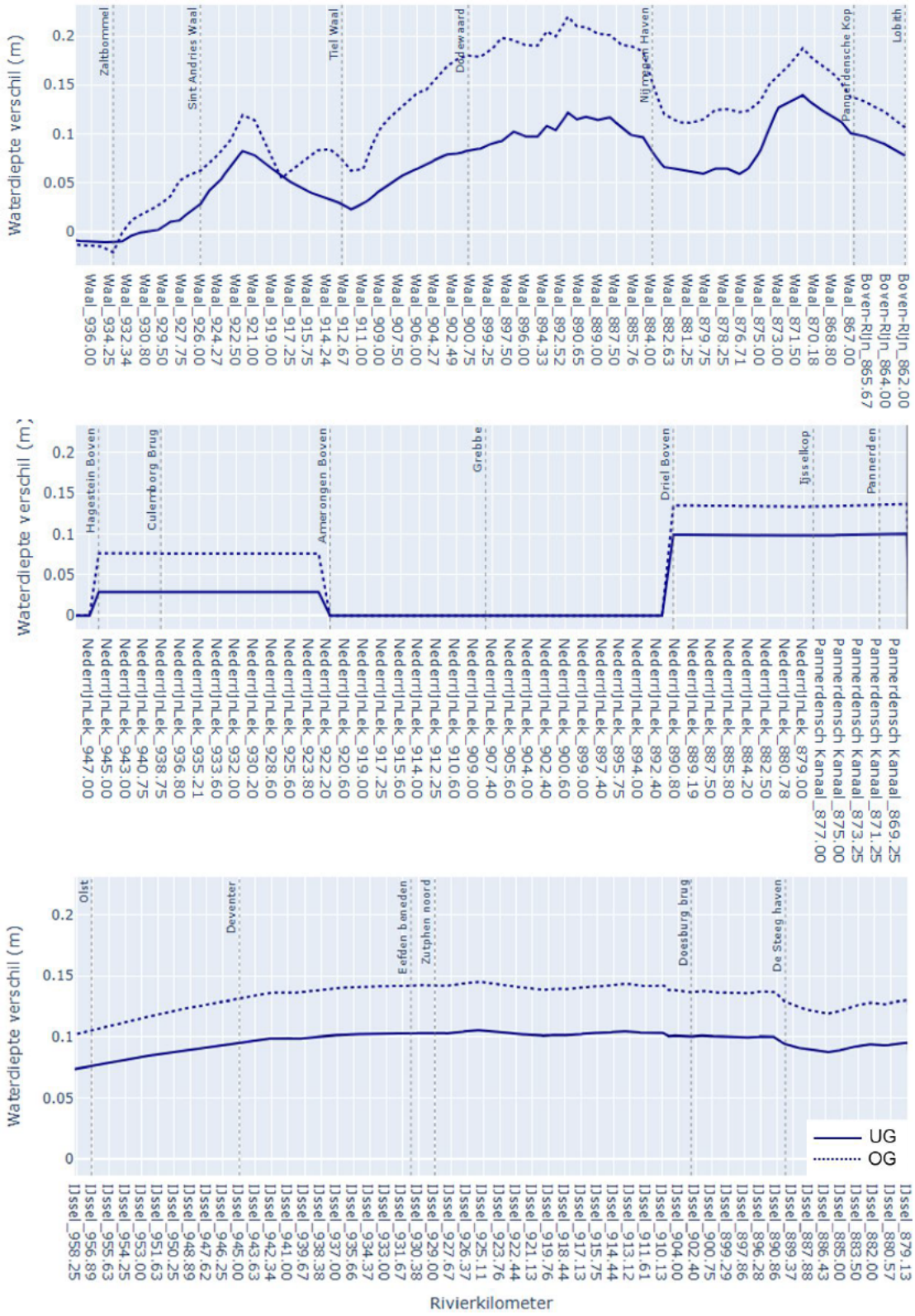
De minimale waterdiepte is per vak van ~300 m bepaald voor alle afvoeren en langs de hele rivier zonder morfologische veranderingen aan de bodem. Figuur 6-10 geeft een selectie van de resultaten. We vergelijken in deze paragraaf de verandering ten opzichte van de referentiesituatie.

Bij OLA leidt het MGS tot een toename van de waterdieptes op alle riviertakken, met uitzondering van de Beneden-Waal waar geen maatregelen zijn getroffen. De toename van de waterdiepte is terug te voeren op het opstuwende effect van de langsdammen en de kribverlenging op de Waal met als gevolg een verschuiving in de afvoerverdeling. Omdat morfologische veranderingen buiten beschouwing zijn gelaten, is de waterdieptetoename gelijk aan de waterstandstoename. Dit betekent dat bij de oevergeulen de waterdieptes met 10 tot 20 cm toenemen en bij de uiterwaardgeulen met 5 tot 10 cm. Met name op de Midden-Waal is het effect zo'n 10 cm kleiner bij de uiterwaardgeulenvariant. Op de IJssel neemt de vaardiepte met ongeveer 10 tot 15 cm toe (bij deze afvoeren geldt op de IJssel dat 1 m^3/s verandering in rivierafvoer zorgt voor 1 cm waterstandsverandering).

Door het toenemen van de waterdieptes neemt met de huidige bodem het aantal locaties dat niet voldoende waterdiepte heeft af. Voor de Waal zijn dit in de huidige situatie 5 locaties (vakken van ~300 m) en dit wordt teruggebracht naar 2 bij de UG-variant en 1 bij de OG-variant. Het laatst overgebleven knelpunt is de ondiepte benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen. Daar neemt de waterdiepte weliswaar met 10 en 18 cm toe voor respectievelijk de UG- en de OG-variant, maar blijft deze nog steeds onder de vereiste 2,8 m bij OLA. Op de IJssel worden door de implementatie van de geulen meerdere knelpunten opgelost die te ondiep zijn (minder dan 2,5 m vaardiepte bij OLA). Momenteel zijn het 59 plekken. Het aantal wordt gereduceerd tot 31 (UG) en 19 (OG). Tabel 6-4 geeft voor drie locaties in de Waal (Nijmegen en Sint Andries) en de IJssel (Velp) de verandering in waterdiepte bij meerdere afvoeren weer. Bij Sint Andries voldoet de waterdiepte momenteel al en de waterdieptes bij de MGS-varianten zijn nagenoeg gelijk. Bij Velp wordt nu niet voldaan aan de vereiste vaardiepte. Ook met de implementatie van een MGS wordt er nog net niet voldaan aan de eis van 2,5 m waterdiepte. Echter, met klimaatverandering zullen er vaker lage afvoeren voorkomen waardoor de OLA verder afneemt en daarmee ook de waterdieptes. Dit effect is naar verwachting groter dan het MGS-effect op de waterstand (zie paragraaf 6.3.2).

Door de aanleg van de geulen verandert ook de morfodynamiek in de rivier. Dit heeft invloed op de bodemligging en daarmee de vaardiepte. Mogelijk ontstaan er hierdoor nieuwe lokale ondieptes die de bevaarbaarheid belemmeren. Om een uitspraak te doen over waar deze veranderingen plaats gaan vinden is het nodig om een morfologische studie uit te voeren.

Uit de morfologische effectbepaling (hoofdstuk 5) blijkt dat fluctuaties in de stroomsnelheden zorgen voor variaties in de sedimenttransportcapaciteit. Op locaties waar te veel is verruimd neemt de stroomsnelheid af en daarmee ook de transportcapaciteit. Op deze delen kan dan sedimentatie optreden. Bij de uiterwaardgeulen zijn de jaargemiddelde fluctuaties groter dan bij de oevergeulen. Impliciet gaan we er bij deze effectbepaling vanuit dat lokale aanzandingen worden weggebaggerd.



Figuur 6-10 Langsdoorsnede van het waterdiepteverschil bij een afvoer van 1.020 m³/s bij Lobith tussen de MGS-varianten en de huidige situatie. Overal wordt de waterdiepte groter bij OLA. Boven: Boven-Rijn tot en met Midden-Waal; midden: Pannerdensch Kanaal en Nederrijn; onder: Boven-IJssel.

Tabel 6-3 Aantal locaties op de Waal en de IJssel waar de waterdiepte in de vaarweg onvoldoende is bij OLA in het huidige klimaat.

OLA (1020 m³/s) – Huidige bodemligging	Waal	IJssel
	# Locaties <2,8 m	# Locaties <2,5 m
Referentie	5	59
Uiterwaardgeulen	2	31
Oevergeulen	1	19

Tabel 6-4 Waterdieptes op huidige knelpunten bij verschillende afvoeren. Tussen haakjes staat de vereiste waterdiepte bij OLA (1020 m³/s).

Lobith (m³/s)	Nijmegen (rkm 885) (2,8 m)			St Andries (rkm 926) (3,02m)[8]			Velp (rkm 884) (2,5 m)		
	Ref	UG	OG	Ref	UG	OG	Ref	UG	OG
600	1,32	1,38	1,49	2,95	2,95	2,97	1,25	1,32	1,36
800	1,84	1,92	2,05	3,17	3,18	3,21	1,86	1,95	1,99
1020	*2,35*	*2,45*	*2,53*	*3,44*	*3,45*	*3,48*	*2,36*	*2,46*	*2,49*
1300	2,96	3,00	2,93	3,75	3,75	3,79	2,90	2,94	2,96
1400	3,17	3,20	3,08	3,90	3,88	3,93	3,09	3,12	3,12
1500	3,38	3,40	3,24	4,06	4,03	4,07	3,28	3,30	3,29
1630	3,65	3,65	3,47	4,26	4,22	4,24	3,53	3,52	3,68
2020	4,39	4,32	4,16	4,90	4,82	4,80	4,27	4,21	4,37
2500	4,70	4,60	4,48	5,14	5,07	5,06	4,13	4,08	4,07
3220	5,56	5,39	5,31	5,83	5,75	5,76	4,97	4,83	4,84

6.3.2 Onderschrijding van de minimale vaardiepte – nu en in de toekomst

Voor de Boven- en Midden-Waal is een vereiste waterdiepte van 2,8 m vastgelegd bij de OLA, voor de IJssel is dit 2,5 m. Voor de Boven-Rijn – Waal en de IJssel is het berekende aantal dagen dat de vereiste vaardiepte wordt onderschreden weergegeven in Tabel 6-5, Figuur 6-11 en Figuur 6-12.

In deze figuren zien we hetzelfde beeld als hiervoor: met de implementatie van een meergeulensysteem op de Waal neemt het aantal dagen onderschrijding van de vereiste vaardiepte op zowel de Waal als de IJssel af. Voor de Waal wordt in het huidige klimaat (en bij de huidige bodemligging) de vereiste vaardiepte enkel bij Nijmegen nog te vaak onderschreden (meer dan 20 dagen per jaar). De onderschrijding neemt wel af van 47 naar 43 dagen per jaar.

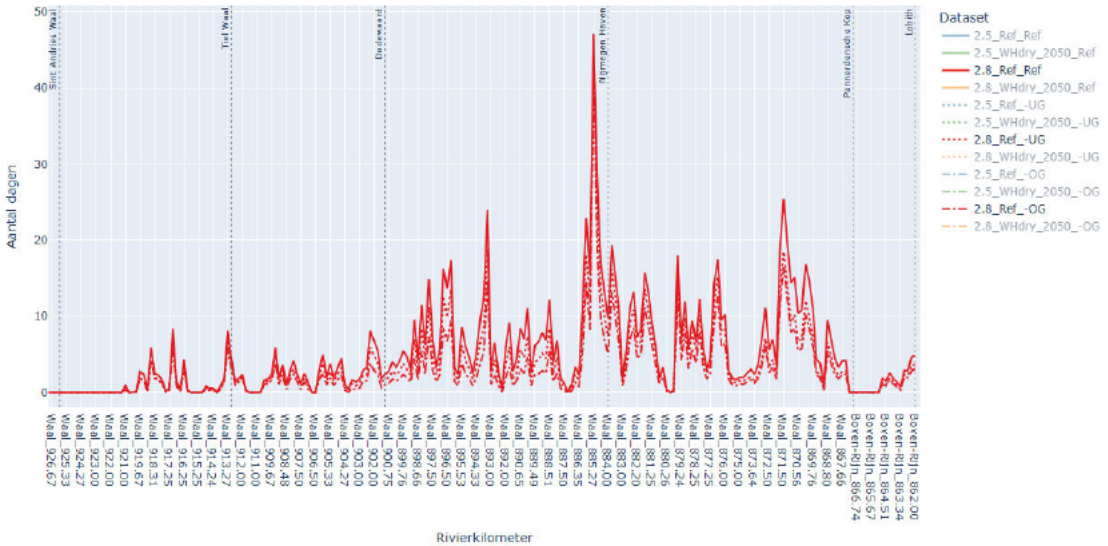
[8] St Andries = overgangsgebied tussen OLR en overeengekomen lage waterstand (OLW) (Richtlijn Vaarwegen, 2020) waardoor er met een andere waterdiepte wordt gewerkt dan 2,8 m bij OLA. Het Rivierkundig Beoordelingskader 6.0 (Rijkswaterstaat, 2023) (pg 100) geeft aan dat de minimale waterdiepte bij St.Andries 3,02 cm is.

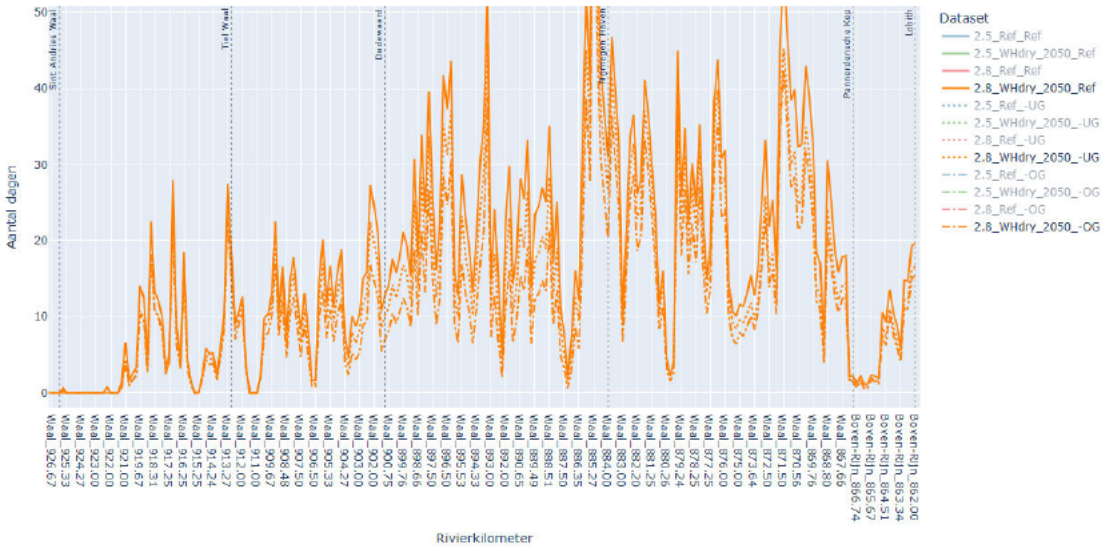
Wanneer in de toekomst het klimaat en daarmee de Rijnafvoer veranderen zien we dat er, in het geval van een hoog klimaatscenario, veel locaties bijkomen die niet voldoen aan de vereiste vaardiepte. Een doorkijk met klimaatscenario WH_{dry} (zichtjaar 2050) laat zien dat ondanks de aanleg van een meergeulensysteem het aantal locaties dat niet voldoet toch toeneemt van 2 of 1 naar 64 of 48 (Figuur 6-11 en Figuur 6-12). In de situatie zonder MGS neemt dit toe tot 90 locaties. Dit komt doordat bij dit klimaatscenario de OLA, berekend over de bij WH_{dry} behorende afvoerreeks, afneemt van 1020 m^3/s naar 825 m^3/s wat zorgt voor een afname van OLR met ongeveer 50 cm. Ofwel: door klimaatverandering kan de vaardiepte bij OLA met 50 cm afnemen. Dit is meer dan de toename door een MGS. Voor de vaste laag bij Nijmegen neemt de onderschrijding ook met een MGS toe tot 78 dagen per jaar in 2050. Zonder MGS zou dat 82 dagen zijn. Het effect van extreme klimaatverandering is dus vele malen groter dan de waterstandsverandering door een MGS.

De KNMI'23-scenario's laten een vergelijkbare afname van OLA zien als het KNMI'14-scenario WH_{dry}. Al is de OLA voor het vergelijkbare droge scenario (Hd) in 2050 wel hoger, namelijk 914 m^3/s. Dit zorgt voor ongeveer 30 cm hogere waterstanden bij OLR bij het Hd-scenario dan bij het WH_{dry}-scenario. Dit komt echter vooral doordat de huidige OLA volgens het KNMI'23-referentiescenario hoger is. Figuur 6-13 geeft de verschuiving van de OLA weer zoals berekend voor de KNMI'14- en KNMI'23-scenario's. De afname van OLA tot 2050 is vergelijkbaar (de lijnen lopen parallel), maar de OLA in de referentiesituatie ligt bij de KNMI'23-scenario's hoger.

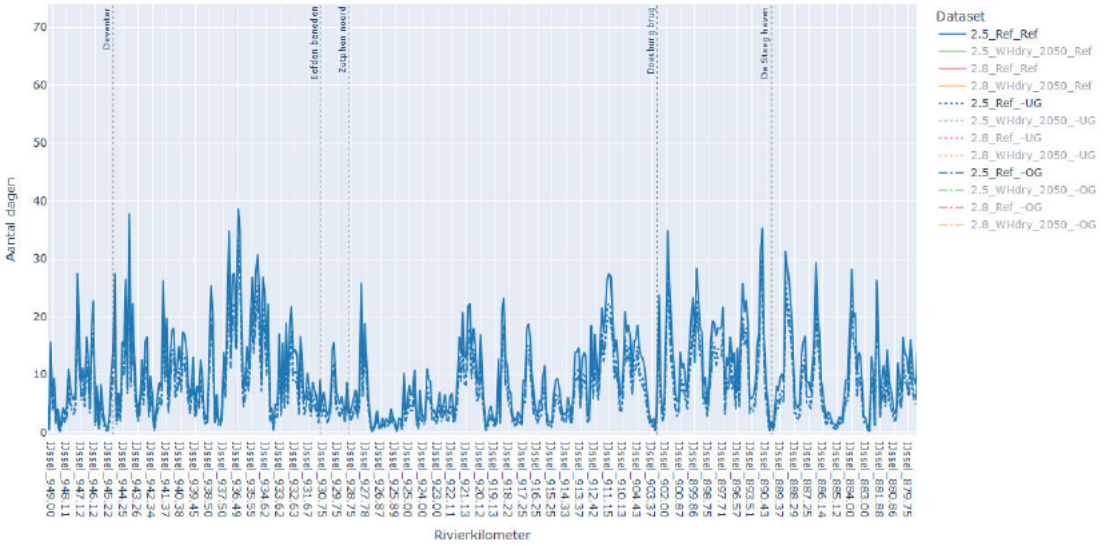
Tabel 6-5 Aantal locaties op de Waal en de IJssel waar de vereiste waterdiepte meer dan 20 dagen per jaar wordt onderschreden in het huidige klimaat en WHdry 2050.

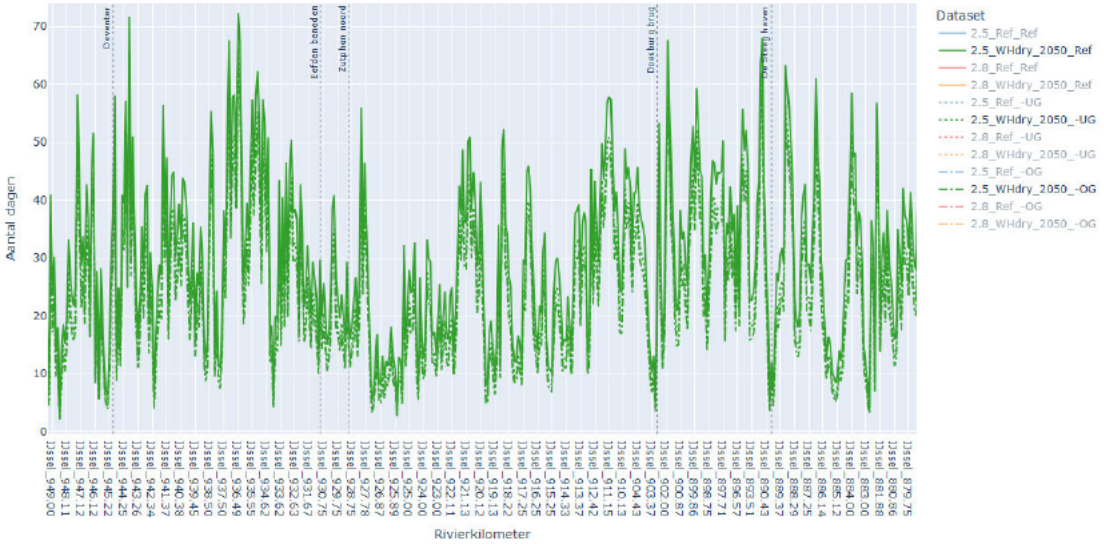
OLA (1020 m^3/s) – Huidige bodemligging	Huidig klimaat		*WHdry* 2050	
	Waal	IJssel	Waal	IJssel
	# Locaties <2,8m	# Locaties <2,5m	# Locaties <2,8m	# Locaties <2,5m
Referentie	5	56	90	391
Uiterwaardgeulen	2	30	64	320
Oevergeulen	1	15	48	283



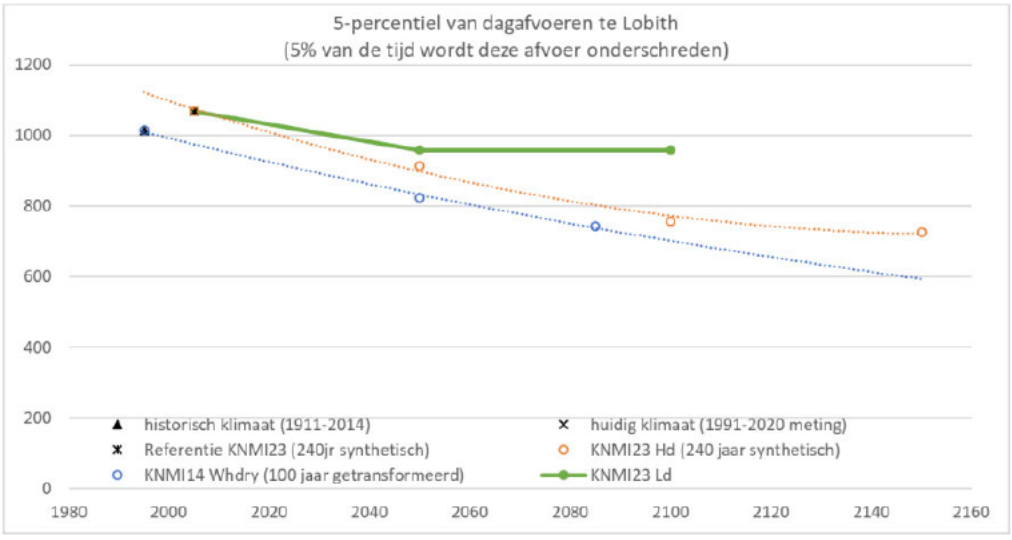


Figuur 6-11 Langsdoorsnede van de Boven-Rijn tot en met de Midden-Waal. Weergegeven is het aantal dagen dat de gewenste waterdiepte van 2,8 m niet gehaald wordt. De rode lijnen hebben betrekking op het huidige klimaat (boven), de oranje lijnen op veranderd klimaat – Whdry 2050 (onder). Het effect van de UG- en OG-varianten is aangegeven met stippellijnen.





Figuur 6-12 Langsdoorsnede van de IJssel. Weergegeven is het aantal dagen dat de gewenste waterdiepte van 2,8 m niet gehaald wordt. De rode lijnen hebben betrekking op het huidige klimaat (boven), de oranje lijnen op veranderd klimaat – Whdry 2050 (onder). Het effect van de UG- en OG-varianten is aangegeven met stippellijnen.



Figuur 6-13 Rijnafvoer die 5% van de tijd wordt onderschreden, als indicator voor de Overeengekomen Lage Afvoer (OLA). De blauwe lijn geeft de projectie volgens het KNMI'14-scenario Whdry; de oranje lijn geeft de projectie volgens het KNMI'23-scenario Hd. (Uit: ter Maat et al., 2024)

6.3.3 Bereikbaarheid van havens en sluizen

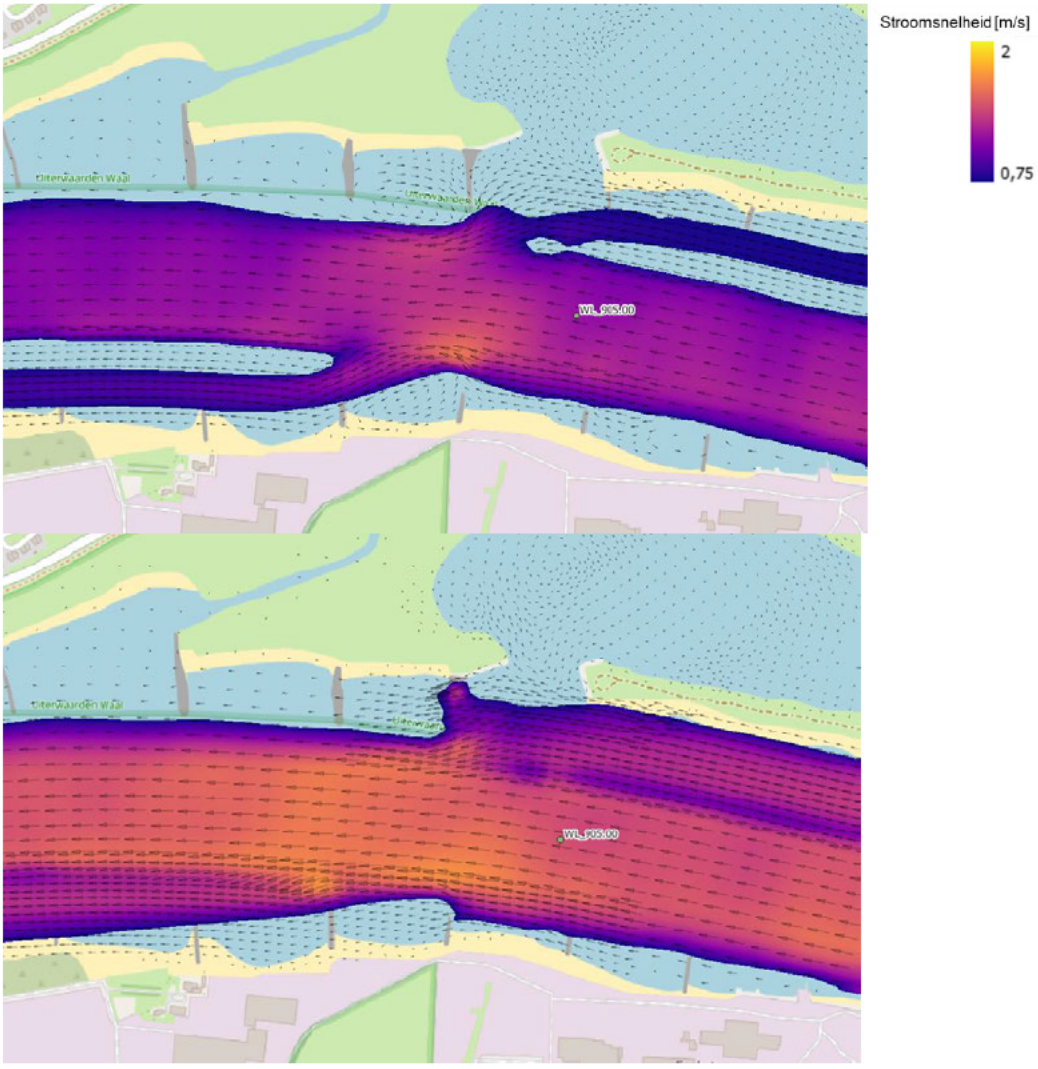
In het IRM-nulalternatief is ook aandacht besteed aan de bereikbaarheid van havens en sluizen. Hieruit kwam naar voren dat voor Sluis Weurt en de Prins Bernhardsluis (Deventer) de waterdiepte vaak onvoldoende is bij OLA. Op deze locaties gaat de waterstand bij OLA tussen 10 en 20 cm omhoog door de MGS-varianten waarmee het aantal dagen onderschrijding afneemt. Ook hier geldt dat het effect van sterke klimaatverandering groter is dan de waterstandstoename door het MGS.

6.3.4 Dwarsstroming

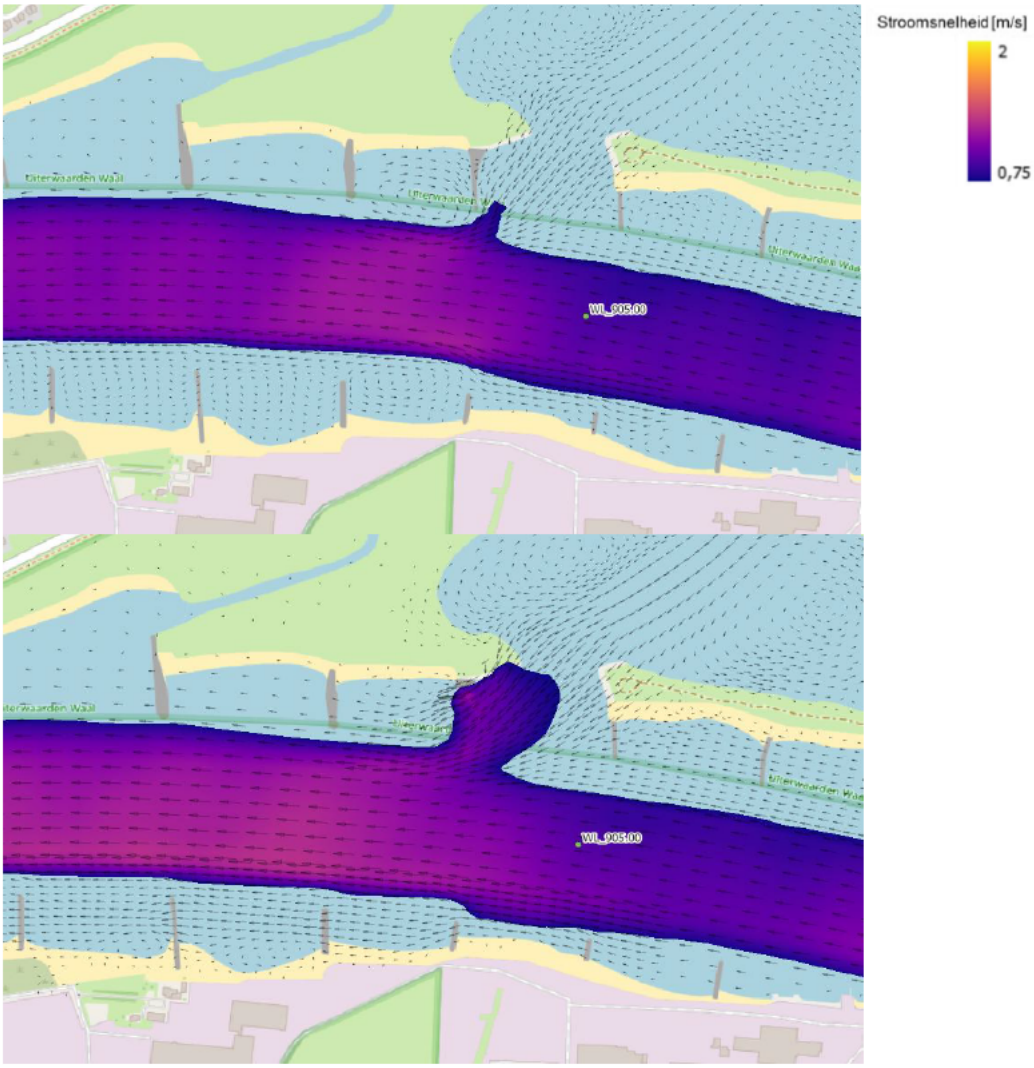
Door het aanleggen van geulen ontstaan er dwarsstromen vanuit de geulen naar de hoofdgeul. Deze dwarsstroming mag als gevolg van de ingreep niet te groot worden om zo de bevaarbaarheid te garanderen.

In zones waar dwarsstroming optreedt schrijft de Richtlijnen Vaarwegen (Rijkswaterstaat, 2020) voor dat de dwarsstroomsnelheid aan de rand van de vaarweg bij afvoeren boven 50 m³/s niet hoger mag zijn dan 0,15 m/s. Wanneer de afvoer lager is dan 50 m³/s, wordt een grotere dwarsstroomsnelheid van maximaal 0,30 m/s toegestaan.

Het model suggereert dat de dwarsstroming beperkt blijft tot de oeverzone en daardoor beperkt invloed heeft op de vaarweg. Het effect bij oevergeulen is iets groter dan bij uiterwaardgeulen omdat de stroomsnelheden bij het uitstroompunt in de oevergeulen hoger zijn. Er lijken geen hoge stroomsnelheden in de dwarsrichting op te treden: de snelheid haaks op de vaargeul blijft kleiner dan 0,3 m/s. Bij toenemende afvoer wordt de omvang van de dwarsstroming kleiner ten opzichte van de hoofdstroming. Om de dwarsstroomdebieten en -snelheden uit de geulen beter te kwantificeren en te bepalen hoe dit de bevaarbaarheid in de vaargeul beïnvloedt, zijn aanvullende analyses nodig.



Figuur 6-14 Voorbeeld van dwarsstroming bij oevergeulen bij een afvoer van 2020 m³/s (boven) en 4350 m³/s (onder). De pijlen geven de stroomrichting gaan (combinatie van x en y component).



Figuur 6-15 Voorbeeld van dwarsstroming bij uiterwaardgeulen bij een afvoer van 2020 m³/s (boven) en 4350 m³/s (onder). De pijlen geven de stroomrichting gaan (combinatie van x en y component).

6.4 Waterveiligheid

6.4.1 Waterstandsverlaging

Met de realisatie van een meergeulensysteem wordt er in de Waal grootschalig verruimd. Hierdoor daalt de waterstand op de Waal (Figuur 6-16), ondanks dat de afvoer toeneemt (Tabel 6-6). Op de Nederrijn-Lek en de IJssel neemt de afvoer af, wat ook daar resulteert in een waterstandsdaling. In algemene zin pakt een MGS daarmee positief uit voor de waterveiligheid, wanneer gekeken wordt naar de resulterende waterstanden (Figuur 6-16).

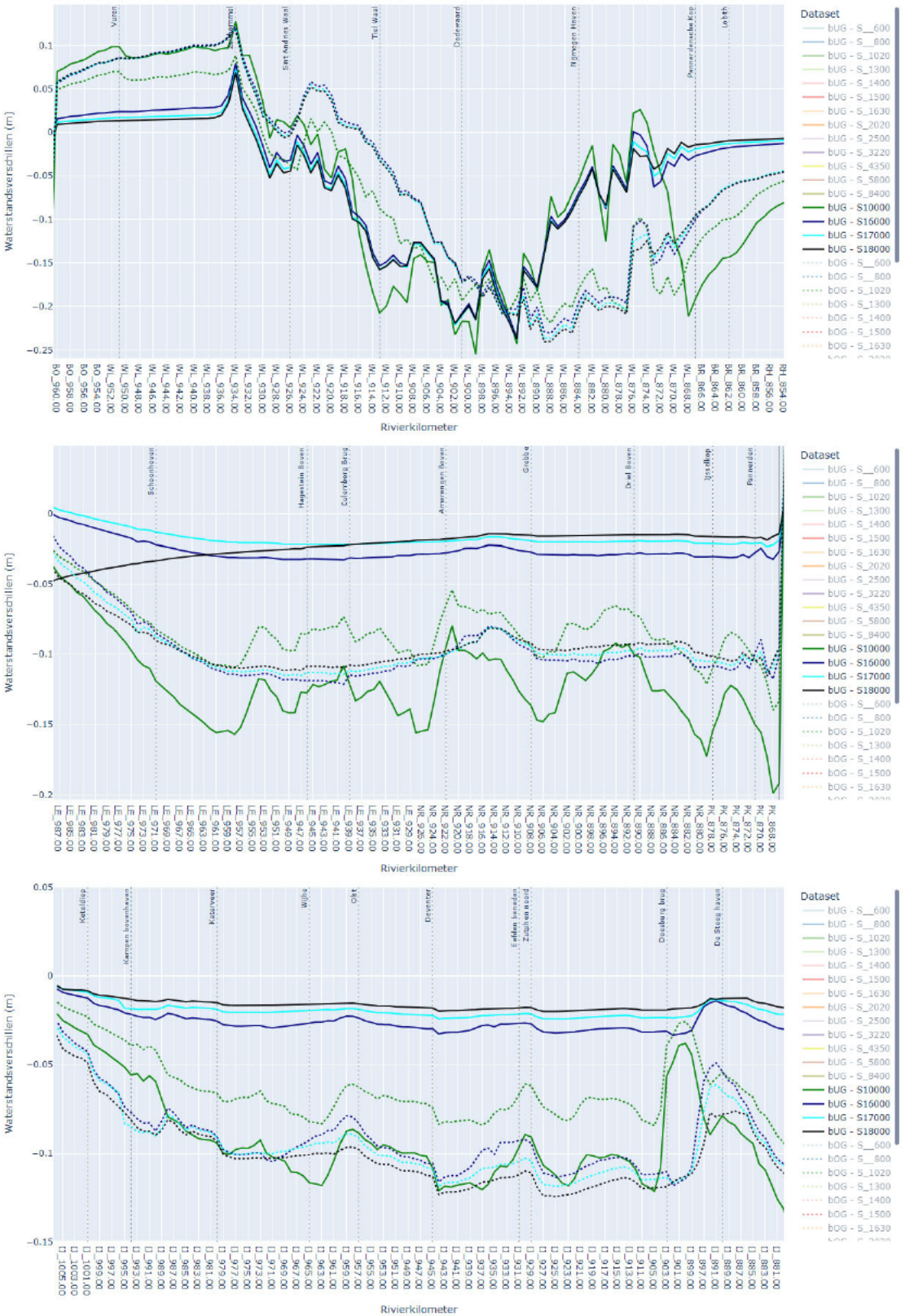
- In de uiterwaardgeulenvariant treedt een maximale daling van zo'n 25 cm op, met name op de Midden-Waal tussen rkm 877 en 918. De waterstandsdaling wordt in benedenstroomse richting langzaam minder en ter hoogte van Sint Andries is deze weer gelijk aan de huidige situatie. Op de Nederrijn-Lek en de IJssel zorgt deze variant voor een waterstandsverlaging van zo'n 10 cm (10.000 m^3/s) en maximaal 3 cm bij hogere afvoeren. De afname van het waterstand verlagende effect heeft te maken met de verschuiving van de afvoerverdeling bij (extreem) hoge afvoeren (zie de volgende paragraaf).
- In de oevergeulenvariant werkt de waterstandsdaling zelfs door tot in Duitsland, zo'n 5 tot 10 cm. Op de Midden-Waal zien we een maximale verlaging van circa 25 cm bij de hoogste afvoeren, aflopend naar nul bij Tiel (ligging van de huidige oevergeulen). Op de Boven-Waal is de waterstandsverlaging zo'n 15 tot 20 cm meer dan bij de uiterwaardgeulenvariant. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door de geschematiseerde kribverlenging (zonder verlaging). Doordat bij de OG-variant de afvoer naar de Waal sterk toeneemt zorgt dit voor een waterstandsdaling van zo'n 10 cm over de gehele loop van de Nederrijn-Lek en IJssel.

Benedenstrooms van de laatste oever- of uiterwaardgeul ontstaat een lichte waterstandsverhoging op de Beneden-Waal en de Boven-Merwede. Hier is niet verruimd maar de afvoer door de Waal neemt wel toe bij hoge afvoeren. Dit leidt tot een waterstandsstijging van maximaal 5 cm in de uiterwaardgeulenvariant en 10 cm in de oevergeulenvariant. In benedenstroomse richting neemt de toename af. Op de Nederrijn-Lek en de IJssel zien we een waterstandsverlaging over de gehele lengte van de rivier.

Onder het KNMI'14-scenario WHdry neemt de kans op extreme afvoeren in de toekomst verder toe. Het MGS verlaagt weliswaar in het grootste deel van het riviergebied de waterstanden, maar deze verlaging is onvoldoende om het effect van het extreme klimaatscenario volledig te compenseren.

Tabel 6-6 Afvoerverdeling bij hoge afvoeren. Afvoeren die meer dan 1% van de referentie afwijken zijn gekleurd in blauw (afname) en oranje (toename). Verschillen groter dan 10 m^3/s tussen de twee varianten zijn dik gedrukt weergegeven.

	Waal			Nederrijn			IJssel		
Afvoer Lobith (m^3/s)	**Ref**	**UG**	**OG**	**Ref**	**UG**	**OG**	**Ref**	**UG**	**OG**
8400	5706	**5872**	5816	1542	1453	**1483**	1152	1079	**1105**
10000	6681	**6898**	6834	1922	1792	**1831**	1401	1314	**1339**
16000	10240	10295	**10438**	3203	**3176**	3109	2564	**2534**	2460
17000	10760	10800	**10959**	3426	**3407**	3334	2820	**2798**	2713
18000	11276	11309	**11480**	3645	**3631**	3556	3098	**3080**	2983



Figuur 6-16 Verandering van de waterstand bij extreem hoge afvoeren op de Waal (boven), de Nederrijn-Lek (midden) en de IJssel (onder) voor de uiterwaardgeulenvariant (lijn) en oevergeulenvariant (stippellijnen).

6.4.2 Afvoerverdeling hoogwater

Voor de huidige referentieafvoer van 16.000 m^3/s worden de regelwerken ingesteld voor een afvoerverdeling zoals vastgelegd in de Planologische Kernbeslissing (PKB) Ruimte voor de Rivier (Tabel 6-7; Ministerie Verkeer & Waterstaat, 2006). In de werkhypothesen voor RvdR2.0 is opgenomen dat het zogenoemde surplus (de extra afvoer boven de 16.000 m^3/s te Lobith) verdeeld zal worden over de Waal en de IJssel (Rijkswaterstaat & DG Water en Bodem, 2024). Ook is de werkhypothese dat de verdeling tussen de 80/20 (80% naar de Waal en 50% naar de IJssel) en 50/50 zal komen te liggen. In de studie *'Doorrekening afvoerverdeling bij hoogwater'* hebben de Bake et al. (2025) geëvalueerd hoe rivierverruiming de gewenste verdeling van het surplus tot stand kan brengen. In deze paragraaf wordt gereflecteerd op de invloed van het MGS op de beleidsmatige afvoerverdeling, en hoe dit het bereiken van ofwel een 50/50- of een 80/20-verdeling van het surplus zal beïnvloeden.

Voor de duiding van de in deze studie berekende verdelingen zijn twee aspecten rond de modellering van belang:

- De regelwerken staan in de middenstand. Er stroomt daardoor in de referentie bij 16.000 m^3/s ongeveer 65 m^3/s meer water naar de Waal dan gewenst volgens de beleidsmatige verdeling.
- Door de roosterverfijning zijn de waterstanden op de Waal in de referentiesituatie in het gebruikte model iets lager. Daardoor stroomt er in de referentie al 12 m^3/s meer afvoer naar de Waal dan voorheen berekend is bij een afvoer van 16.000 m^3/s met de regelwerken in de middenstand.

In het totaal gaat hierdoor in de referentiesituatie 77 m^3/s meer water naar de Waal dan gewenst volgens de beleidsmatige afvoerverdeling van 16.000 m^3/s te Lobith.

Het effect op de afvoerverdelingen ten opzichte van de referentie geeft een beeld van hoeveel de maatregelen de afvoerverdeling veranderen. In Tabel 6-7 is te zien dat bij 16.000 m^3/s in de doorgerekende MGS-varianten meer water naar de Waal stroomt ten opzichte van de referentie: 55 m^3/s in de UG-variant tot ~200 m^3/s in de OG-variant. Bij de afvoer van 18.000 m^3/s gaat het om ~30 m^3/s in de UG-variant tot ~200 m^3/s de OG-variant. Het relatieve effect van de MGS-varianten om extra afvoer naar de Waal te trekken neemt dus af bij hogere afvoeren, met name in de UG-variant.

De extra afvoer naar de Waal betekent wel dat het behalen van de beleidsmatige afvoerverdeling bij 16.000 m^3/s met de OG-variant niet meer mogelijk wordt zonder aanvullende maatregelen om water richting het Pannerdens Kanaal en de IJssel te sturen. Er gaat nu ~250 m^3/s afvoer te veel naar de Waal ten opzichte van de beleidsmatige verdeling (Tabel 6-7). De Bake et al. (2025) hebben berekend dat het openzetten van allebei de regelwerken zorgt voor een afname van de Waalafvoer van ~220 m^3/s. Ook wanneer beide regelwerken volledig open worden gezet zal er dus nog ~30 m^3/s te veel water naar de Waal stromen. In de UG-variant zou volgens de modeluitkomsten nog wel voldoende kunnen worden bijgestuurd met de regelwerken om de beleidsmatige afvoerverdeling bij 16.000 m^3/s te bewerkstelligen.

Tabel 6-7 Afvoerverdeling bij 16.000 m³/s in vergelijking met de beleidsmatige verdeling. In de rechterkolom de uitkomsten uit de Bake et al. (2025).

Afvoerverdeling bij 16.000 m³/s					
Riviertak	**Beleidsmatig [m³/s]**	**Referentie [m³/s]**	**UG [m³/s]**	**OG [m³/s]**	**Studie HKV OG [m³/s]**
Waal	10165	10240	10295	10438	10328
Nederrijn	3376	3203	3176	3109	3159
IJssel	2459	2564	2534	2460	2513

De Bake et al. (2025) hebben de OG-variant ook los doorgerekend. In deze studie is het rooster rondom de geulen niet extra verfijnd en zijn de geulen minder ver stroomafwaarts en stroomopwaarts doorgetrokken (zie bijlage C.1.1 van de Bake et al., 2025, voor de gebruikte uitgangspunten). In Tabel 6-8 en Tabel 6-9 is te zien dat de OG-variant uit de huidige studie meer water naar de Waal trekt dan in de studie van de Bake et al. (2025), terwijl de UG-variant minder water naar de Waal trekt. Het verlagen van de verlengde kribben in de UG-variant zou zorgen voor extra afvoer richting de Waal.

Tabel 6-8 Effect van de maatregelen op de afvoer per riviertak bij 16.000 m³/s. Dit betreft een verandering van afvoer ten opzichte van de referentieberekening van de desbetreffende studie. In de rechterkolom de uitkomsten uit de Bake et al. (2025).

Effect van maatregel ten opzichte van referentie 16.000 m³/s			
Riviertak	**UG [m³/s]**	**OG [m³/s]**	**Studie HKV OG [m³/s]**
Waal	55	198	141
Nederrijn	-27	-94	-67
IJssel	-30	-104	-74

Tabel 6-9 Afvoerverdeling bij 18.000 m³/s in vergelijking met de beleidsmatige verdeling. In de rechterkolom de uitkomsten uit de Bake et al. (2025).

Afvoerverdeling bij 18.000 m³/s						
Riviertak	**Surplus 80/20 [m³/s] ten opzichte van beleidsmatige verdeling bij 16.000 m³/s**	**Surplus 50/50 [m³/s] ten opzichte van beleidsmatige verdeling bij 16.000 m³/s**	**Referentie [m³/s] met regelwerken in de middenstand**	**UG [m³/s]**	**OG [m³/s]**	**Studie HKV OG [m³/s]**
Waal	11765	11165	11276	11309	11480	11328
Nederrijn	3376	3376	3645	3631	3556	3606
IJssel	2859	3459	3098	3080	2983	3050

De 80/20-verdeling van de afvoer boven de 16.000 m^3/s (het surplus) kan met geen van de doorgerekende MGS-varianten worden gerealiseerd (Tabel 6-10). Met de regelwerken in de middenstand komt de OG-variant met een 66/26-verdeling nog het dichtst in de buurt (9% van het surplus gaat naar de Nederrijn). Uitgaande van een regelbereik van ~220 m^3/s zou echter ook bij deze variant aanvullende verruiming op de Waal nodig zijn om een 80/20-verdeling van het surplus mogelijk te maken. Voor de referentie en de UG-variant geldt dat nog meer verruiming nodig is op de Waal. Met de OG-variant wordt het wel lastiger om een 50/50-verdeling te realiseren. Dit zou extra verruiming vragen op de Boven-IJssel. Zoals ook uit de studie van De Bake et al. (2025) bleek is het volledig ontzien van de Nederrijn met regelwerken in de middenstand een uitdaging.

Tabel 6-10 Procentuele verdeling van het surplus (verschil 16.000 – 18.000 m^3/s te Lobith) in vergelijking met de beleidsmatige verdeling zoals vastgelegd in de PKB Ruimte voor de Rivier.

Riviertak	Beleidsmatig vastgelegd in PKB	Referentie	UG	OG
Waal	80	56	57	66
Nederrijn	0	13	13	9
IJssel	20	32	31	26

6.4.3 Effect op de dijkversterkingsopgave – hoogte en kwelweglengte

In deze effectbepaling is niet kwantitatief gekeken naar de effecten voor de dijkversterkingsopgave. Daarom wordt gebruikt gemaakt van de analyses uit Asselman et al. (2022a) bij de bodemligging 2050. Net zoals het meergeulensysteem resulteert de bodemligging 2050 ook nagenoeg overal in een waterstandsdaling, met uitzondering van de Beneden-Waal. Wel is de waterstandsverlaging op de Midden-Waal zo'n 10 cm groter dan bij de bodemligging 2050. Dit geldt voor de oevergeulvariant ook op de Nederrijn en de IJssel. Hieruit kunnen we concluderen dat de versterkingsopgave van het verhogen van de keringen minder groot wordt met de doorberekende MGS-varianten. Hierbij laat de oevergeulenvariant een gunstiger beeld zien dan de uiterwaardgeulenvariant.
Het effect op de totale opgave zal naar verwachting echter beperkt zijn. Uit de effectbepaling van het IRM-nulalternatief kwam naar voren dat de dijkversterkingsopgave grotendeels wordt bepaald door het op orde komen voor de nieuwe normering en klimaatverandering. Het effect van de lagere waterstanden speelt hier slechts een heel kleine rol.

Voor het Rijn-Maasmondingsgebied resulteert het MGS in een waterstandsstijging van maximaal 5 cm op de Merwedes bij afvoeren vanaf 10.000 m^3/s te Lobith. Dit neemt af in benedenstroomse richting. Naar verwachting heeft dit dus een beperkt effect op de versterkingsopgave in dit gebied.

Verder werd leiden de lagere waterstanden tot iets lagere kosten voor dijkversterking. De dijken hoeven iets minder hoog te worden. Het effect op de macrostabiliteit- en pipingopgave is minimaal omdat deze twee opgave niet of nauwelijks afhankelijk zijn van de waterstand. De kostenbesparing als gevolg van de doorgaande rivierbodemerosie bepalen Asselman et al. (2022a) echter op minder dan 1% van de totale kosten voor hoogwaterbescherming in het huidige RvdR2.0-gebied. Wel moet opgemerkt worden dat met een MGS op alle riviertakken waterstandsverlaging wordt gerealiseerd in plaats van over kortere trajecten door bodemdaling. Dit resulteert in een iets grotere afname van de kosten maar zal beperkt blijven tot maximaal enkele procenten van de totale dijkversterkingsopgave.

Een belangrijk verschil ten opzichte van het IRM-nulalternatief is dat de geulen van het MGS dichter bij de bestaande dijk wordt aangelegd. Hierdoor neemt de kwelweglengte af. Het intredepunt wordt immers verlegd richting de dijk. De aanname is dat een geul die binnen 500 meter van de kering ligt altijd effect zal hebben op kwel onder de dijk en daarmee de kans op piping zal vergroten. Het verwachte effect is groter bij uiterwaardgeulen aangezien deze over het algemeen dichter bij de kering worden aangelegd dan oevergeulen. Bij oevergeulen kan dit vooral spelen op trajecten waar het winterbed relatief smal is.

Uit de tekensessies kwam naar voren dat de volgende uiterwaardgeulen aangemerkt kunnen worden als gevoelig voor kwel en piping (zie Figuur 2-4 voor de ligging van de geulen):

- UG4 (Bisonbaai)
- UG13
- UG14
- UG15
- UG18

Om de toegenomen kans op kwel tegen te gaan dienen er mitigerende maatregelen genomen te worden. Dit kan middels constructieve oplossingen zoals kwelschermen of kleilagen op kwelgevoelige dieptes. Sommige uiterwaardgeulen liggen langs onlangs versterkte dijktrajecten aan de noordkant van de Waal. Dit zou betekenen dat deze nogmaals aangepakt moeten worden.

6.4.4 Effect op mogelijke vorming van ijsdammen

Het mogelijke ontstaan van ijsdammen in strenge winters vormt een afzonderlijke factor bij de veiligheid tegen overstromingen. Tegenwoordig treden ijsdammen nauwelijks meer op dankzij de eerder uitgevoerde normaliseringswerken, opwarming van het klimaat, en lozingen van koelwater en afvalwater. Toch verdienen ze blijvende aandacht in het rivierbeheer. In de pilot langsdammen in de Waal (Mosselman et al., 2021) is onder andere gekeken naar het effect van langsdammen op de vorming van ijsdammen. Hieruit kwam naar voren dat gestrekte rivierwerken zoals langsdammen het ijs juist beter geleiden dan de bestaande kribben. Aandacht verdient wel de grotere voorraad ijs die zich kan vormen in een groter areaal aan oever- en uiterwaardgeulen. Bij dooi en stijgende afvoer kan dit ijs op drift raken. Als deze grotere hoeveelheid ijs verderop vastloopt, groeit een ijsdam sneller.

7 Wat leren we van deze casestudie?

In deze effectbepaling is ingezoomd op twee specifieke onderzoeksvarianten van een meergeulensysteem, één met uiterwaardgeulen in combinatie met kribverlenging (UG) en een ander met oevergeulen (OG) in combinatie met langsdammen. Er zijn echter veel meer varianten met combinaties van oever- en uiterwaardgeulen en versmallingen door middel van langsdammen of verlengde kribben mogelijk. Daarbij kan ook op talloze manieren worden gevarieerd met de mate van versmalling en het moment waarop de geulen mee gaan stromen. Om te komen tot een algemene conclusie over het effect van een MGS moeten we daarom eerst uitzoomen en algemene lessen trekken. Stel dat we alle onvolkomenheden in de nu gebruikte MGS-varianten op zouden lossen en mogelijk combineren tot een geoptimaliseerd ontwerp, wat zou dan het effect kunnen zijn van een MGS?

7.1 Het effect van MGS op systeemniveau

Het doorrekenen van deze twee specifieke meergeulensysteem-varianten leert ons veel over de werking van een meergeulensysteem in algemene zin. In de voorgaande hoofdstukken is op detailniveau ingezoomd op de twee onderzoeksvarianten. Om tot algemene conclusies te komen zoomen we hier weer uit. Hieronder worden voor de hydraulica, de rivierbodemerosie en de rivierfuncties de belangrijkste lessen genoemd en hoe een MGS kan bijdragen aan het oplossen van de bestaande opgaven.

7.1.1 Hydraulica

De beschouwde ontwerpen met uiterwaardgeulen en oevergeulen geven voor hydraulica een duidelijk algemeen beeld weer. Bij beide varianten zien we namelijk soortgelijke effecten op alle riviertakken. Deze effecten zijn niet uniform over het afvoerbereik:

- Bij lage afvoeren wanneer de geulen niet mee stromen leidt het versmallen van het zomerbed met langsdammen of kribverlenging voor hogere waterstanden op de Waal en een verschuiving van afvoer naar het Pannerdensch Kanaal en de IJssel. Dit effect is beperkt (bij 30 m versmalling maximaal 10–15 m³/s extra naar de IJssel bij OLA).
- Op het moment dat de geulen mee beginnen te stromen neemt de extra gerealiseerde afvoer naar de IJssel gestaag af.
- Bij middelhoge en hoge afvoeren (wanneer een aanzienlijk deel van de afvoer door de geulen gaat) leidt een MGS tot maximaal enkele decimeters waterstandsdaling. De waterstandsverlaging is het grootst bij de afvoeren net voordat de uiterwaarden onderlopen. Met deze varianten is dat tussen de ~4500 en ~6000 m³/s (tot 50 cm extra waterstandsdaling). Bij extreem hoge afvoeren (>10.000 m³/s) wordt er nog steeds waterstandsdaling gerealiseerd (tot maximaal 25 cm op de Midden-Waal), maar neemt het verschil ten opzichte van een systeem zonder MGS af door het mee stromen van uiterwaarden.

- Stroomsnelheden:
  Met de beschouwde MGS-varianten, zonder optimalisatie, nemen de variaties in de stroomsnelheden in de hoofdgeul toe. Er ontstaan hogere snelheden bij versmalling en lagere bij verruiming. Dit geeft implicaties voor morfologie en daarmee mogelijk de andere rivierfuncties. Om verschillen in stroomsnelheden klein te houden is het belangrijk dat de versmalling en de verruiming zo gelijkmatig mogelijk verlopen. In- en uitstroompunten van geulen moeten optimaal op elkaar aansluiten. Oevergeulen hebben over het algemeen hogere stroomsnelheden dan uiterwaardgeulen omdat ze een steiler verhang hebben.

7.1.2 Rivierbodemerosie

De grootschalige rivierbodemerosie op de Waal kan worden gestopt met beide varianten van een meergeulensysteem. Daarbij is het belangrijk dat de verruiming bij de afvoeren die het meest relevant zijn voor de sedimenttransport (1400 – circa 6000 m^3/s) over het hele traject gelijkmatig gebeurt en in benedenstroomse richting toeneemt. Trajecten zonder verruiming of juist met extra verruiming door bijvoorbeeld overlappende geulen veroorzaken ongewenste lokale morfologische effecten (aanzanding en erosie), waardoor de effectiviteit afneemt en de stabilisatie van de rivierbodem wordt bemoeilijkt. De beschouwde varianten zijn nog niet geoptimaliseerd om deze effecten te minimaliseren. Op sommige trajecten is te veel verruimd, op andere te weinig, en sommige geulen stromen in het gebruikte model niet goed mee. Verdere optimalisatie is daarom nodig in de volgende ontwerpfase. Daarbij dient de wisselwerking tussen de veranderende rivierbodem en de hydraulica in beschouwing te worden genomen. Dit kan door berekeningen met een numeriek morfologisch model, aanbeveling hiervoor wordt in paragraaf 7.3 gedaan. Naar verwachting is optimalisatie voor uiterwaardgeulen lastiger dan voor oevergeulen, omdat er in de uiterwaarden meer restricties voor de ligging en grootte van de geulen zijn dan langs de hoofdgeul. Er moet daarom gezocht worden in slimme combinaties tussen OG, UG of andere varianten.

In deze studie is ook gekeken naar de invloed van klimaatverandering op de effectiviteit van het MGS, gericht op het zichtjaar 2050. De maatregelpakketten zijn bij een toekomstig droger klimaat iets minder goed in staat om de erosie te stoppen dan bij een gemiddeld klimaat. Bij een natter klimaat lukt het juist iets beter. Dit komt doordat bij zeer lage afvoeren nog sprake is van erosie. Dit betekent echter ook dat de optimale dimensies van de oevergeulen of uiterwaardgeulen afhankelijk zijn van de mate van veranderingen in het toekomstige klimaat. Omdat dit niet bekend is, is het belangrijk om de geulen te ontwerpen op een manier die toestaat om in de toekomst aanpassingen te maken, bijvoorbeeld aan de hoogte van instroomdrempels of tussenopeningen. Of dit soort aanpassingen voldoende is om toekomstige klimaateffecten op te vangen moet nog nader worden onderzocht.

In deze studie is voor beide varianten nog niet in detail gekeken naar de lokale effecten van het MGS op de rivierbodemligging, bijvoorbeeld het ontstaan van nieuwe ondieptes. Dit bepaalt mede het benodigde vaargeulonderhoud. Het is aannemelijk dat door zowel UG als OG meer dynamiek in de rivierbodem ontstaat.

Hoeveel onderhoud er nodig zal zijn in de oevergeulen of uiterwaardgeulen kan op dit moment niet goed worden berekend met de beschikbare numerieke modellen. Het is onvoldoende bekend hoeveel sediment er over de drempels getransporteerd wordt en vanuit de hoofdgeul in de oever- of uiterwaardgeulen terecht komt.

Voor zowel de ontwikkeling van de rivierbodem als de hydraulische effectiviteit (waterstandsdaling bij middelhoge en hoge afvoeren) is het belangrijk om hierin beter inzicht te krijgen door aanvullend onderzoek te doen[9]

Daarnaast ligt een MGS er niet in één dag. De realisatie van een MGS zal meerdere jaren in beslag nemen waarin er steeds meer geulen bijkomen. De veranderende hydraulische situatie werkt door in de morfologie. Bij de realisatie is het daarom belangrijk om zowel de morfologische effecten gedurende het aanlegproces in beeld te hebben als de daarop volgende hydraulische effecten die van belang zijn voor de rivierfuncties, inclusief de benodigde beheer- en onderhoudsinspanningen.

Voor de morfologische effectbepaling is een aantal uitgangspunten gebruikt die onzeker zijn, zoals toekomstige bodemerosietrends en gekozen transportparameters. Er dient te worden onderzocht hoe deze onzekerheden doorwerken richting de dimensionering, vormgeving en inpassing van het MGS en welke uitgangspunten gehanteerd moeten worden om aan de veilige kant te zitten. Dit geldt ook voor toekomstige toepassingen van morfologische modellen.

Om het effect van een MGS op de rivierbodemligging beter te kunnen bepalen en onzekerheden weg te nemen of te verkleinen is dus aanvullend onderzoek nodig. Dat wordt in paragraaf 7.3 in detail beschreven.

7.1.3 Rivierfuncties

Natuur en ecologie

Een MGS heeft in potentie een positief effect op de riviernatuur. Dit komt met name door de toevoeging van gebieden die grote delen van het jaar stromen en tegelijkertijd weinig invloed ondervinden van de scheepvaart. Uiterwaardgeulen kennen in dat opzicht een aantal voordelen ten opzichte van oevergeulen:

- De hinder door scheepvaart (golven en geluid) is nog kleiner.
- Stroomsnelheden zijn op veel plaatsen in de geul iets lager.
- Er is meer variatie in waterdiepte en stroomsnelheden.
- Het is eenvoudiger om aan weerszijde van de geul geleidelijk oplopende oevers te maken en daarbij meer habitatvariatie te bewerkstelligen.
- Doordat zomerkades worden doorgestoken of verwijderd neemt de overstromingsduur van de uiterwaard toe.

Uiterwaardgeulen kennen echter ook een aantal specifieke aandachtspunten:

- De ruimtelijke impact van de geulen is veel groter.
- Het is wenselijk om de geulen zoveel mogelijk dagen per jaar te laten meestromen. Dit conflicteert echter met de wensen vanuit de zoetwaterverdeling en bevaarbaarheid.
- De geulen kunnen de drainage in de uiterwaarden vergroten.
- Plassen kunnen optreden als sedimentvangen.
- Het bovenstroomse deel van de uiterwaardgeulen valt eerder droog. Hiervoor dienen mitigerende maatregelen getroffen worden

[9] In het kader van de kostenschattingen van de MGS-varianten is een expertschatting gemaakt welke laat zien dat beide varianten, zowel gedurende de aanleg- als in de onderhoudsfase, aanvullende suppleties en onderhoud vereisen. De verwachte hoeveelheden zijn groter in de uiterwaardgeulen dan de oevergeulen.

Zoetwaterbeschikbaarheid

Een MGS zorgt in de onderzochte varianten niet voor de beoogde gewenste afvoerverdeling bij laagwater. De maximale afvoertoename naar de IJssel wordt gerealiseerd bij OLA en neemt af naarmate de geulen op de Waal mee gaan stromen. Om ook bij 1300 m^3/s een toename van de IJsselafvoer te realiseren zouden de geulen, in ieder geval langs de Boven-Waal, pas bij een hogere afvoer dan OLA mee moeten gaan stromen. Dit conflicteert met het potentiële positieve effect voor natuur. Daarnaast blijkt uit de studie van Gensen et al. (2025) dat enkel grootschalige maatregelen op de Waal niet resulteren in 57 m^3/s extra IJsselafvoer bij 1300 m^3/s. Hiervoor zou bijvoorbeeld nog meer versmald moeten worden, drempelhoogtes bij de instroom van de geulen moeten worden verhoogd en ook op de andere riviertakken maatregelen getroffen moeten worden, door bijvoorbeeld het verbreden van de Boven-IJssel.

Wel zorgt de verhoogde waterstand bij lage afvoeren ervoor dat de vereiste waterstand voor de innamepunten minder vaak per jaar onderschreden wordt. Echter geldt ook hier dat in de toekomst het effect van sterke klimaatverandering op de waterstanden groter zal zijn dan de met een MGS gerealiseerde verhoging.

Bevaarbaarheid

De toename van de waterstand en daarmee vaardiepte zijn gunstig voor de bevaarbaarheid bij lage afvoeren. Op meer plekken wordt de vereiste waterdiepte bij OLA behaald en minder vaak per jaar onderschreden. Wel versterken de geulen de morfodynamiek in de vaargeul. Op meerdere plekken kunnen variaties in stroomsnelheden aanzanding veroorzaken die weggebaggerd moeten worden. Het definitieve ontwerp moet erop gericht zijn om variaties in de sedimenttransportcapaciteit zo klein mogelijk te houden, zodat de overlast van aanvullend beheer voor de scheepvaart beperkt blijft.

Het negatieve effect van een sterke klimaatverandering op de bevaarbaarheid is veel groter dan de positieve effecten van het meergeulensysteem. Frequentere lage afvoeren en de bijbehorende verlaging van de OLA zorgen ervoor dat het aantal plekken waar de vereiste waterdiepte niet wordt gehaald toeneemt. Ook neemt het aantal dagen per jaar onderschrijding toe. Echter, zonder het effect van een MGS zouden deze problemen nog ongeveer twee keer groter worden op de Waal en eerder in de tijd optreden. Op de IJssel is het effect ook merkbaar maar minder groot dan op de Waal. Hier zouden de problemen ongeveer 1,5 keer groter worden.

Waterveiligheid

Een MGS verlaagt bij hoge afvoeren de waterstanden tot zo'n 25 cm op de Waal en 10 cm op de Nederrijn-Lek en de IJssel. Dit is vergelijkbaar voor beide varianten. Dit is gunstig voor de waterveiligheid en de hoogteopgave van de keringen. Wel dient bij de aanleg van geulen nabij de keringen aandacht besteed te worden aan het mitigeren van toenemende kans op kwel en piping.

De verruiming en daarbij horende waterstandsdaling op de Waal trekt meer water naar de Waal. Een MGS lijkt bij hoge afvoeren dermate effectief dat de hoeveelheid afvoer die naar de Waal wordt getrokken meer is dan de beleidsmatige verdeling bij 16.000 m^3/s. Het regelbereik van de regelwerken lijkt niet groot genoeg om bij te sturen naar de beleidsmatige afvoerverdeling.

Het MGS zorgt ervoor dat de afvoerverdeling van het surplus boven de 16.0000 m^3/s makkelijker richting de 80/20-verdeling getrokken kan worden. Een 50/50-verdeling wordt moeilijker te bereiken dan zonder het MGS. Het effect op de afvoerverdeling is ook te zien bij de middelhoge afvoeren, waardoor de Waal ook tijdens deze afvoeren zwaarder belast wordt.

7.2 Aandachtspunten bij het ontwerp

Een meergeulensysteem inclusief een zomerbedversmalling functioneert op systeemniveau als een effectieve maatregel om rivierbodemerosie tegen te gaan, waterstanden bij lage afvoeren op te zetten en bij hoge afvoeren juist te verlagen. Het draagt bij aan waterveiligheid en biedt kansen voor natuurontwikkeling, maar lost met de beschouwde onderzoeksvarianten niet alle problemen op zoals de afvoerverdeling bij laagwater. Het uiteindelijke effect hangt af van ontwerpoptimalisaties (diepte, breedte, aansluitingen), keuzes, onderhoud en integratie met andere maatregelen. Daarbij kan gekeken worden naar combinaties van uiterwaard- en oevergeulen en andere varianten. Sedimentbeheer blijft hoe dan ook nodig, maar de mate waarin hangt af van het uiteindelijke ontwerp. De volgende aandachtspunten zijn geïdentificeerd voor de meest effectieve werking van een meergeulensysteem:

Rivierbodemerosie

- Voor het meest effectief stoppen van de rivierbodemerosie is het belangrijk dat de verruiming ver genoeg doorloopt en gelijkmatig toeneemt in benedenstroomse richting. Vermijd hierbij trajecten zonder verruiming en verruim bovenstrooms niet te veel en benedenstrooms niet te weinig. Verder is het belangrijk om niet dubbel te verruimen want de bijbehorende lagere stroomsnelheid veroorzaakt lokale sedimentatie.
- Voor veranderende afvoerstatistieken in een veranderend klimaat is het van belang dat de dimensies van de drempels en geulen aanpasbaar zijn. Of dit in voldoende mate mogelijk is met oevergeulen of uiterwaardgeulen moet worden onderzocht (zie paragraaf 7.3).
- In voorliggende effectbepaling kon niet worden beoordeeld hoe de aanleg van oevergeulen of uiterwaardgeulen de lokale rivierbodemligging in de hoofdgeul en daarmee het vaargeulonderhoud beïnvloedt. Hetzelfde geldt voor de sedimenttoevoer naar de geulen vanuit de hoofdgeul, die van invloed is op het onderhoud van de oevergeulen of uiterwaardgeulen. Beide zullen worden beïnvloed door het ontwerp van de inlaat en uitlaat van de geulen (locatie, hoogte en breedte inlaatdrempel, ontwerp van overgangen tussen geulen aan weerskanten van de rivier). Optimalisatie van deze parameters is noodzakelijk om de hoeveelheid onderhoud te beperken (zie paragraaf 7.3).

Rivierfuncties

Voor de rivierfuncties zijn aanpassingen van het ontwerp mogelijk, maar die aanpassingen hebben ook een effect op het tegen gaan van de rivierbodemerosie. Bij het uitwerken van een vervolgontwerp moet daarom naar een balans worden gezocht.

<u>Natuur en ecologie</u>:

- Het is belangrijk om de geulen niet te diep te maken. Bij diepere geulen neemt de stroomsnelheid toe waardoor de kansen voor verschillende soorten afnemen. Wel moet er dan een balans gevonden worden in de benodigde onttrekking van de geulen zodat het sedimenttransport in de hoofdgeul niet toeneemt en hierdoor de bodem niet erodeert.
- Voor natuurontwikkeling biedt het gebruik van uiterwaardgeulen meer kansen dan wanneer er enkel oevergeulen worden gerealiseerd.
- Met het doorsteken of verwijderen van zomerkades neemt de overstromingsduur van de uiterwaard toe. Dit kan toegepast worden bij zowel uiterwaardgeulen als oevergeulen, of een combinatie van beide.
- De uiterwaardgeulen hebben, zeker in het huidige ontwerp, een drainerende werking op het omliggende gebied, omdat geen drempels zijn aangelegd in de geul of bij de uitstroom aan benedenstroomse zijde. Dit zou ook een negatief effect kunnen hebben op Natura 2000-gebied. Drempels in de uitstroomopening zouden dit probleem deels kunnen verhelpen, maar hebben mogelijk ook negatieve hydraulische en morfologische effecten.

- Ruimte voor natuurlijke dynamiek is essentieel voor het ecologisch functioneren. Voorkomen moet worden dat er te strak wordt gedimensioneerd.
- De kwaliteit voor natuur en ecologie valt of staat uiteindelijk bij een goede landschappelijke inpassing, rekening houdend met de ecologische randvoorwaarden.

Zoetwaterbeschikbaarheid:
- Het berekende effect op de afvoerverdeling bij laagwater is beperkt voor de onderzoeksvarianten. Om de beoogde afvoerverdeling te behalen zijn aanpassingen in het ontwerp of aanvullende maatregelen nodig, zoals beschreven door Asselman et al. (2025) en Gensen et al. (2025).
- Het effect op de afvoerverdeling kan vergroot worden wanneer de (bovenstroomse) geulen bij een hogere afvoer dan de huidige OLA instromen. Dit creëert een groter afvoerbereik waarbinnen meer afvoer naar de IJssel kan stromen. Dit kan gerealiseerd worden door de drempelhoogte te verhogen.. Ook hier geldt dus dat het van belang is om aanpasbaarheid van de drempel en de geuldimensies mee te nemen in het ontwerp.

Bevaarbaarheid:
- Voor de bevaarbaarheid is het van belang om het zomerbed voldoende te versmallen zodat de vaardiepte bij lage afvoeren toeneemt. Langsdammen en kribverlenging zijn hier beide effectieve maatregelen voor. Dit wordt tevens bevestigd in de KBN-knelpuntenstudie van Groenewege en Sloff (*in prep.*).
- Ontwerp de in- en uitstroompunten van de geulen op zo'n manier dat de dwarsstroming minimale invloed heeft op de vaargeul en beperkt blijft tot de oeverzone. Door de hogere stroomsnelheden in oevergeulen vergeleken met uiterwaardgeulen lijkt dit voornamelijk een aandachtspunt voor het ontwerp van de oevergeulen.

Waterveiligheid:
- Bij afvoeren waar de uiterwaarden volledig mee stromen (>10.000 m^3/s) blijkt uit deze varianten verruiming met oevergeulen (met langsdammen) mogelijke effectiever dan verruiming met uiterwaardgeulen (met kribverlenging zonder dat de kribben verlaagd zijn). Het stroompatroon in de uiterwaarden is namelijk vergelijkbaar voor de twee varianten maar de stroming in het zomerbed verschilt. Met langsdammen zijn de stroomsnelheden in de oeverzones hoger dan met verlengde kribben. Dit verschil komt met name tot uiting bovenstrooms in de Waalbochten.
- Zorg voor een goed beeld van de mogelijke gevolgen door kwel en piping en neem afdoende mitigerende maatregelen.

7.3 Aanvullend onderzoek

In deze studie zijn twee afzonderlijke meergeulensysteem-varianten beschouwd. Hierbij is gekeken naar de effectiviteit en verschillen van de twee ontwerpen aan de hand van hydraulische simulaties. Dit geeft in grote lijnen een goed beeld hoe een meergeulensysteem kan functioneren en waarmee rekening gehouden moet worden bij de optimalisatie van het ontwerp. Er zijn echter nog belangrijke vragen die het nodig maken om verder te kijken dan enkel naar hydraulische berekeningen en afgeleiden daarvan. We bevelen langs twee sporen vervolgstappen aan om het systeem gedetailleerd uit te werken. Het eerste spoor adresseert het vullen van kennisleemtes om onzekerheden te reduceren.

Geanalyseerd wordt daarin hoe gevoelig de uitkomsten en de te nemen beslissing zijn voor kennisleemtes ten aanzien van sedimenttransport over inlaatdrempels en langsdammen, de stabiliteit van de geulen, de stabiliteit van het splitsingspuntengebied, de interactie met maatregelen op de andere riviertakken, en geactualiseerde prognoses van de bodemerosie. Daar waar de gevoeligheid groot is wordt gericht aanvullend onderzoek aanbevolen.

Het tweede spoor betreft de optimalisatie van het ontwerp en de omgang met onvermijdelijke resterende onzekerheden. Daarbij denken we aan slimme combinaties van beide onderzochte varianten, volgorde en fasering van de uitvoering, en aan een ontwerp dat aanpassingen mogelijk maakt op basis van monitoring, interventieniveaus en voorbereiding van maatregelen die kunnen fungeren als regelknoppen van het systeem.

Een aantal vragen wordt hieronder uitgewerkt en voorzien van een korte toelichting:

Uitgangspunten morfologische effectbepaling:

- Uit historische gemeten bodemveranderingen zijn trends afgeleid voor toekomstige bodemverandering. De schatting van de opgave voor het stoppen van de bodemerosie (de sedimenttransportgradiënt) is bepaald op basis van deze trends, en dus afhankelijk van de geanalyseerde metingen en de keuzes die gemaakt zijn in de verwerking ervan. De gebruikte metingen zijn bijvoorbeeld sterk beïnvloed door ingrepen zoals de genomen Ruimte-voor-de-Rivier-maatregelen of de concessies voor sedimentonttrekkingen. Er moet worden onderzocht hoe dit doorwerkt richting de keuze voor maatregelen in Ruimte voor de Rivier 2.0.
- Ook moet worden onderzocht hoe de uitgangspunten en onzekerheden daarin voor de morfologische effectbepaling doorwerken, en met welke uitgangspunten we zouden moeten werken om bij de keuze van maatregelen aan de veilige kant te zitten. De belangrijkste uitgangspunten hiervoor zijn de gekozen relatie voor het sedimenttransport en de parameterinstellingen daarin, het sorteringsmodel met actieve-laag-concept, de initiële bodemsedimentsamenstelling en de hydrodynamische randvoorwaarde (jaarlijks terugkerende afvoerhydrograaf en mogelijke variaties daarin).
- In voorliggende studie is vanwege de korte doorlooptijd alleen naar het initiële effect van de maatregelen op de rivierbodem gekeken, dus zonder erosie of sedimentatie die zich in de tijd kan ontwikkelen. Dit geeft een goed beeld van of het mogelijk is om de transportgradiënt uit het systeem te halen met een MGS. Als volgende stap moet worden geanalyseerd welke invloed het MGS op de middellange termijn op de rivierbodem heeft, bijvoorbeeld hoeveel variatie er overblijft in de bodemligging in de jaren na aanleg. Hoe beïnvloedt het MGS de gradiënt in bodemsamenstelling, en daarmee de gradiënt in sedimenttransport, en dus de opgave? Blijven de geulen effectief of zullen ze in de loop der tijd moeten worden aangepast? Zo ja, hoeveel?
- Het gebruikte sedimenttransportmodel bepaalt in hoge mate de effectiviteit van het MGS voor het stoppen van de erosie. Vanwege het zand-grindmengsel in de rivierbedding spelen sediment-sorteringsprocessen een cruciale rol. Het is onzeker hoe goed dit sorteringsgedrag en het transport voorspeld kunnen worden met ons huidige morfologisch modelinstrumentarium. Hoe gevoelig zijn de transportmodellen voor de bodemsamenstelling, en wat betekent dat bijvoorbeeld voor de dimensionering van het MGS nu en in de toekomst? Om deze onzekerheid te verkleinen wordt aanbevolen om de fysica achter de dynamiek van sedimentmengsels, zoals te vinden op de Boven-Waal, beter te begrijpen. Daarvoor kunnen numerieke experimenten uitgevoerd worden met stromingsmodellen in hoge resolutie (computational fluid dynamics, CFD) die het transport per sedimentkorrel simuleren. Deze modellen vormen als het ware een numeriek laboratorium met een volledig mobiele bodem waarin zowel horizontale als verticale sortering van zand en grind wordt gesimuleerd. Recent heeft Deltares hiervoor eerste tests uitgevoerd met veelbelovende resultaten.
- De samenstelling van het sediment in de rivierbodem die voor deze effectbepaling is gebruikt, is onzeker.
  Deze is gebaseerd op recente bemonstering van de rivierbedding met een *Hamon-bodemhapper* en geeft alleen een beeld van de bovenste circa 10-20 cm van de ondergrond, met een vrij grove ruimtelijke dekking. Echter, een veel dikkere toplaag van de bedding is bepalend voor het sedimenttransport.

Deze *actieve laag* is in de Rijntakken orde 1 m dik. Recente onderzoeken hebben laten zien dat *subbottom profiling* in combinatie met boorkernen veel nieuwe inzichten levert in de opbouw van de ondergrond en de sedimenttransportprocessen (van Dijk et al., 2025). Er wordt aanbevolen om dit onderzoek uit te breiden naar het hele splitsingspuntengebied. Dit helpt om de uitgangspunten voor de morfologische effectbepaling te verbeteren (sedimentsamenstelling en actieve-laag-concept) en verkleint daardoor de onzekerheden in de resultaten. Bovendien laat het zien hoe groot het risico op het ontstaan van erosiekuilen is.

Stabiliteit geulen en splitsingspunt:

- Een ander belangrijk aandachtspunt is de stabiliteit van de geulen. De te verwachten dynamiek in de geul, het aanbod van sediment bij de inlaat, en de afvoer van sediment uit de geulen zijn niet goed voorspelbaar. Bijvoorbeeld, uiterwaardgeulen die een bocht afsnijden kunnen neigen tot (sterke) erosie. Ook oevergeulen (waarvan wordt voorgesteld deze vooral in binnenbochten toe te passen) kunnen om die reden erosiegedrag vertonen. Ook is niet voorspelbaar of scheepsgolven leiden tot oevererosie, en of vegetatie juist kan leiden tot stabilisatie van oevers. Dergelijke dynamiek verstoort de beoogde werking van de geulen en kan negatieve gevolgen hebben voor de stabiliteit van constructies zoals (zomer)dijken en kabels en leidingen.
- Daarnaast heeft grootschalig toepassen van een MGS op de Waal invloed op de bodemligging in het hele splitsingspuntengebied, omdat het de afvoerverdeling en waterstanden verandert en daarmee ook de verdeling van sediment over het splitsingspunt. Er moet daarom onderzocht worden hoe deze morfologische feedback de stabiliteit van het splitsingspunt beïnvloedt en hoe zeker dit is. Ook hiervoor is het van belang om de opbouw van de ondergrond beter in kaart te brengen (zie aanbeveling hierboven).

Adaptiviteit en robuustheid:

- De morfologische effectbepaling heeft laten zien dat de werking van een MGS afhangt van ontwikkelingen van het toekomstige klimaat. Het klimaat is echter erg onzeker, en het is onbekend of het MGS robuust genoeg is om in een sterk veranderend klimaat op termijn te blijven functioneren voor het stoppen van de bodemerosie. Daarom is het belangrijk om de geulen te ontwerpen op een manier die toestaat om in de toekomst aanpassingen te maken, bijvoorbeeld aan de hoogte van instroomdrempels of tussenopeningen of de dimensies van de geulen. Hoe fors dergelijke aanpassingen mogen zijn, en of deze dan voldoende zijn om een brede bandbreedte van toekomstige klimaateffecten op te vangen en wat eventueel aanvullende interventies kunnen zijn, moet nog nader worden onderzocht.
- Dit is ook van belang vanwege bovengenoemde onzekerheden in de uitgangspunten van de effectbepaling, die tot over- of onderdimensionering van de geulen kunnen leiden.
- De hoeveelheid sediment die de Boven Rijn en Waal binnenkomt vanuit de Niederrhein, en de samenstelling ervan, zou in de toekomst kunnen veranderen, bijvoorbeeld door natuurlijke processen of door maatregelen in Duitsland. Hierdoor kan de werking van het MGS veranderen, waardoor wellicht aanpassingen nodig zullen worden.

Interactie met maatregelen op de andere riviertakken:

- Bij voorliggende effectbepaling is gekeken naar de effecten van alleen een MGS op de Waal. In werkelijkheid zullen er ook op de andere riviertakken ingrepen gepland worden.

Vanwege de invloed op waterstanden en afvoerverdeling en daarmee verbonden morfologische feedback (reactie van de bodemligging op alle takken) zullen de maatregelen op verschillende takken elkaar beïnvloeden en zal het hele pakket gezamenlijk geoptimaliseerd moeten worden voor de middellange termijn.

Onderhoud van oever- of uiterwaardgeulen en de vaargeul:

- Het is op dit moment onbekend hoeveel sediment uit de hoofdgeul over de inlaatdrempels de geulen van een MGS in getransporteerd zou worden. Daarom is het ook niet mogelijk om een goede inschatting van het benodigde geulonderhoud te maken. Dit komt door beperkte kennis over het transport van sediment over drempels afhankelijk van de aanstroomrichting en -snelheid en de drempelhoogte, en de interactie met stroming en morfologie voor de inlaat. Er wordt aanbevolen om de kennis over de processen te vergroten. Deltares onderzoekt op dit moment of dit zou kunnen met behulp van geavanceerde numerieke modellen (CFD-modellen met sedimenttransport).
- Daarnaast wordt het benodigde onderhoud van de geulen bepaald door de stabiliteit van de geulen, zie opmerking verder boven.
- Ook is het mogelijk dat de complexe stromingspatronen bij de instroom en uitstroom naar en van de geulen voor het ene type maatregel ongunstiger zijn dan voor het andere en daardoor meer onderhoud in de vaargeul nodig maken. Dat kan met de huidige studie niet onderzocht worden. Hiervoor zijn berekeningen met een morfologisch model nodig.

Optimalisatie van het ontwerp en volgordelijkheid van de aanleg:

- Deze effectbepaling leert ons dat de effectiviteit van een MGS toeneemt wanneer deze gelijkmatig en aaneengesloten wordt aangelegd. Verder onderzoek met een geoptimaliseerde schematisatie moet inzicht geven in hoe groot dit effect is op de rivierbodemerosie en de rivierfuncties. Hierin kan ook onderzocht worden in hoeverre er gedifferentieerd kan worden met de drempelhoogtes over de riviertak zodat de rivierfuncties zoveel mogelijk kunnen profiteren zonder dat dit ten koste gaat van de stabilisatie van de rivierbodem. Een mogelijk voorbeeld is het verhogen van de inlaatdrempel bij de bovenstroomse geulen wat ten goede kan komen aan de vullingsgraad van het IJsselmeer.
- Specifiek voor de morfologie is een optimalisatie van het ontwerp nodig om het nodige vaargeulonderhoud (en geulonderhoud, zie voorgaand punt) te beperken. Dit werd ook duidelijk in eerdere berekeningen met een morfologisch model. Daarbij gaat het om de hoogte en breedte van de inlaatdrempel en eventuele tussenopeningen, de oriëntatie van de drempel ten opzichte van de stroomrichting, een eventuele variatie van de hoogte langs de drempel, het vinden van de optimale locatie van de aftakking van de geul (die waarschijnlijk verschilt in binnen- en buitenbochten), en de locatie en vormgeving van de overgang tussen geulen aan weerskanten van de rivier. In voorliggende studie is het effect van een MGS langs de hele Waal (tot aan rkm 934) onderzocht. In werkelijkheid zullen niet alle geulen tegelijkertijd kunnen worden aangelegd en zal de aanleg een bepaalde tijd duren. Er wordt aanbevolen te onderzoeken in welke volgorde de geulen het beste kunnen worden aangelegd wat betreft de effecten op rivierfuncties enerzijds en de benodigde aanvullende suppletie en vaargeulonderhoud in die periode anderzijds.

Rivierfuncties:

- Natuur: In de huidige effectbepaling is nog niet gekeken naar het effect van afwisselend meestromen van de geulen op onder andere grondwaterstanden in de uiterwaarden en de binnendijkse zone. Om dit te bepalen is aanvullend onderzoek nodig. Hoe groot is de invloed op de grondwaterstand wanneer de geulen niet mee stromen en hoever werkt dit door binnendijks?

Welke ontwerpkeuzes kunnen doorgevoerd worden in de geulen om mogelijk ongewenste grondwatereffecten (deels) te voorkomen? Ook is nog niet goed gekeken naar de integratie van PAGW doelen in het MGS.

- Bevaarbaarheid: Onderzoek naar het effect van dwarsstromen in de vaargeul. De resultaten van de uitgevoerde stationaire berekeningen suggereren dat het effect van dwarsstroming beperkt blijft tot de oeverzone. Echter, om het effect op de bevaarbaarheid beter uit te zoeken dient deze analyse voor alle in- en uitstroomlocaties uitgevoerd te worden aan de hand van de geldende eisen voor dwarsstroming zoals opgenomen in Richtlijnen Vaarwegen (Rijkswaterstaat, 2020), onder andere debiet, stroomsnelheid en -richting.
- Zoetwaterbeschikbaarheid en waterveiligheid: De invloed van de maatregelen op de afvoerverdeling zijn het meeste bepalend voor beide rivierfuncties. De manier van versmallen met kribverlenging (hier zonder verlaging) of langsdammen resulteert voor zowel lage als hoge afvoeren in een verschillend effect. Daarom is het van belang om inzicht te krijgen in de effectiviteit van beide maatregelen. Bij lage afvoeren lijken langsdammen voor meer opstuwing te zorgen dan de kribverlenging. Daarnaast is bij hoge afvoeren het verschil in effect op de afvoerverdeling dermate groot tussen de twee varianten dat het afzonderlijke effect van de twee zomerbedmaatregelen ook afzonderlijk (zonder geulen) beschouwd moet worden. Dit geeft inzicht in hoe we de versmallingsmaatregelen het beste kunnen inpassen bij een geoptimaliseerd ontwerp. Dit kan uitgevoerd worden door de losse Baseline-maatregelen afzonderlijk in het referentiemodel in te mixen.

8 Conclusies

In deze studie is aan de hand van twee varianten onderzoek gedaan naar de effectiviteit van een meergeulensysteem: één variant met uiterwaardgeulen (UG) die gecombineerd is met een zomerbedversmalling door kribverlenging en één met oevergeulen (OG) gecombineerd met een zomerbedversmalling door aanleg van langsdammen. De resultaten geven inzicht in trends en mechanismen op systeemniveau ten aanzien van hydraulica, morfodynamiek (hier rivierbodemerosie) en effecten op de vier rivierfuncties natuur, zoetwaterbeschikbaarheid, bevaarbaarheid en waterveiligheid. Deze effectbepaling richt zich op het beantwoorden van de volgende onderzoeksvragen:

1 Kan de rivierbodemerosie op de Waal worden gestopt met een meergeulensysteem in beide uitvoeringsvarianten?
2 Wat is het effect op de rivierfuncties?
3 In hoeverre zijn de effecten anders bij een systeem met oevergeulen dan met uiterwaardgeulen?

Om het effect van een MGS op de bodemerosie in beeld te brengen maakt deze studie gebruik van de hydraulische rekenresultaten van Haskoning (2025), en maakt daarbij een inschatting van het morfologische effect. Er is in deze fase geen morfologische modelberekening uitgevoerd. De effecten op de rivierfuncties zijn afgeleid aan de hand van eerdere effectbepaling van het IRM-nulalternatief (Asselman et al., 2022a,b) en relevante studies over de afvoerverdeling bij laag- en hoogwater (o.a. Gensen et al., 2025; de Bake et al., 2025). In het IRM-nulalternatief is geanalyseerd hoe voortdurende riviererosie tot 2050 de rivierfuncties beïnvloedt. In de daarop volgende gevoeligheidsanalyse is ook gekeken en vergeleken wat de effecten zijn als de bodemligging wordt opgehoogd tot het niveau rond het jaar 2000.

Hieronder worden per onderzoeksvraag de belangrijkste conclusies gepresenteerd.

8.1 Kan rivierbodemerosie op de Waal worden gestopt met een meergeulensysteem?

- Ja, het principe van een MGS werkt op systeemniveau en de grootschalige rivierbodemerosie kan worden gestopt.
- Om lokale erosie en sedimentatie (en daarmee het beheer en onderhoud) te beperken is in eerste instantie optimalisatie van het ontwerp nodig, gericht op de ruimtelijke inpassing. Optimalisatie kan daarnaast ook gericht zijn op het (nog) beter ondersteunen van de rivierfuncties.
- Om te komen tot een geoptimaliseerd MGS is ook aanvullend onderzoek nodig, onder meer naar de robuustheid van deze conclusie in verband met onzekerheden in de uitgangspunten van de morfologische effectbepaling, de stabiliteit van de geulen en het splitsingspuntengebied, de robuustheid van de maatregelen voor toekomstige veranderingen (bijvoorbeeld in het klimaat), de interactie met maatregelen op de andere riviertakken, keuzes voor de aanleg (bijvoorbeeld volgorde van uitvoering), het benodigde onderhoud van nevengeulen en vaargeul, en de mogelijkheden tot optimalisatie van het ontwerp.

Aanvullende conclusies:

- Gelijkmatige verruiming is nodig over het hele traject bij de afvoeren die het meest relevant zijn voor het sedimenttransport (1400 – ca. 6000 m^3/s), rekening houdend met de benodigde debieten door de oever- en uiterwaardgeulen die stroomafwaarts aanzienlijk toenemen. Trajecten zonder verruiming of juist extra verruiming door bijvoorbeeld overlappende geulen veroorzaken ongewenste morfologische effecten, waardoor de effectiviteit afneemt en de stabilisatie van de rivierbodem wordt bemoeilijkt.
- Naar verwachting is optimalisatie met betrekking tot de ruimtelijke inpassing van het ontwerp van het MGS voor uiterwaardgeulen lastiger dan voor oevergeulen, omdat er in de uiterwaarden meer restricties voor de ligging en grootte van de geulen zijn dan langs de hoofdgeul.
- In deze studie is voor beide varianten nog niet in detail gekeken naar de effecten op lokale variaties in de rivierbodemligging, bijvoorbeeld het ontstaan van nieuwe ondieptes die het benodigde vaargeulonderhoud mede bepalen. Het is aannemelijk dat door zowel UG als OG meer dynamiek in de rivierbodem ontstaat. Om dit te onderzoeken is een numeriek morfologisch model nodig.
- Hoeveel onderhoud er nodig zal zijn in de oevergeulen of uiterwaardgeulen kan op dit moment niet goed worden berekend met de beschikbare numerieke modellen. Er is niet voldoende bekend hoeveel sediment er vanuit de hoofdgeul in de oever- of uiterwaardgeulen terecht komt[10]. Hiervoor dient aanvullend onderzoek uitgevoerd te worden.

Klimaatverandering
In deze studie is rekening gehouden met de effecten van klimaatverandering op de afvoerhydrograaf, tot 2050. Er is daarom gerekend met een nat, droog en gemiddeld jaar voor het zichtjaar 2050, gebaseerd op het KNMI'23-klimaatscenario 2050Hd. Bij een droger klimaat krijgen de lage afvoeren meer gewicht en daarmee de versmalling door de langsdammen of verlengde kribben. Daardoor zijn de maatregelpakketten bij een droger klimaat iets minder goed in staat om de sedimenttransportgradiënt op te heffen. Bij een natter klimaat krijgen juist de middelhoge en hogere afvoeren meer gewicht en tikt het effect van de verruiming op jaarbasis zwaarder door. Daardoor wordt de transportgradiënt juist iets sterker teruggedrongen. Echter worden in dat geval ook de pieken door ontbrekende verruiming en (bij de UG) de dalen door dubbele verruiming vergroot.

Dit betekent dat de optimale dimensies van de oevergeulen of uiterwaardgeulen afhankelijk zijn van ontwikkelingen in het toekomstige klimaat. Omdat dit niet bekend is, is het belangrijk om de geulen te ontwerpen op een manier die toestaat om in de toekomst aanpassingen te maken, bijvoorbeeld aan de hoogte van instroomdrempels of tussenopeningen. Of dit soort aanpassingen voldoende is om toekomstige klimaateffecten op te vangen moet nog nader worden onderzocht.

[10] In het kader van de kostenschattingen van de MGS-varianten is een expertschatting gemaakt welke laat zien dat beide varianten, zowel gedurende de aanleg- als in de onderhoudsfase, aanvullende suppleties en onderhoud vereisen. De verwachte hoeveelheden zijn groter in de uiterwaardgeulen dan de oevergeulen.

8.2 Wat is het effect op de rivierfuncties?

Natuur en ecologie

- De aanleg van een MGS vergroot in potentie de kansen voor natuur en ecologie. Deze potentie valt of staat uiteindelijk wel bij de landschappelijke inpassingen, waarbij rekening wordt gehouden met de ecologische randvoorwaarden zoals jaarrond doorstromen.
- Beide varianten scheiden de functies bevaarbaarheid en ecologie. Zo zorgen beide varianten voor een meer beschermde omgeving door bijvoorbeeld demping van golven en geluid als gevolg van scheepvaart en langzamer stromend water dan in de hoofdgeul. Beide varianten creëren kansen voor habitatvariatie en heterogeniteit, waarbij het potentieel voor UG aanzienlijk groter is.
- De UG-variant leidt tot een grotere toename van de overstromingsduur in de uiterwaarden omdat zomerkades moeten worden doorgestoken of verwijderd. Bij de OG-variant zal de verandering in overstromingsduur waarschijnlijk te klein zijn om van invloed te zijn op de potentiële ecotoopverdeling in de uiterwaarden.
- De stroomsnelheden in de oever- en uiterwaardgeulen zijn tot een afvoer van 3220 m^3/s vergelijkbaar tussen de 0,5 en 1 m/s. Bij hoge afvoeren hebben de oevergeulen hogere stroomsnelheden (tot 2,6 m/s) dan uiterwaardgeulen (maximaal 1,5 m/s).

Zoetwaterbeschikbaarheid

- Bij lage afvoeren (≤1300 m^3/s) stijgt de waterstand op de Waal door de grootschalige versmalling van het zomerbed (maximaal +20 cm bij OG, +12 cm bij UG). Op het Pannerdensch Kanaal en de IJssel is de waterstandstijging tussen de 10 en 15 cm, wat het gevolg is van de verandering in afvoerverdeling, en neemt af in benedenstroomse richting.
- Een MGS beïnvloedt de afvoerverdeling op systeemniveau. Bij lage afvoeren (≤1300 m^3/s, wanneer de geulen nog niet of beperkt mee stromen) stroomt door de zomerbedversmalling (en daarmee samenhangende waterstandsopzet) 5 tot 15 m^3/s meer naar de IJssel. Dit is beduidend minder dan de beoogde extra 57 m^3/s wat naar de IJssel. Bij middelhoge en hoge afvoeren (≥2000 m^3/s) draait dit om en stroomt er juist minder water naar de IJssel dan in de referentie situatie. De hoogte van de drempels bij de geulen is hier de bepalende factor. Het MGS in de beschouwde vorm heeft daarom beperkt effect op de landelijke waterverdeling en daarmee op de watervoorziening in met name Noord-Nederland.
- Voor substantiële verbetering zijn aanvullende maatregelen of een ander ontwerp van het MGS nodig. Er liggen kansen om de geulen zodanig te ontwerpen dat deze pas bij een hogere waterstand mee stromen. Zeker voor de meest bovenstrooms gelegen geulen kan later mee stromen een relatief groot effect hebben op de afvoerverdeling laagwater.
- De verhoogde waterstand bij lage afvoeren zorgt ervoor dat de kritieke waterstand bij de innamepunten minder vaak wordt onderschreden.

Bevaarbaarheid

- Door de hogere waterstanden bij lage afvoeren (tussen de 10 en 20 cm) voldoen er meer locaties aan de vereiste waterdiepte bij OLA. Ook het aantal dagen per jaar dat de minimaal vereiste waterdiepte wordt onderschreden neemt af bij implementatie van een MGS.
- De nieuwe morfodynamiek kan nieuwe ondieptes veroorzaken, en kan daarmee mogelijk meer onderhoud ten opzichte van de huidige situatie noodzakelijk maken. Optimalisatie van het ontwerp moet zich ook op deze problematiek richten. Op basis van deze studie kunnen hier nog geen conclusies aan verbonden worden.

- Het algemene beeld is dat het effect van dwarsstroming zich bij zowel de UG- als de OG-variant lijkt te beperken tot de oeverzone en daarmee geen hinder oplevert voor de scheepvaart. Wel dient dit bij de ontwerpfase per geul beschouwd en geoptimaliseerd te worden.

Waterveiligheid

- Ook op de waterveiligheid heeft een MGS een positief effect op de waterstanden. Bij middelhoge en hoge afvoeren daalt de waterstand op de Waal (maximaal -50 cm bij UG en -35 cm bij OG bij een afvoer van 5800 m^3/s te Lobith). Bij zeer hoge afvoeren (>10.000 m^3/s) dalen de waterstanden met ca. 25 cm op de Boven en Midden-Waal en 10 cm op de Nederrijn-IJssel. Alleen op de niet verruimde Beneden-Waal stijgt de waterstand met maximaal 10 cm.
- Door deze lagere waterstanden neemt ook de afvoer naar de Waal toe ten opzichte van de referentie situatie. Het verschil in effect tussen uiterwaardgeulen (UG) en oevergeulen (OG) is beperkt bij lage afvoeren, maar bij middelhoge afvoeren (4350–8400 m^3/s) trekt de UG-variant meer afvoer naar de Waal. Bij extreem hoge afvoeren (>10.000 m^3/s) draait dit om en trekt de OG-variant meer afvoer. Het verschil tussen de twee varianten bedraagt enkele tientallen kubieke meters per seconde bij de middelhoge afvoeren tot meer dan 100 m^3/s bij afvoeren waarbij alle uiterwaarden mee stromen (in deze studie >16.000 m^3/s). Bij deze afvoeren worden de uiterwaardgeulen beduidend minder effectief dan de oevergeulen die voor verbreding van het zomerbed zorgen. Wel stroomt er in beide varianten meer afvoer door de Waal dan in de referentiesituatie.
- Wanneer oever- of uiterwaardgeulen dichtbij waterkeringen komen te liggen vergroot dit de kans op kwel en piping. Het ontzien van kwelgevoelige gebieden of het nemen van mitigerende maatregelen moet nader uitgezocht worden om dit effect tegen te gaan. Uiterwaardgeulen lopen altijd dichterbij de keringen dan oevergeulen.

Klimaatverandering

Hoewel een MGS een positief effect heeft op alle vier de rivierfuncties is dit niet afdoende om negatieve effecten van sterke klimaatverandering te compenseren. Zo is de toename van de laagwaterstanden met 20 cm onvoldoende om de afname van de vaardiepte door sterke klimaatverandering te compenseren (bij het Whdry-scenario kan dit leiden tot 50 cm minder vaardiepte omdat de OLA afneemt van 1020 m^3/s nu naar 825 m^3/s) in 2050. Bij sterke klimaatverandering zal de vaardiepte in 2050 ondanks de aanleg van een MGS toch minder zijn dan nu, maar wel 10 tot 20 cm meer dan zonder MGS. De afname van de laagwaterstanden zorgt voor lagere grondwaterstanden in de uiterwaarden, wat nadelig kan zijn voor de natuur. En de kleine toename van de IJsselafvoer bij lage rivierafvoeren is onvoldoende om de kans op watertekorten in Noord-Nederland te verkleinen. Ook voor de waterveiligheidsopgave geldt dat een MGS het negatieve effect van extreme klimaatverandering niet volledig compenseert. Voor alle functies geldt dat de resterende opgave wel (aanzienlijk) kleiner is dan zonder MGS.

8.3 In hoeverre zijn de effecten anders bij een systeem met oevergeulen dan met uiterwaardgeulen?

Aan de hand van de twee doorgerekende MGS-varianten (zonder optimalisatie) kunnen we stellen dat de effecten van beide varianten grotendeels vergelijkbaar zijn. Wel zijn er verschillen tussen een MGS bestaande uit enkel oevergeulen of uiterwaardgeulen met betrekking tot de effecten op hydraulica, de rivierfuncties en ruimtelijke impact. In de huidige analyse is het nog te vroeg om harde conclusies te trekken over het effect op de morfologische ontwikkeling op termijn. Wel blijft de belangrijkste conclusie dat de rivierbodemerosie met beide varianten kan worden gestopt, mits er wordt geoptimaliseerd. In een geoptimaliseerd ontwerp moet de keuze gemaakt worden of één van beide geultypen gebruikt gaat worden, een combinatie van beiden of een alternatieve variant.

Hieronder worden de belangrijkste verschillen tussen de varianten met oevergeulen en uiterwaardgeulen genoemd voor de hydraulica en rivierfuncties.

Hydraulica

Beide varianten hebben grote invloed op de hydraulica:

- Versmalling van het zomerbed leidt bij lage afvoeren tot een kleine verschuiving in de afvoerverdeling, waarbij in beide varianten iets meer water naar de IJssel wordt afgevoerd (maximaal 10 m^3/s tot 15 m^3/s. De modelresultaten suggereren dat versmalling met langsdammen iets effectiever is dan versmallen door kribverlenging.
- Bij middelhoge afvoeren (4350–8400 m^3/s) onstaat er een groter verschil tussen de twee varianten. De UG-variant trekt tussen de 20 en 60 m^3/s meer afvoer naar de Waal dan de OG-variant. Dit verschil wordt veroorzaakt door het eerder instromen van de uiterwaarden en de extra verlaging van de waterstanden daardoor. Met het aanleggen van uiterwaardgeulen worden namelijk de zomerkades doorgestoken.
- Bij extreem hoge afvoeren (>10.000 m^3/s) draait dit om. De OG-variant trekt dan juist >100 m^3/s meer afvoer naar de Waal dan de UG-variant. Dit komt doordat bij deze afvoeren ook alle uiterwaarden in de OG-variant mee stromen. Het verruimende effect van oevergeulen heeft een groter effect dan verruiming met uiterwaardgeulen in de doorgerekende ontwerpen.
- De verschillende typen geulen zorgen voor een verschil in stroomsnelheden. Dit wordt met name veroorzaakt door het verschil in verhang. De OG-variant heeft hogere stroomsnelheden in geulen (tot 2,6 m/s) dan UG (max. 1,5 m/s). De variatie van stroomsnelheden in de geul is bij UG groter dan bij OG.

Rivierfuncties

Voor de rivierfuncties zijn over het algemeen de effecten op de waterstanden en daarmee afvoerverdeling op de riviertakken het meest bepalend. Voor de rivierfuncties natuur en ecologie en waterveiligheid spelen echter ook de verschillende dimensies, het ruimtebeslag en de afstand tot de waterkering van de geultypen een rol.

Natuur en ecologie:

- De UG-variant biedt meer ecologische kansen: langere overstromingsduur door het verwijderen van de zomerkades, grotere habitatvariatie, lagere stroomsnelheden. Wel stellen uiterwaardgeulen een grotere ontwerpuitdaging met betrekking tot droogvallen, drainage en mogelijk ook sedimentatie dan oevergeulen.
- De ecologische baten zullen uiteindelijk afhangen van het definitieve ontwerp waarin invulling wordt gegeven aan de ecologische randvoorwaarden en bijvoorbeeld keuzes gemaakt moeten worden over toegepast materiaal en vormgeving van de geulen (o.a. talud van de oeverzones).

Zoetwaterbeschikbaarheid:

- Beide varianten hebben beperkt effect op gewenste extra IJsselafvoer bij lage afvoeren. Het effect van versmalling met langsdammen lijkt wel iets groter dan versmalling met kribverlenging (+5–15 m^3/s tegen +5 m^3/s).

Bevaarbaarheid:

- Bij de OG-variant neemt de vaardiepte iets meer toe (10–20 cm) dan bij de UG-variant (5–10 cm) bij lage afvoeren. Dit verschil is gelinkt aan de keuze voor langsdammen in plaats van kribverlenging.

Waterveiligheid:

- Beide varianten verlagen hoogwaterstanden tot circa 25 cm op de Midden-Waal. De OG-variant beïnvloedt de afvoerverdeling sterker bij extreme afvoeren, wat het behalen van de beleidsmatige verdeling bij 16.000 m^3/s bemoeilijkt, wanneer de regelwerken in de middenstand moeten staan. Voor de verdeling van het surplus komt de OG-variant met een verdeling van 66/26/9 (Waal/IJssel/Nederrijn) het dichtst in de buurt van de 80/20-verdeling die is beschreven in de Planologische Kernbeslissing (PKB) Ruimte voor de Rivier.
- De kans op kwel en piping is groter bij uiterwaardgeulen aangezien deze over het algemeen dichter bij de kering worden aangelegd dan oevergeulen. Bij oevergeulen kan dit vooral spelen op trajecten waar het winterbed relatief smal is.

9 Literatuur

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 (2022b). Effectbepaling IRM - Gevoeligheidsanalyse voor verandering in rivierbodemligging Rijntakken. Deltares rapport 11208036-004-ZWS-0005

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

Barneveld, H., van Hove, A., Paarlberg, A., Daggenvoorde, R., Spruyt, A., Fujisaki, A., Sloff, K., Ottevanger, W., van den Bergh, M., & Schielen, R. (2019). *Effect grootschalige rivierverruiming op bodemerosie Waal: Eindrapport*. HKV, Deltares, WWF, Rijkswaterstaat.

Barneveld, H.J., A. Paarlberg, P. van Denderen, J. Kuiper (2025) Systeemmaatregelen beleidskeuze rivierbodemligging Rijntakken - Uitwerking van oplossingsrichtingen. Rapport PR5219.10. Juli 2025. HKV Lijn in Water.

De Bake, D., Gensen, M., Viera da Silva, J. (2025). Doorrekenen afvoerverdeling bij hoogwater. HKV rapport PR5306.10

Geerling, G. en van Kouwen, L. (2010). Evaluatie Nevengeulen. Deltares-rapport 1201474-000. December 2010.

Gensen, M., Lokin, L., de Jong, A. K., Viera da Silva, J. (2025). Maakbaarheid afvoerverdeling Rijntakken laagwater – 2D D-HYDRO berekeningen. HKV rapport PR5289.10

Groenewege, R. & K. Sloff (*in prep.*). Analyse KBN knelpunten – Vervolgonderzoek Handelingsperspectief droogte. Deltares rapport 11211515-003-ZWS-0001

Haskoning (2025). *Uitwerking schetsen meergeulensysteem Waal.* BK8269-WM-RP-250930-1026

Meyer-Peter, E en R. Müller (1948): Formulas for bedload transport. Proceedings of: Intl. Association for Hydraulic Structures Research, Second Meeting, Stockholm 7-9 June 1948.

Ministerie Verkeer & Waterstaat, 2006. Planologische Kernbeslissing (PKB) Ruimte voor de Rivier. Deel 4: Vastgesteld besluit. Den Haag.

Mosselman, E., T. Buijse, E. van der Deijl, J. de Jong, V. Chavarrias, W. Ottevanger, N.E.M. Asselman, P. de Grave, C.F. van der Mark, R.M. van der Wijk, F.P.L. Collas, M.P. van der Vat, C.J. Sloff, L. Verbrugge en R. van den Born (2021). Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal. Deltares rapport 11204644-014-ZWS-0010.

Rijkswaterstaat (2020). Richtlijnen Vaarwegen 2020. Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, Rijswijk. 20 november 2020.

Rijkswaterstaat (2023). *Rivierkundig Beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren.* Versie: 6.0, 23 januari 2023.

Rijkswaterstaat & DG Water en Bodem (2024). *Werkhypothesen Ruimte voor de Rivier 2.0*. Arcadis Nederland B.V., Amersfoort. Definitieve versie, 12 december 2024.

Sloff, K. (2019): Prognose bodemligging Rijntakken 2020-2050. Trends voor scheepvaart en waterbeschikbaarheid. Deltares-rapport 1203738-005-BGS-0008, 20 december 2019.

Sloff, K. (2022): Ruimtelijke en temporele interpretatie van bemonstering bodemsamenstelling Rijntakken. Deltares-rapport 11208033-012-ZWS-0001, 22 december 2022.

Sloff, K. (2024): Afvoerreeksen KNMI scenario's. Deltares-memo, 7 oktober 2024.

Ter Maat, G.J., N.E.M. Asselman, M.J.P. Mens, W.E. Penning en F.C. Sperna Weiland (2024). *Hoe verandert het afvoerregime van de Rijn in de toekomst, en welke impact heeft dit op zoetwaterbeschikbaarheid, waterveiligheid, natuur en bevaarbaarheid? Verslaglegging hackathon over de implicaties van de KNMI'23-scenario's.* Deltares rapport 11210275-004-BGS-0001.

Van den Hoek, A. (2025). *Modelvalidatie bij langsdammen Waal – Vergelijking van 2D-modelresultaten met ACDP-metingen in hoofd- en oevergeul*. Deltares rapport 11211534-003-ZWS-0001

Van Dijk, T., E. van Onselen, L. Haverson, K. Sloff (2025): Sedimentary composition of the shallow subsurface of the River Waal, Netherlands. Initial study to explore research possibilities. Deltares-rapport 11210364-012-ZWS-0001.

A Schematisatie rondom bestaande OG Tiel

Rondom de bestaande OG bij Tiel zijn enkele inconsistenties in de modelschematisatie die invloed hebben op het effect van de OG en UG bij Tiel. Deze uitgangspunten zijn samengevat in Tabel A.1.

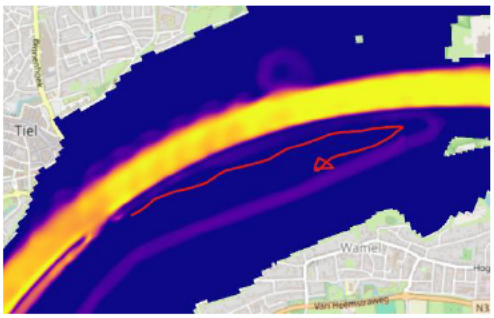
Tabel A.1. Weergave van de drempelhoogtes en breedtes per variant. Dikgedrukt onregelmatigheden in de modelschematisatie.

	Ref	OG	UG
Drempel OG1	Huidig; boven OLR	Aangepast; OLR	**Huidig; boven OLR**
Drempel OG2	Huidig; onder OLR	Aangepast; OLR	Huidig; onder OLR
Drempel OG3	Huidig; onder OLR	**Niet aangepast; onder OLR**	Huidig; onder OLR
Breedte OG1	Huidig	Verbreed	Huidig
Breedte OG2	Huidig	Verbreed	Huidig
Breedte OG3	Huidig	Verbreed	Huidig

Referentievariant
In de referentievariant zijn de bestaande oevergeulen geschematiseerd zoals ze erbij liggen. Dit is de rivier in zijn huidige staat, en op basis hiervan is ook de rivierbodemerosie berekend. Dit betekent dat twee (OG 2 en OG 3) van de bestaande oevergeulen in deze situatie gaan mee stromen vanaf 600 m^3/s. OG 1 stroomt echter pas boven OLA (1020 m^3/s) mee. Ter hoogte van OG 1 kan hierdoor juist een waterstandsdaling optreden ten opzichte van de referentie. Bij OG 2 en OG 3 wordt eerder een stijging verwacht.

Oevergeulenvariant
In de oevergeulenvariant is de instroomdrempel van OG1 verlaagd naar OLR. De instroomdrempel van OG2 is verhoogd naar OLR. De instroomdrempel van OG3 is echter niet aangepast. Wel zijn de bestaande oevergeulen verbreed maar is de breedte van de inlaat onveranderd. Voor OG 3 betekent dit dat deze juist meer water kan afvoeren onder de OLA, wat dus een waterstandsdaling ten opzichte van de referentie betekent.

Uiterwaardgeulenvariant
In de uiterwaardgeulenvariant liggen de aantakkingen van de uiterwaardgeulen achter de dammen van OG1 en OG3. De instroomdrempels die instroom van OLA mogelijk moeten maken liggen bij de instroom van de uiterwaardgeulen. De instroomdrempels en breedtes van de oevergeulen zijn echter niet aangepast. Gevolg hiervan is dat OG1 pas bij afvoeren boven OLA vanuit de bovenstroomse instroomopening gaat mee stromen. Hierdoor stroomt het water vanaf de uitstroomopening van OG1 naar binnen om de uiterwaardgeul in te stromen (zie Figuur A.1Figuur A-1). Doordat OG2 nog steeds mee stroomt bij waterstanden onder OLA, kan hier juist een waterstandsverlaging optreden. OG3 stroomt wel normaal mee.
Een openstaande vraag is of de (niet aangepaste) breedte van de OG1 en OG3 een beperkende factor is voor de instroom naar de uiterwaardgeulen.



Figuur A-1. Stroomsnelheden in de UG-variant, 1300 m^3/s.

B Extra figuren hydraulica

Alle extra figuren zijn meegeleverd bij dit rapport in een apart bestand: *Bijlage B hydraulica*. Hierin zijn de volgende figuren terug te vinden.

B.1 Waterstanden

Langsdoorsnedes

1 Waterstanden
   a Boven-Rijn, Waal
   b Pannerdensch Kanaal, Nederrijn, Lek
   c IJssel
2 Waterstanden interactief – waterlevel.html
3 Waterstandsverschillen: UG en OG ten opzichte van Ref
   a Boven-Rijn, Waal
   b Pannerdensch Kanaal, Nederrijn, Lek
   c IJssel
4 Waterstandsverschillen interactief – Waterlevel_difference.html

Heatmaps

5 Waterstanden
   a Boven-Rijn, Waal
   b Pannerdensch Kanaal, Nederrijn, Lek
   c IJssel
6 Waterstandsverschillen : UG en OG ten opzichte van Ref
   a Boven-Rijn, Waal
   b Pannerdensch Kanaal, Nederrijn, Lek
   c IJssel

B.2 Afvoerverdeling

1 Afvoer over de takken:
   a Uiterwaardgeulen
   b Oevergeulen
2 Afvoerverdeling relatief
   a Uiterwaardgeulen
   b Oevergeulen
3 Afvoerfracties
   a Uiterwaardgeulen
   b Oevergeulen

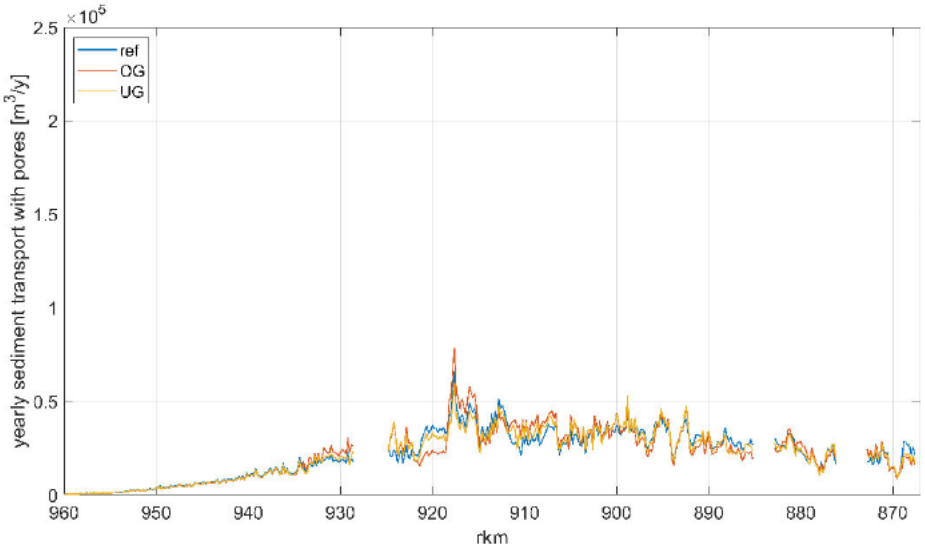
B.3 Stroomsnelheden

1 Stroomsnelheid
   a Boven-Rijn, Waal
   b Pannerdensch Kanaal, Nederrijn, Lek
   c IJssel
2 Stroomsnelheid interactief – stroomsnelheid_all.html
3 Stroomsnelheidsverschillen: UG en OG ten opzichte van Ref
   a Boven-Rijn, Waal
   b Pannerdensch Kanaal, Nederrijn, Lek
   c IJssel

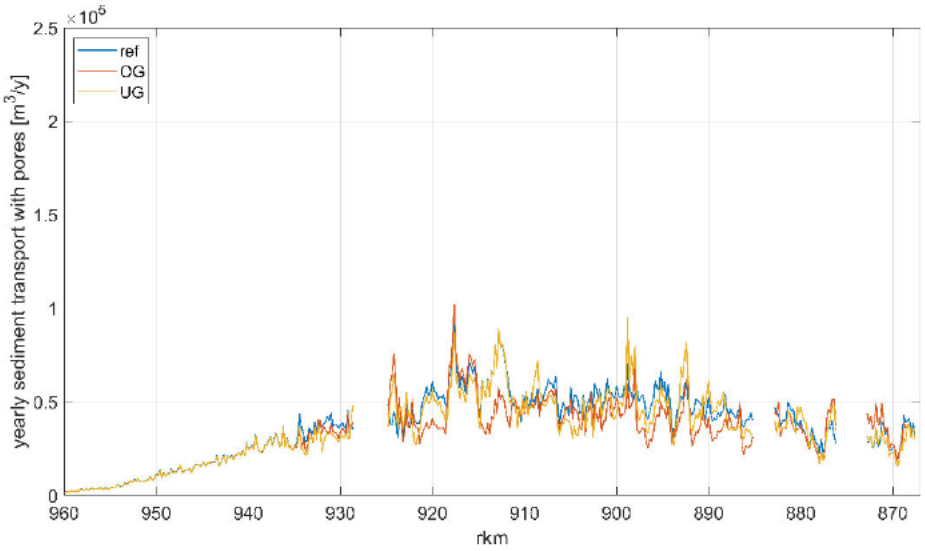
   Stroomsnelheidsverschillen interactief – stroomsnelheid_difference.html

C Extra figuren morfologie

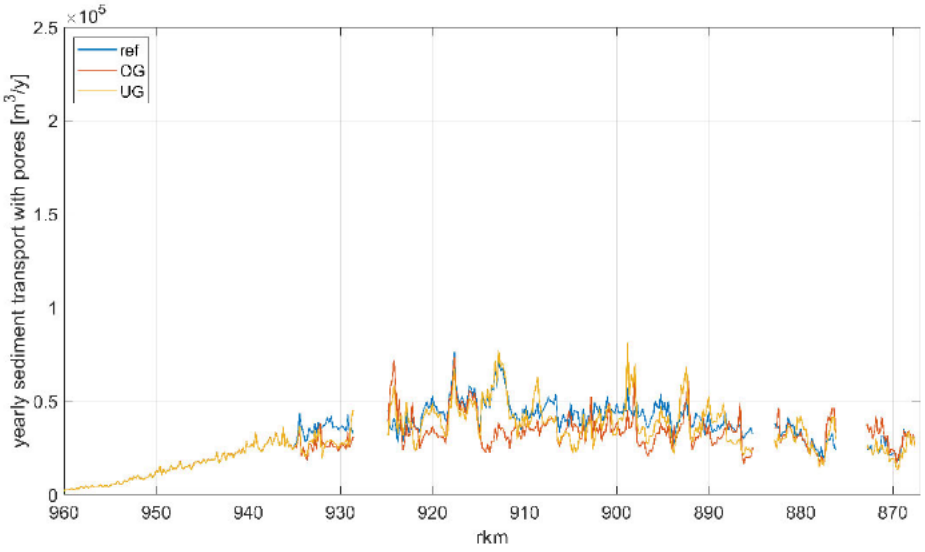
C.1 Vergelijking van het transport per afvoerniveau tussen de varianten (gemiddelde hydrograaf)



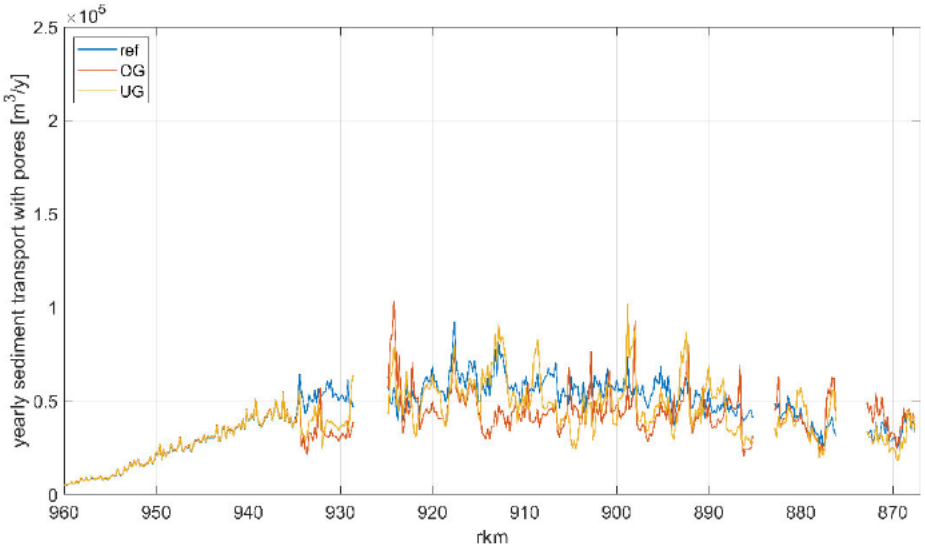
Q1020



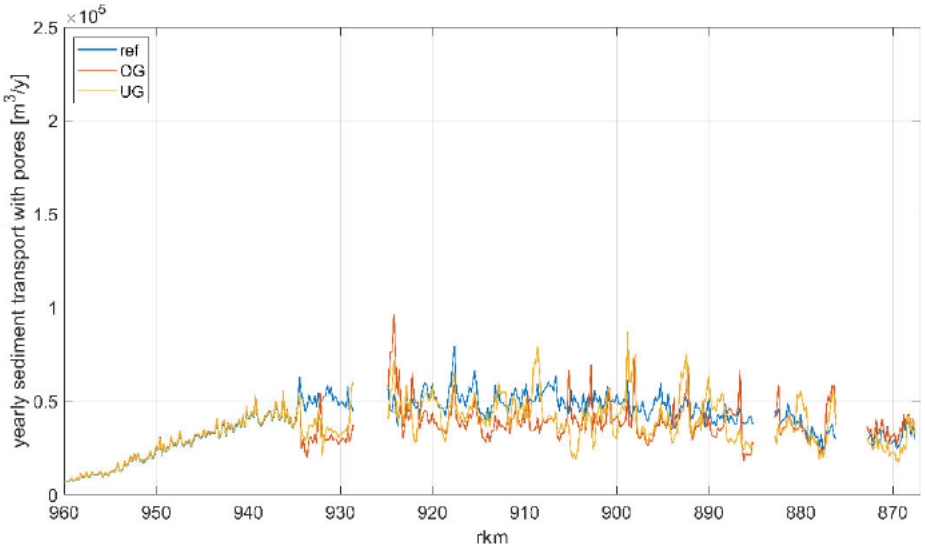
Q1400


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
ref
OG
UG
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

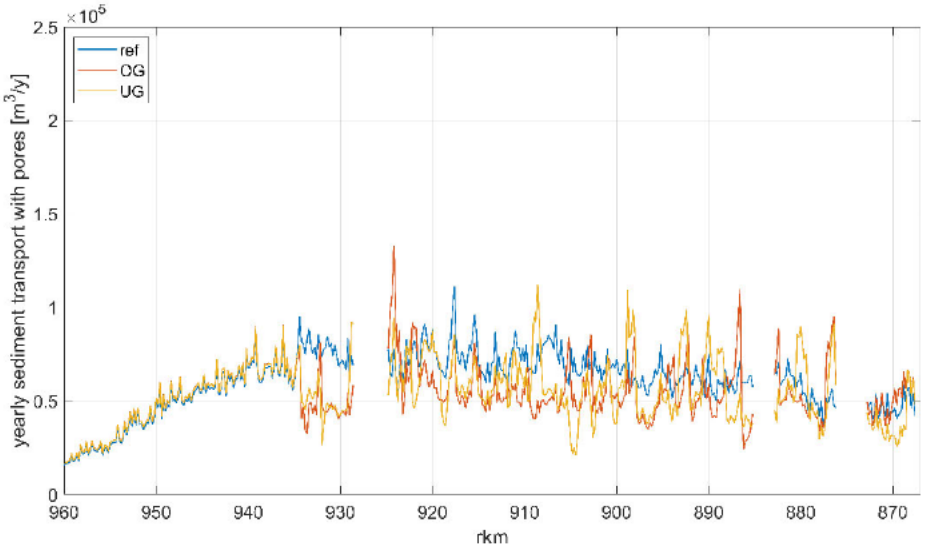
Q1630


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
ref
OG
UG
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

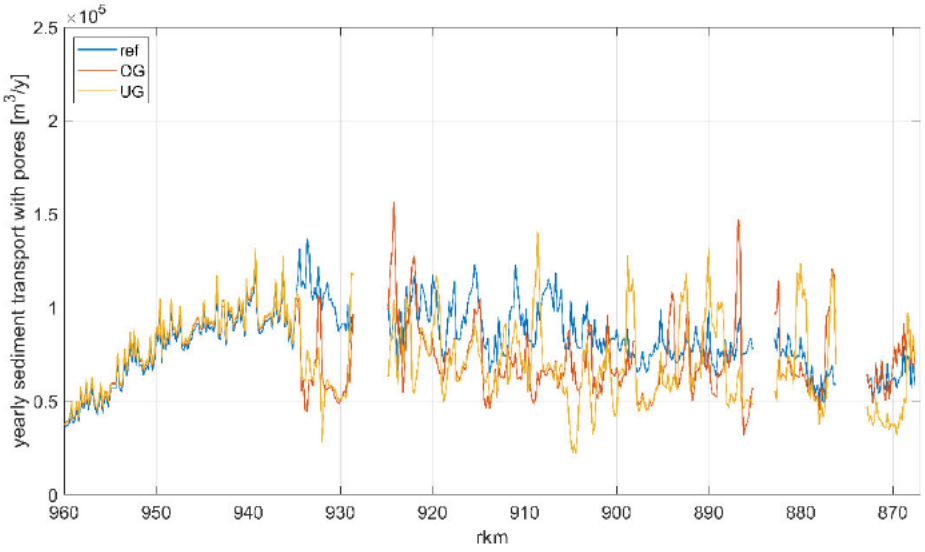
Q2020


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
ref
OG
UG
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

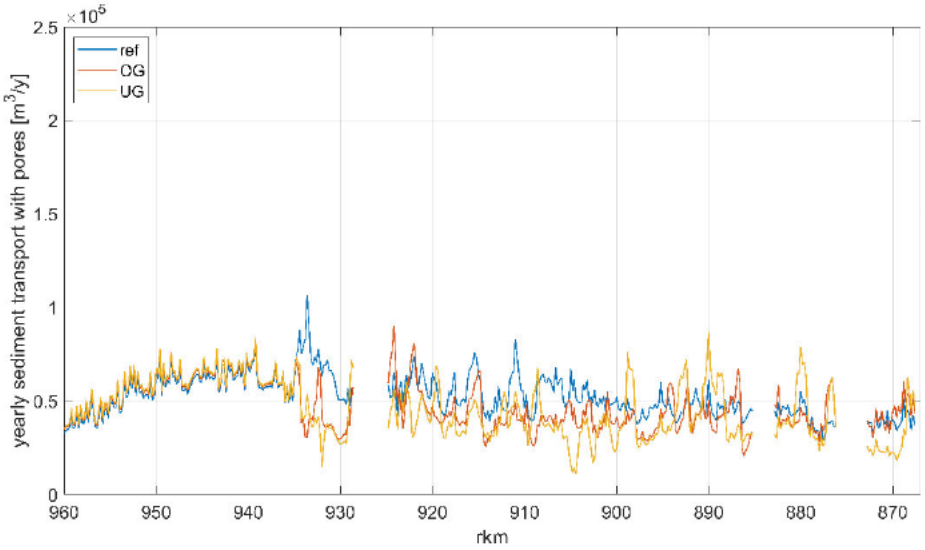
Q2500


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
ref
OG
UG
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

Q3220


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
ref
OG
UG
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

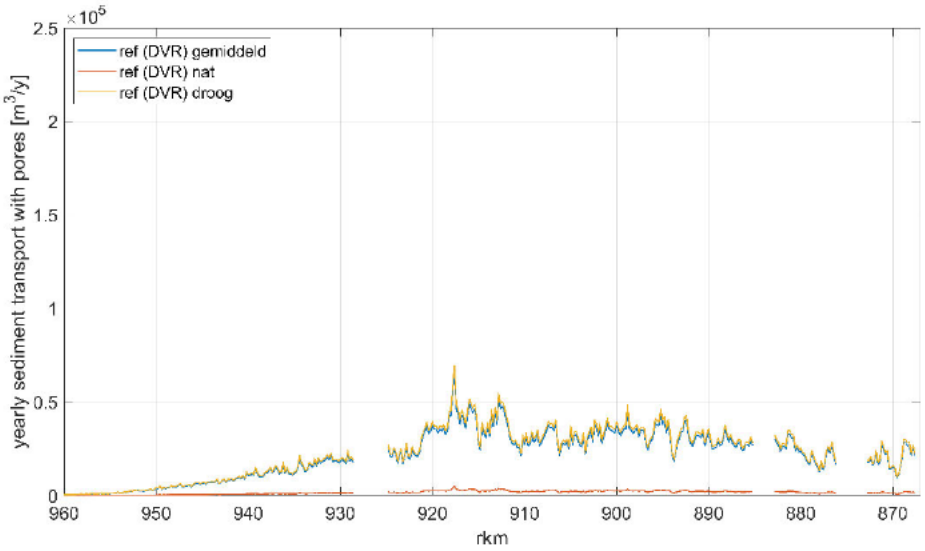
Q4350


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
ref
OG
UG
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

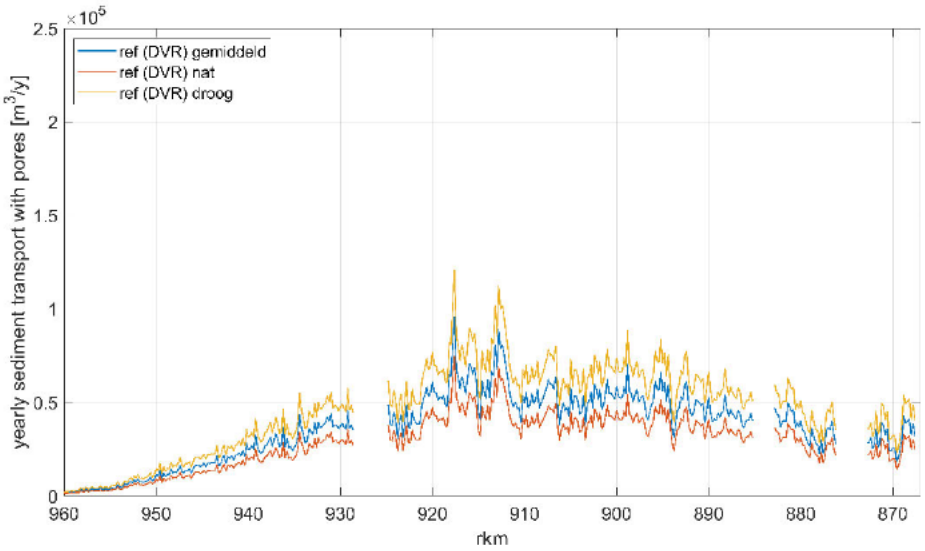
Q5800

C.2 Vergelijking van het transport per afvoerniveau voor de verschillende hydrografen

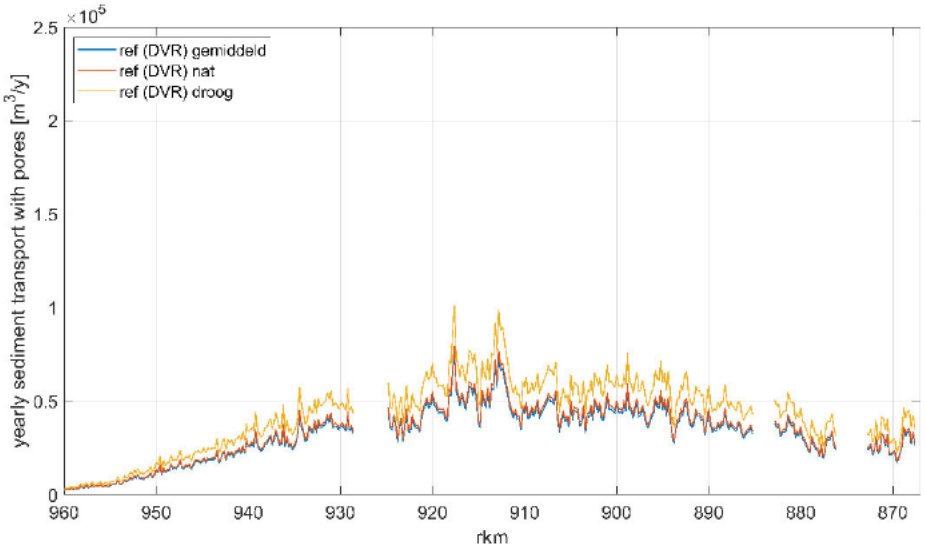
C.2.1 Referentie



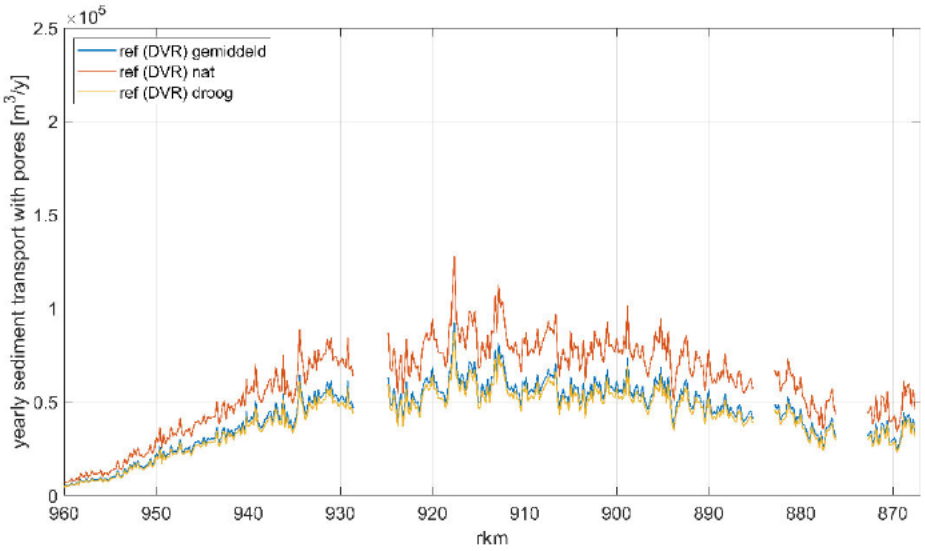
Q1020



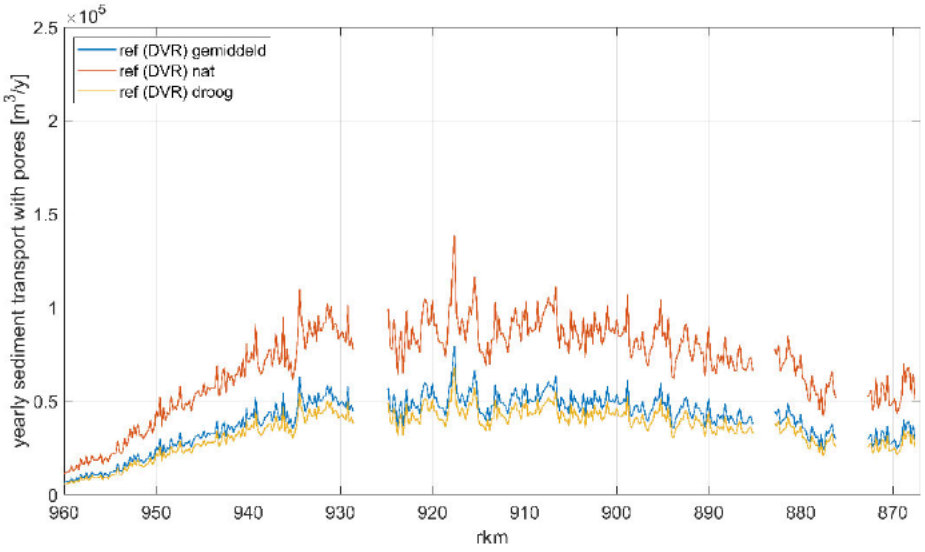
Q1400


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
ref (DVR) gemiddeld
ref (DVR) nat
ref (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

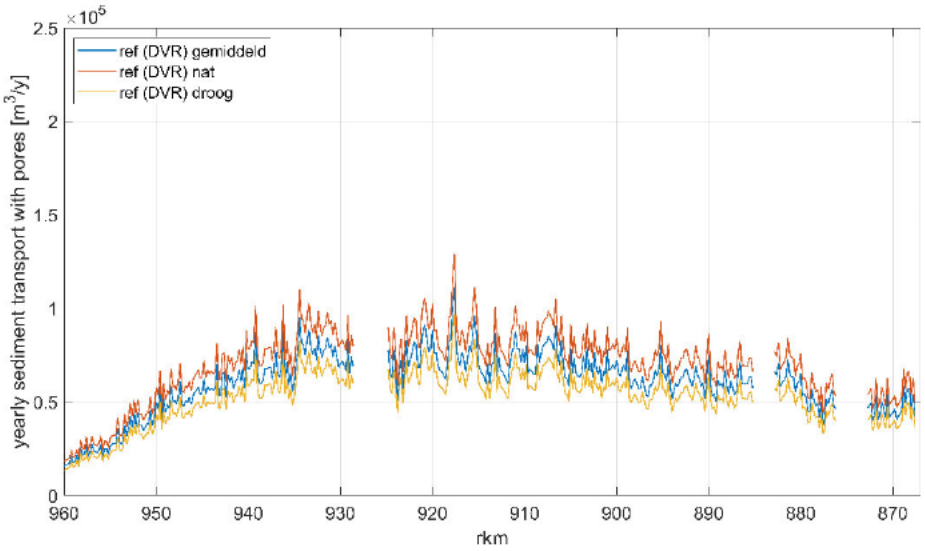
Q1630


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
ref (DVR) gemiddeld
ref (DVR) nat
ref (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

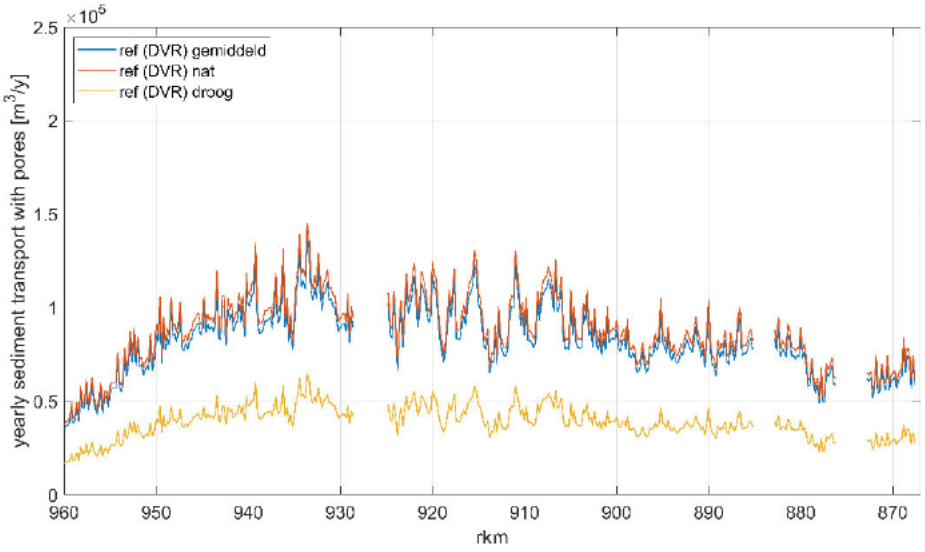
Q2020


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
ref (DVR) gemiddeld
ref (DVR) nat
ref (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

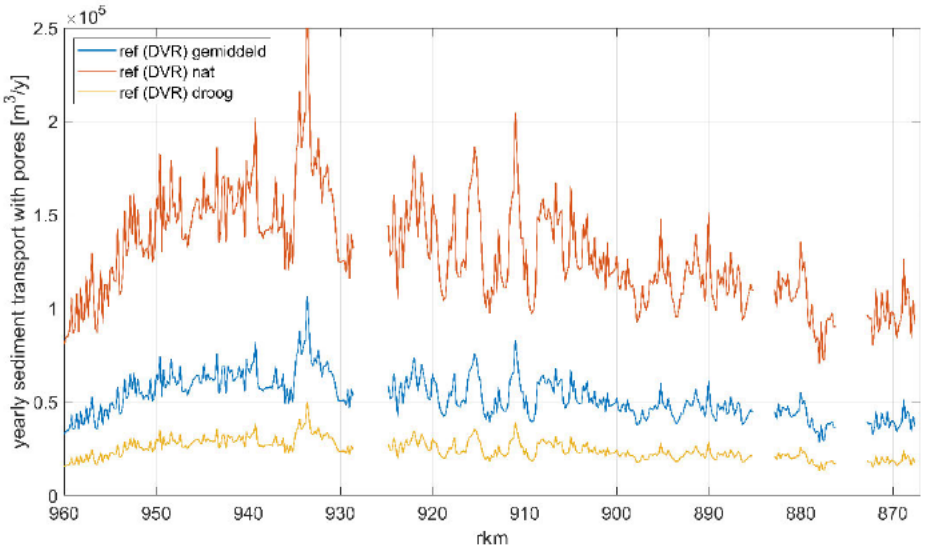
Q2500


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
ref (DVR) gemiddeld
ref (DVR) nat
ref (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

Q3220

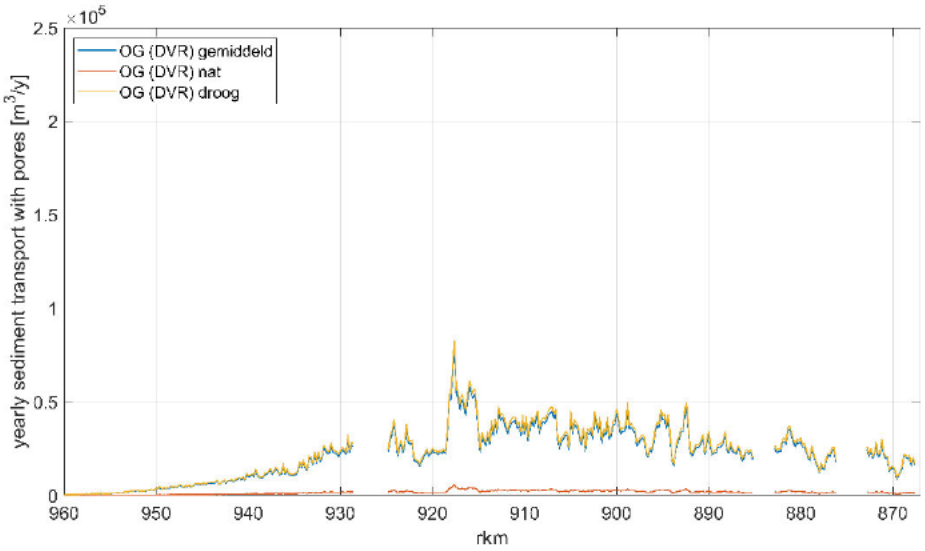

×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
ref (DVR) gemiddeld
ref (DVR) nat
ref (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

Q4350

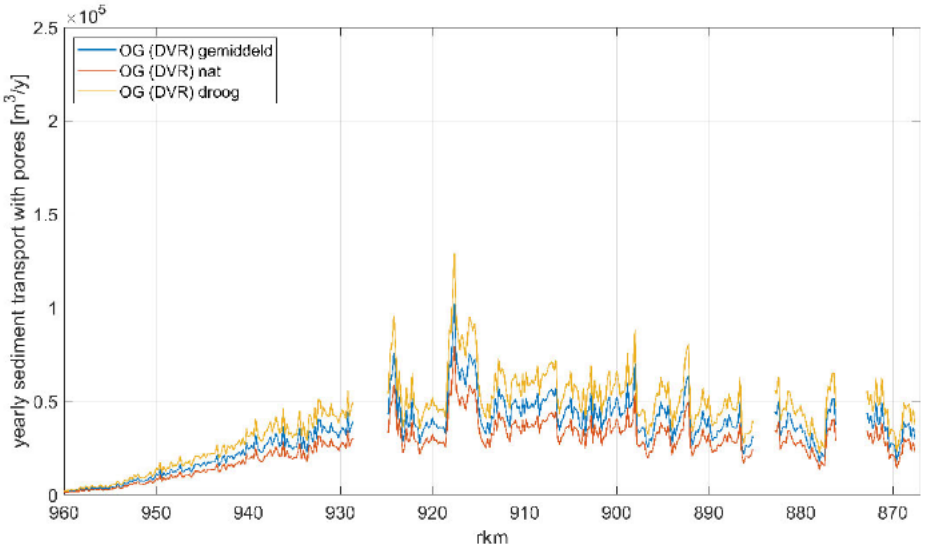

×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
ref (DVR) gemiddeld
ref (DVR) nat
ref (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

Q5800

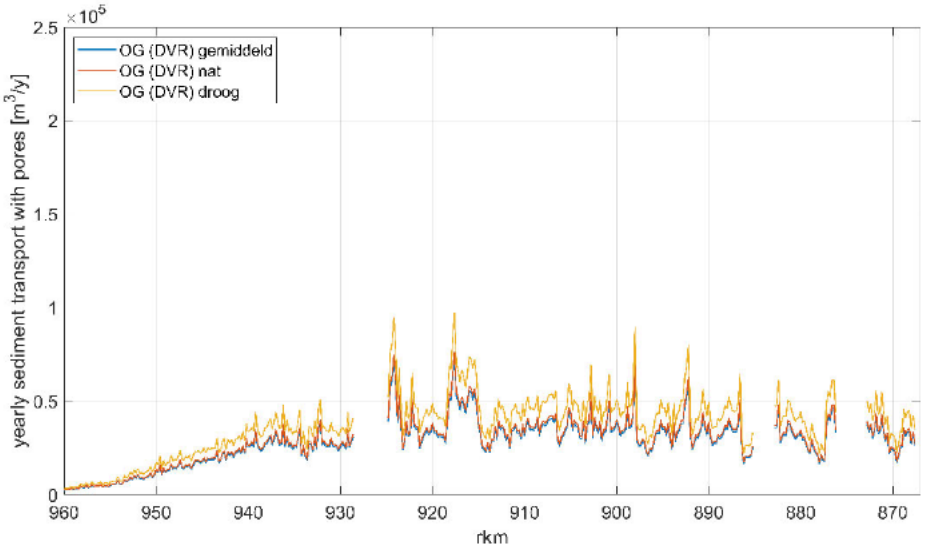
C.2.2 Oevergeulen



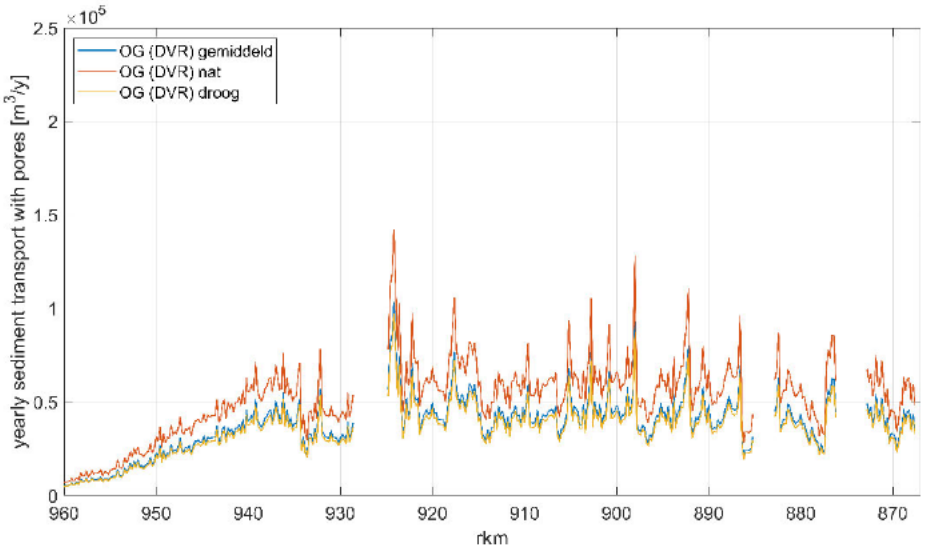
Q1020



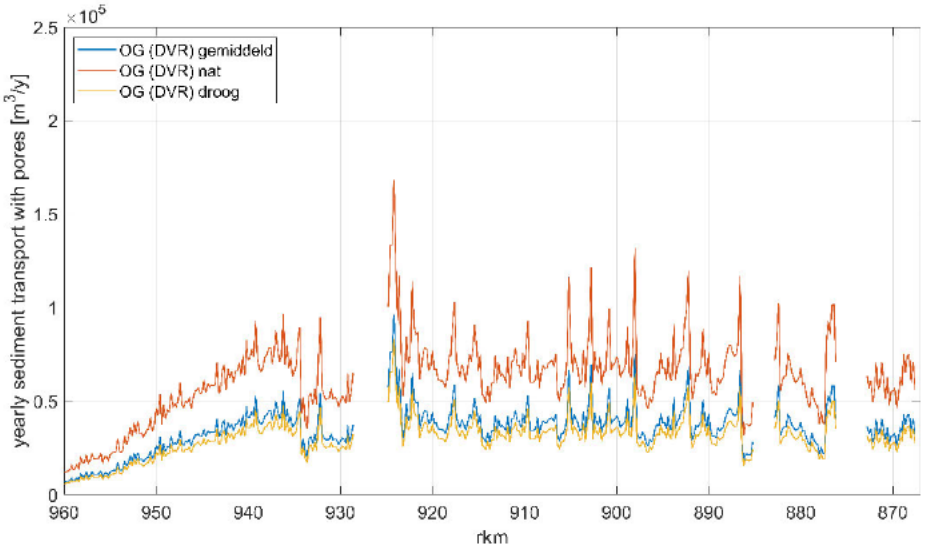
Q1400


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
OG (DVR) gemiddeld
OG (DVR) nat
OG (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

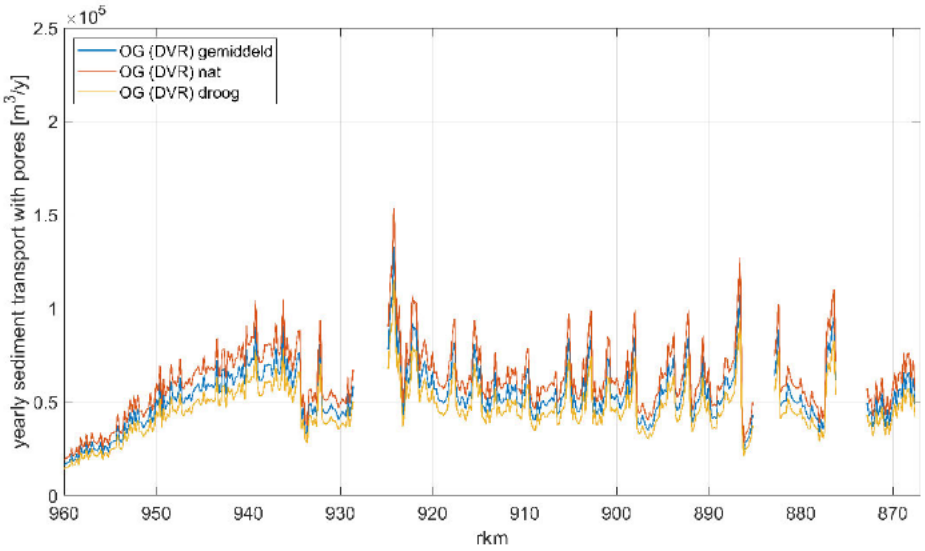
Q1630


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
OG (DVR) gemiddeld
OG (DVR) nat
OG (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

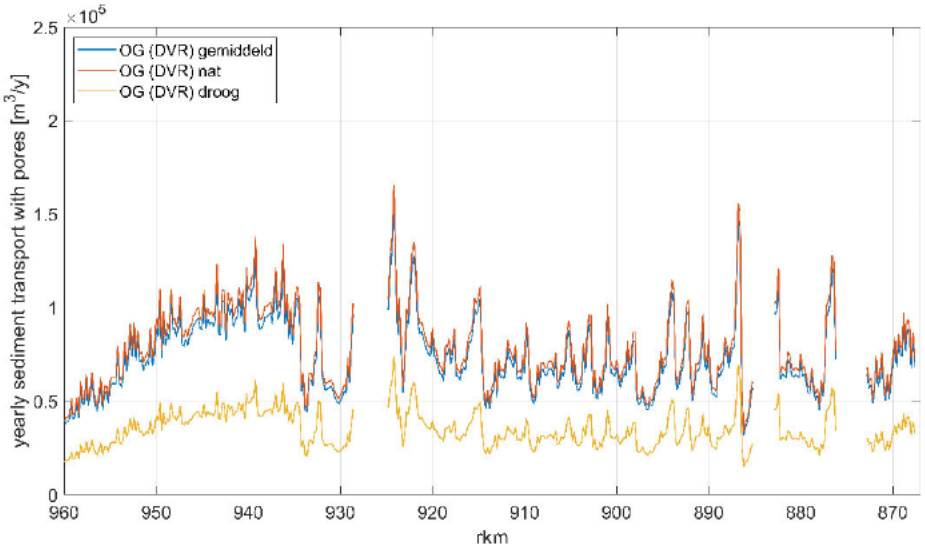
Q2020


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
OG (DVR) gemiddeld
OG (DVR) nat
OG (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

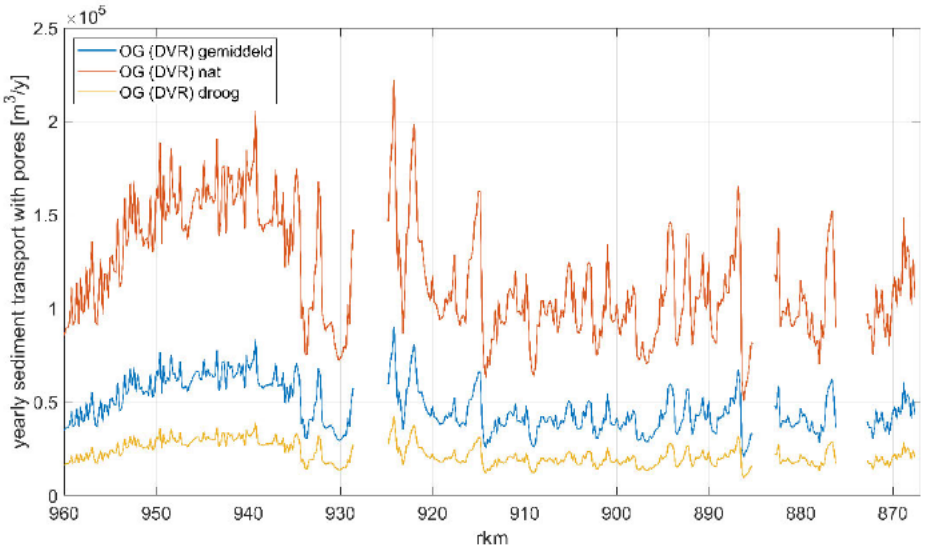
Q2500


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
OG (DVR) gemiddeld
OG (DVR) nat
OG (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

Q3220

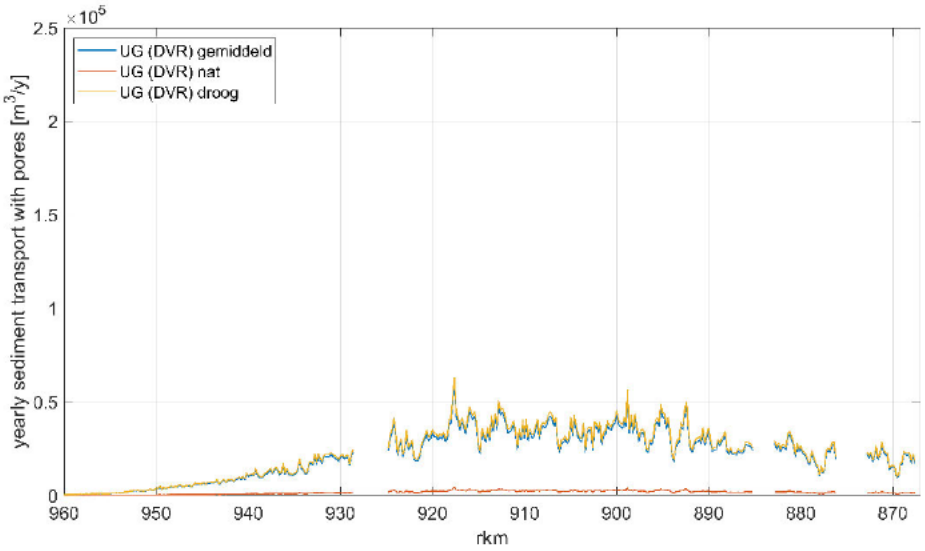

×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
OG (DVR) gemiddeld
OG (DVR) nat
OG (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

Q4350

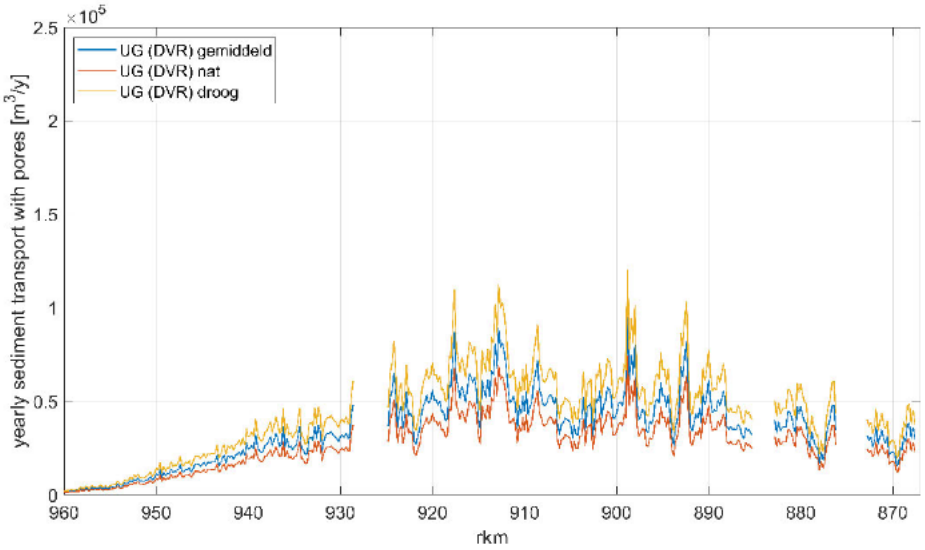

×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
OG (DVR) gemiddeld
OG (DVR) nat
OG (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

Q5800

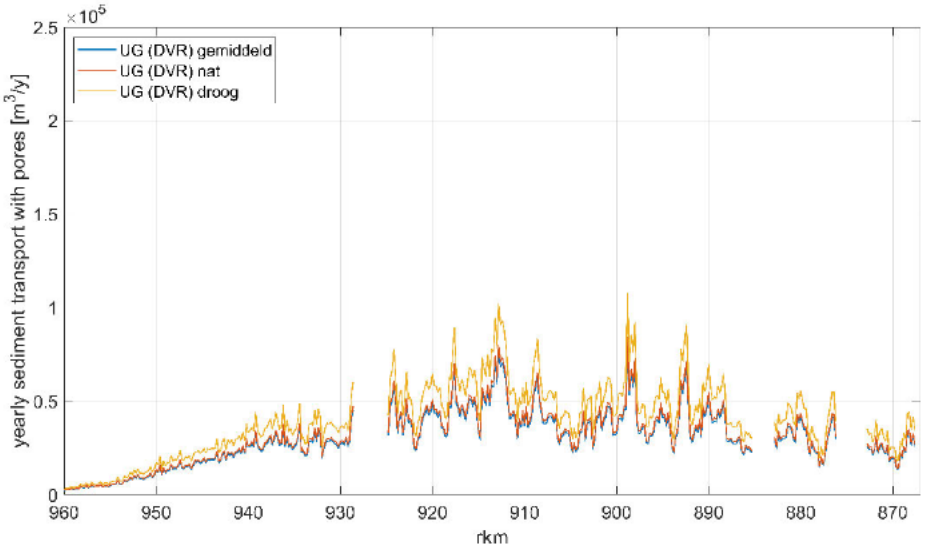
C.2.3 Uiterwaardgeulen



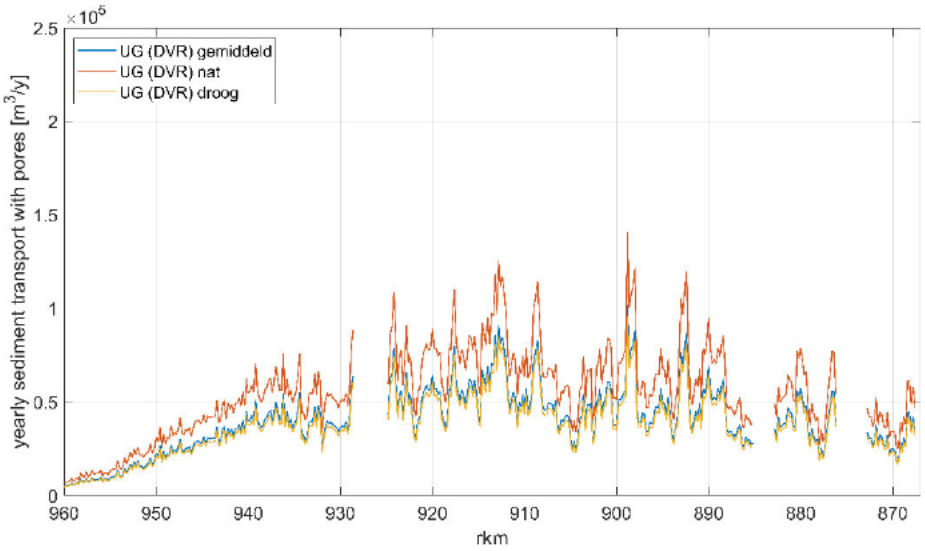
Q1020



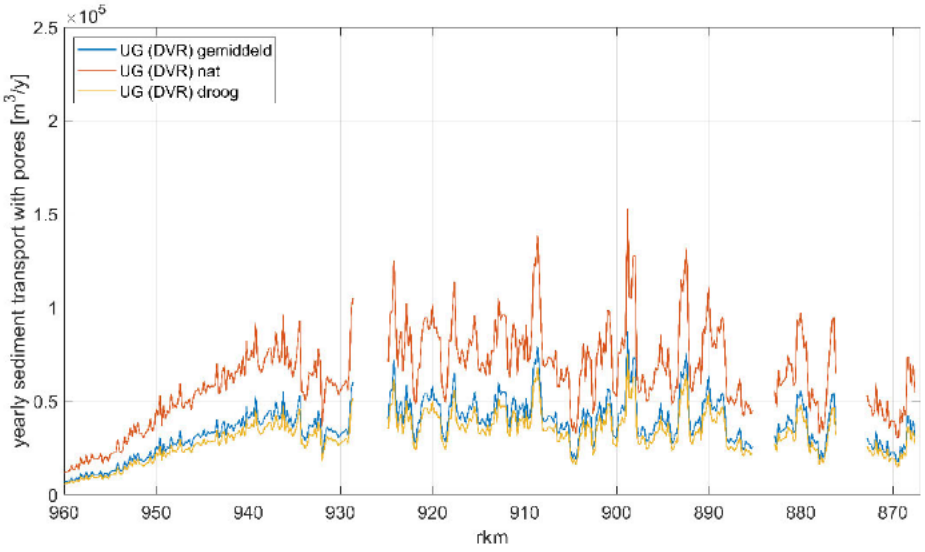
Q1400


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
UG (DVR) gemiddeld
UG (DVR) nat
UG (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

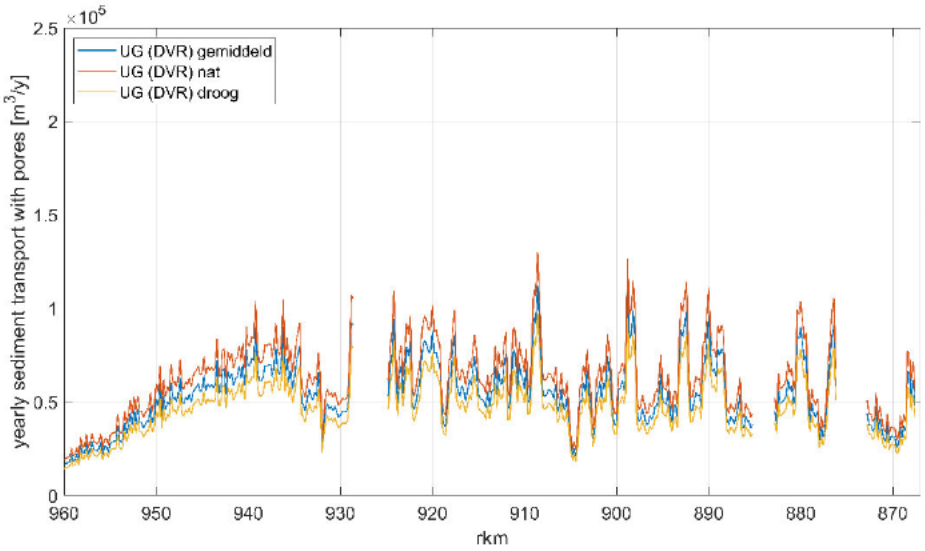
Q1630


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
UG (DVR) gemiddeld
UG (DVR) nat
UG (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

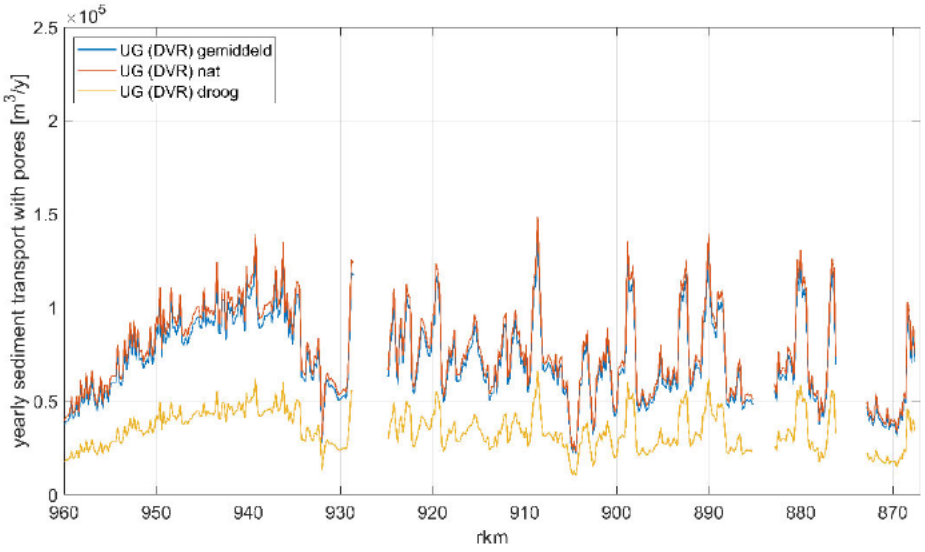
Q2020


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
UG (DVR) gemiddeld
UG (DVR) nat
UG (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

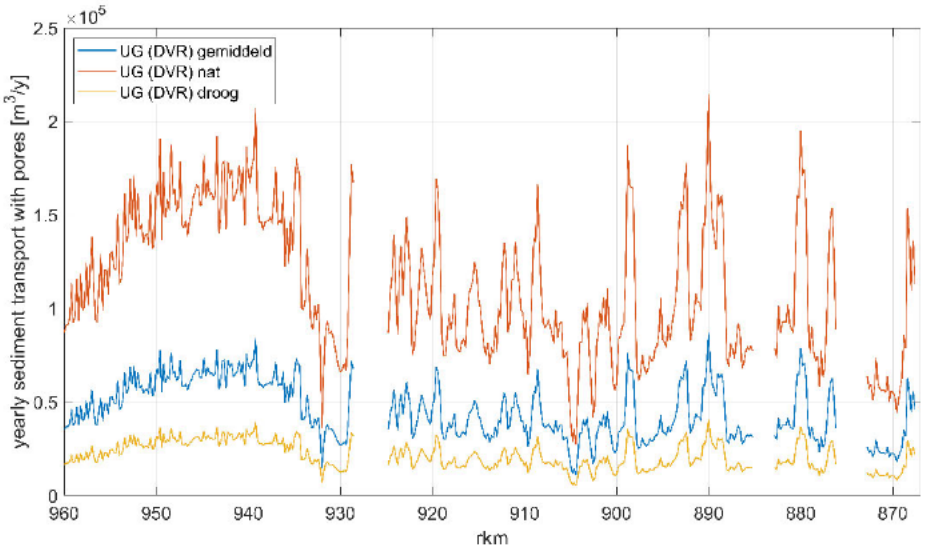
Q2500


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
UG (DVR) gemiddeld
UG (DVR) nat
UG (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

Q3220


×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
UG (DVR) gemiddeld
UG (DVR) nat
UG (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

Q4350

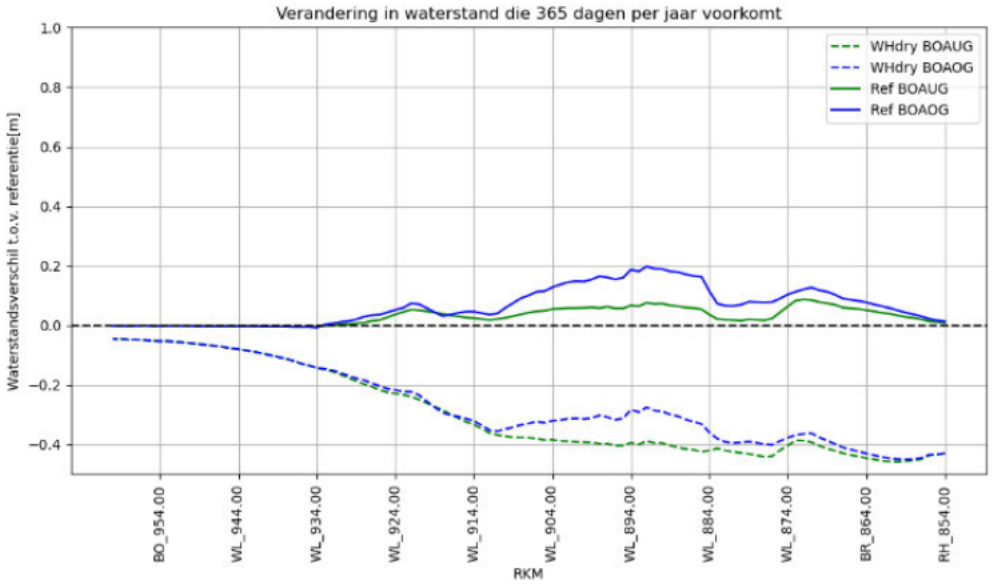

×10^5
2.5
2
1.5
1
0.5
0
UG (DVR) gemiddeld
UG (DVR) nat
UG (DVR) droog
yearly sediment transport with pores [m^3/y]
960
950
940
930
920
910
900
890
880
870
rkm

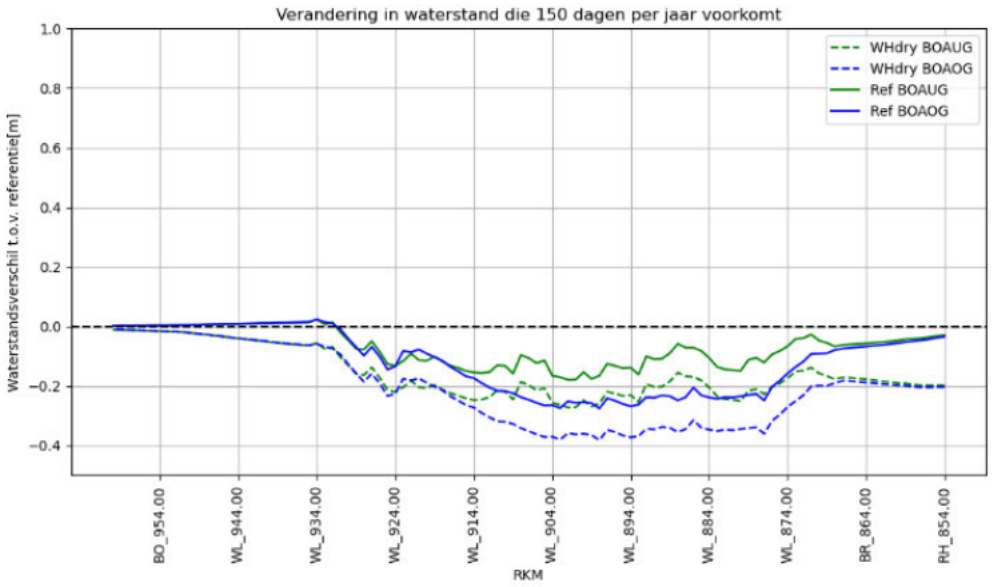
Q5800

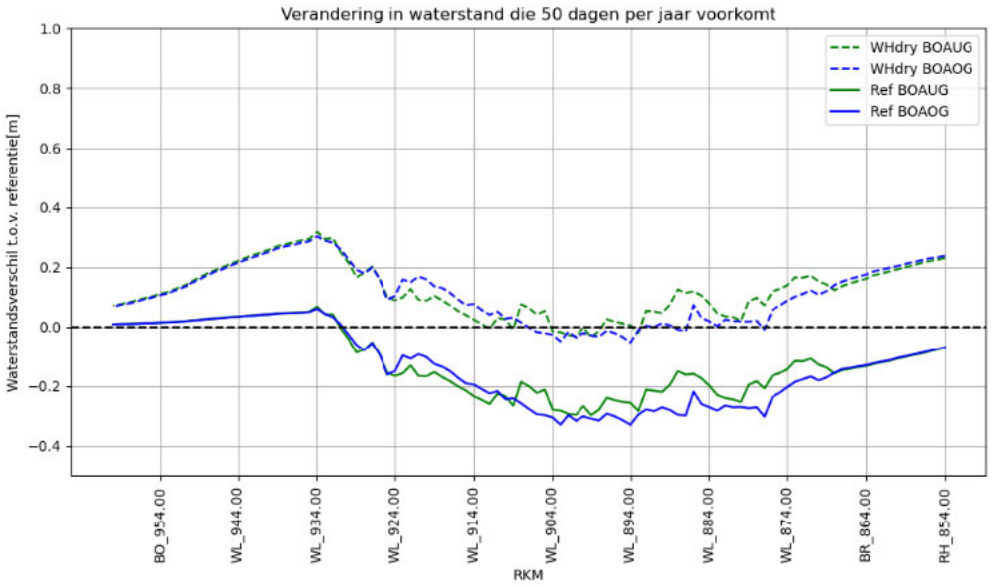
D Extra figuren rivierfuncties

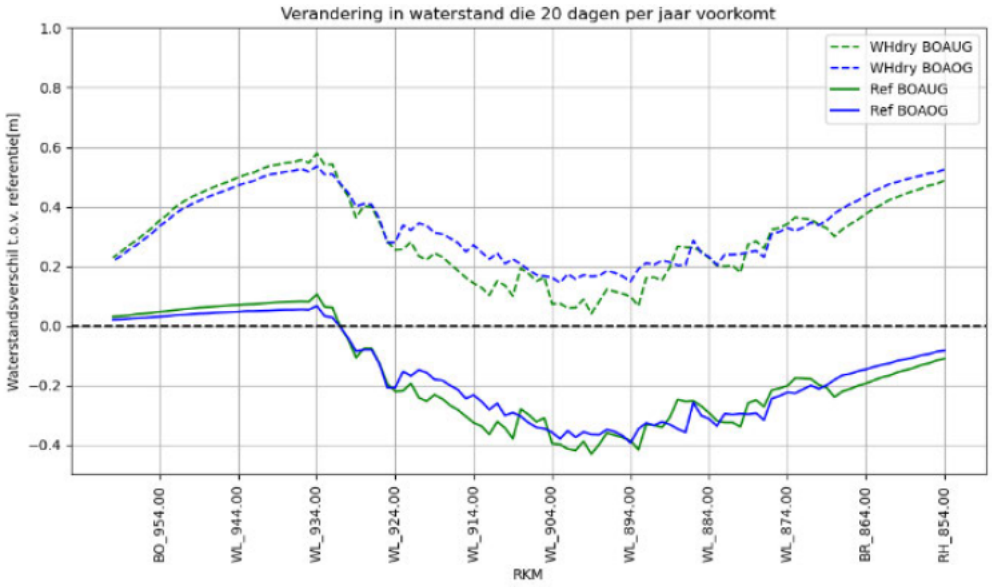
D.1 Natuur

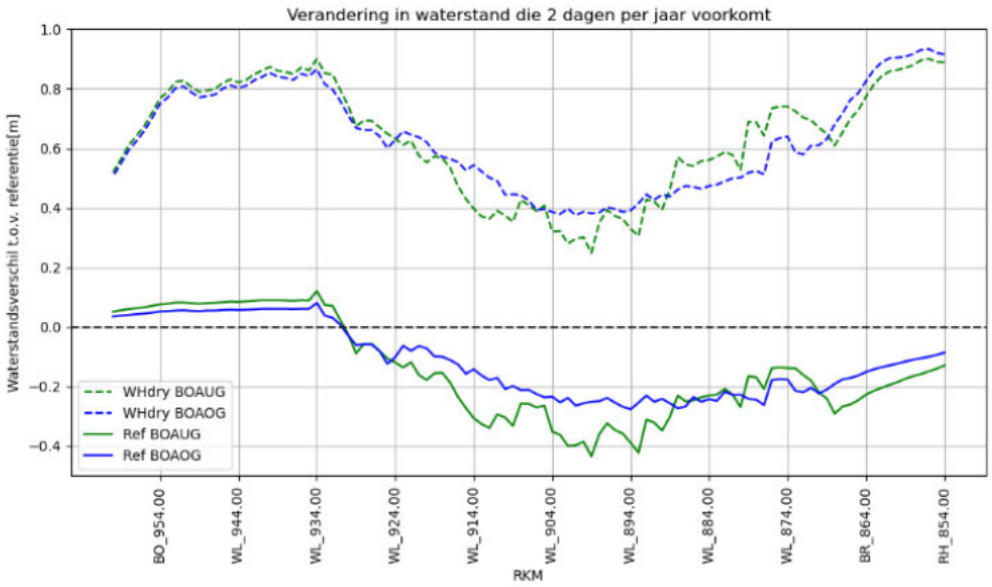
Overstromingsduren






Verandering in waterstand die 50 dagen per jaar voorkomt
Waterstandsverschil t.o.v. referentie[m]
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
−0.2
−0.4
WHdry BOAUG
WHdry BOAOG
Ref BOAUG
Ref BOAOG
BO_954.00
WL_944.00
WL_934.00
WL_924.00
WL_914.00
WL_904.00
WL_894.00
WL_884.00
WL_874.00
BR_864.00
RH_854.00
RKM


Verandering in waterstand die 20 dagen per jaar voorkomt
Waterstandsverschil t.o.v. referentie[m]
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
−0.2
−0.4
WHdry BOAUG
WHdry BOAOG
Ref BOAUG
Ref BOAOG
BO_954.00
WL_944.00
WL_934.00
WL_924.00
WL_914.00
WL_904.00
WL_894.00
WL_884.00
WL_874.00
BR_864.00
RH_854.00
RKM


Verandering in waterstand die 2 dagen per jaar voorkomt
Waterstandsverschil t.o.v. referentie[m]
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
−0.2
−0.4
WHdry BOAUG
WHdry BOAOG
Ref BOAUG
Ref BOAOG
BO_954.00
WL_944.00
WL_934.00
WL_924.00
WL_914.00
WL_904.00
WL_894.00
WL_884.00
WL_874.00
BR_864.00
RH_854.00
RKM

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