

Effectbepaling nulalternatief IRM



Effectbepaling nulalternatief IRM

Auteur(s)

Nathalie Asselman

Marjolein Mens

Maaïke Maarse

Bart Maas

Peter de Grave

Eveline van der Deijl

Effectbepaling nulalternatief IRM

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Yvo Snoek
Referenties	
Trefwoorden	Integraal Riviermanagement, IRM, klimaatverandering, rivierbodemplugging

Documentgegevens

Versie	0.5
Datum	10-11-2022
Projectnummer	11208036-004
Document ID	11208036-004-ZWS-0002
Pagina's	227
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Nathalie Asselman	Deltares
	Jurjen de Jong	Deltares
	Marjolein Mens	Deltares
	Maaïke Maarse	Deltares
	Bart Maas	Deltares
	Peter de Grave	Deltares
	Eveline van der Deijl	Deltares

Samenvatting

Inleiding

Vanaf de zomer 2019 werken rijk, provincies, waterschappen en gemeenten samen aan het programma Integraal RivierManagement (IRM) voor een veilige en bevaarbare rivier en een vitaal en aantrekkelijk rivierengebied. Beleidskeuzes, die in het kader van IRM zullen worden genomen over sedimentbeheer/ rivierbodemplugging en bergings- en afvoercapaciteit, moeten goed onderbouwd worden, onder meer door de effecten van verschillende beleidsalternatieven in beeld te brengen. Daartoe worden deze beleidsalternatieven vergeleken met een referentiesituatie: een nulalternatief, waarin het huidige beleid en beheer onveranderd wordt voortgezet. Dit rapport beschrijft de effecten van dit nulalternatief voor het zichtjaar 2050 op de belangrijkste functies van het rivierengebied: natuur, zoetwatervoorziening, bevaarbaarheid en hoogwaterveiligheid.

Het nulalternatief

Het nulalternatief is de referentiesituatie, ofwel de situatie die naar verwachting ontstaat als er géén Integraal Riviermanagement plaatsvindt. Dit nulalternatief is in een apart rapport in detail beschreven (Asselman & Snoek, 2021). De effecten van het nulalternatief zijn het gevolg van autonome ontwikkelingen, zoals klimaatverandering, rivierbodemerrosie en sociaal-economische ontwikkelingen, waarbij wordt uitgegaan van ongewijzigd beleid en beheer. Dat betekent dat is verondersteld dat er geen maatregelen worden getroffen om de zomerbederosie in de betreffende trajecten van de Rijn en de Maas te stoppen. Voor het nulalternatief is wel aangenomen dat enkele rivierverruimingsmaatregelen worden uitgevoerd, namelijk die waarvoor de bestuurlijke besluitvorming reeds heeft plaats gevonden. Dat zijn onder meer Stadsblokken Meinerswijk, Rivierklimaatpark IJsselpoort en Meanderende Maas.

Dit rapport

Dit rapport beschrijft de gebruikte methoden en resultaten van de kwantitatieve effectbepaling van de verwachte ontwikkelingen op de natuur, zoetwatervoorziening, bevaarbaarheid en hoogwaterveiligheid voor zichtjaar 2050. Voor deze kwantitatieve effectbepaling is voor klimaatverandering en sociaal-economische ontwikkelingen aangesloten bij het Deltascenario Stoom. Dit scenario veronderstelt sterke economische groei met gelijktijdige snelle klimaatverandering conform het klimaatscenario W+/W_{Hdry}. In de discussie wordt nog kort ingegaan op wat een minder snelle klimaatverandering (G) zou betekenen.

Om de resultaten goed te duiden, is tevens geprobeerd vast te stellen in welke mate de effecten in de periode 2020 tot 2050 kunnen worden toegeschreven aan hetzij doorgaande rivierbodemerrosie hetzij klimaatverandering. Het rapport gaat dus niet – of slechts zijdelings – over de gevolgen van ontwikkelingen in het verleden op de verschillende rivierfuncties; daarvoor wordt verwezen naar de systeembeschouwing (Klijn et al., 2022).

Effecten van rivierbodemerrosie op waterstanden

Alle effecten op waterstanden, en voor de Rijn en de Maas op de afvoerverdeling, zijn berekend met de hydraulische D-HYDRO-modellen, die ook de basis vormen voor het Beoordelings- en OntwerpInstrumentarium (BOI) voor de waterkeringen. Voor een aantal vaste Rijn- en Maasafvoeren is eerst verkend hoe de waterstanden veranderen als gevolg van de morfologische ontwikkelingen in het rivierbed. Daartoe is in de modellen voor de Rijn en de Maas de rivierbodemplugging zo aangepast dat deze overeenkomt met de verwachte bodemplugging in 2050. Tevens is voor de Rijn en de Maas de maatregel Rivierklimaatpark IJsselpoort aan het model toegevoegd. De overige rivierverruimingsmaatregelen van het nulalternatief waren al eerder in het hydraulisch model verwerkt. Met de nieuwe schematisatie zijn vervolgens de waterstanden berekend voor een groot aantal Rijn- en Maasafvoeren, van laag tot zeer hoog.

In deze – eerste – stap is dus nog niet gekeken naar het effect van klimaatverandering op de frequentieverdeling van de rivierafvoeren, maar alleen naar het effect van rivierbodemerrosie; het effect van klimaatverandering wordt verderop besproken.

Op de Maas blijft de waterstandsdeling als gevolg van rivierbodemerrosie beperkt tot maximaal -0,2 m op de Grensmaas en -0,1 m op de Zandmaas, ondanks dat de verwachte rivierbodemerrosie tot 2050 op de Grensmaas plaatselijk wel 0,3 m bedraagt. Het grootste effect treedt hier op bij middelhoge rivierafvoeren (1.300 tot 1.700 m³/s te Eijsden). De verklaring voor dit beperkte effect is dat de Maas bij lagere afvoeren gestuwd is terwijl er bij zeer hoge afvoeren juist veel water door het winterbed stroomt. Op de Grensmaas zijn de veranderingen in waterstanden bij lage rivierafvoeren bovendien beperkt omdat de daar aangelegde grinddrempels in stand worden gehouden (conform huidig beleid) en zo voorkomen wordt dat laagwaterstanden te veel dalen.

Op de Rijntakken leidt de ongelijke rivierbodemerrosie in het splitsingspuntengebied (met maximaal 0,5 m op de Boven-Waal versus met maximaal ongeveer 0,3 m op het Pannerdensch Kanaal) bij lage afvoeren tot een verandering in de afvoerverdeling. De afvoer over de Waal neemt procentueel toe, ten koste van die over de IJssel. Op de IJssel dalen de waterstanden hierdoor aanzienlijk (met meer dan 0,3 m bij zeer lage afvoeren te Lobith). Op de Boven-Waal leidt de rivierbodemerrosie ook tot lagere waterstanden, want hier is de waterstandsdeling door de bodemerrosie groter dan de stijging door de relatief grotere afvoer. Op de Beneden-Waal is geen sprake meer van rivierbodemerrosie en worden de laagwaterstanden iets hoger door de verschuiving in de afvoerverdeling. De rivierbodemerrosie op de Boven-Waal en het Pannerdensch Kanaal leidt ook tot lagere waterstanden op de Boven-Rijn (tot meer dan 0,3 m lager bij zeer lage afvoeren te Lobith).

Bij hoogwater verandert de afvoerverdeling op de Rijn niet, omdat de regelwerken op de splitsingspunten jaarlijks zo worden ingesteld dat wordt voldaan aan de door het beleid vastgestelde afvoerverdeling. Door de doorgaande rivierbodemerrosie komen de regelwerken in een middenpositie te staan (in de huidige situatie staat regelwerk Pannerden bijna helemaal open, en het regelwerk bij de Hondbroeksche Pleij vrijwel helemaal dicht); en dat blijft zo als wordt overgegaan naar een instelling van de regelwerken voor de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling bij 17.000 m³/s te Lobith in 2050, waarbij de Nederrijn-Lek wordt ontzien. Het regelbereik wordt in het nulalternatief dus weer groter dan het nu is.

Tenslotte stellen we – mogelijk ten overvloede – vast dat klimaatverandering geen effect heeft op de bij bepaalde – vaste – rivierafvoeren optredende waterstanden, noch op de afvoerverdeling. Klimaatverandering heeft wel effect op de overschrijdingskansen van rivierafvoeren en waterstanden: in het W+/W_{Hdry} scenario wordt in de winter de kans op hoge waterstanden groter, terwijl in de zomer juist de kans op langdurig lage waterstanden toeneemt.

Natuur

Methode

In de effectbepaling voor buitendijkse natuur is onderzocht welke veranderingen in *potentiële*¹ ecotoopverdeling het gevolg zullen zijn van veranderingen in overstromingsduur en grondwaterstanden.

Met behulp van HABITAT is berekend hoe de potentie voor verschillende ecotooptypen verandert als gevolg van veranderingen in overstromingsduur. En om het effect van veranderingen in grondwaterstanden op de riviernatuur te schatten, is gebruik gemaakt van rekenregels die zijn opgesteld door Van den Berg (2021).

¹ Er wordt gekeken naar welke ecotopen er kunnen ontstaan gegeven de hydrologische randvoorwaarden. De potentiële ecotoopverdeling kan voor de huidige situatie anders zijn dan de verdeling die nu in het veld wordt aangetroffen, bijvoorbeeld als gevolg van na-ijleffecten (bestaande vegetatie kan zich soms lang handhaven).

Door de berekende potentiële ecotoopverdeling te vergelijken met de doelen die zijn gesteld vanuit de PAGW is vervolgens een indruk verkregen in hoeverre de doelen van de PAGW gerealiseerd kunnen worden bij het nulalternatief IRM; of dat aanvullende maatregelen nodig zullen zijn om deze doelen te bereiken.

Tevens is met het instrumentarium voor de BasisRivierbodemplugging (BRL) verkend in hoeverre het meestromen van nevengeulen wordt beïnvloed, en er is een kwalitatieve beoordeling uitgevoerd van effecten op de ecologisch relevante factoren (hydro)dynamiek, habitatdiversiteit en connectiviteit.

Huidige situatie

De analyses laten zien dat de overstromingsduur van de uiterwaarden langs de Rijntakken voldoende is om zowel zachthout- als hardhoutoebos te laten ontstaan. De uiterwaarden langs de Maas liggen daarvoor veelal te hoog; hier kan wel natuur ontstaan, maar is geen sprake van echte riviernatuur.

Wanneer de verwachte grondwaterstanden als doorslaggevend zouden worden beschouwd dan blijken de uiterwaarden langs zowel de Rijntakken als de Maas vooral geschikt voor 'droge' ecotooptypen (droog grasland en hardhoutoebos) en niet voor nattere ecotooptypen (zoals zachthoutoebos, natte graslanden of riet- en moerasvegetaties); daarvoor zijn de voorjaarsgrondwaterstanden in grote delen van de uiterwaarden nu vermoedelijk al te laag. Lokaal kunnen langs de Rijntakken nog wel nattere ecotooptypen voorkomen (met name zachthoutoebos en nat grasland), maar de arealen zijn beperkt. Voor de Maas geldt dat nog sterker.

Dynamiek, habitat- of milieudiversiteit en connectiviteit zijn volgens de PAGW sleutelfactoren voor natuurherstel. Vooral langs de Maas is er weinig overstromingsdynamiek. De vrij afstromende Rijntakken (Waal en IJssel) kennen meer dynamiek, maar ook die is weinig natuurlijk. In bestaande natuurgebieden langs de Rijntakken is sprake van een relatief grote diversiteit aan overstromingsduren, door een gevarieerd reliëf. Door de rivierbodemerossie van de afgelopen decennia zijn de grondwaterstanden over grote trajecten langs de Rijntakken echter erg sterk gedaald, waardoor de diversiteit is afgenomen, want alles is droger geworden. Langs de gestuwde Maas is de diversiteit aan leefmilieus beperkt; het gestuwde karakter van de rivier en de hoge ligging van de uiterwaarden worden gereflecteerd in relatief homogene milieus die vooral geschikt zijn voor drogere ecotooptypen.

In de Maas en de Nederrijn-Lek wordt de connectiviteit beperkt doordat de stuwen een belangrijk obstakel vormen voor de trek en verspreiding van aquatische organismen. De lage ligging van het zomerbed ten opzichte van het winterbed zorgt langs zowel de Maas als langs vrijwel alle bovenstroomse trajecten van de Rijntakken voor een slechte connectiviteit tussen zomer- en winterbed.

Nulalternatief IRM

Voor natuur is voor effecten van het nulalternatief gekeken naar het gecombineerde effect van veranderingen in rivierbodemplugging en klimaatverandering. De berekende veranderingen in overstromingsduur blijken dan gering. Want waar doorgaande erosie van het zomerbed leidt tot een beperkte afname van de overstromingsduur, neemt door klimaatverandering de kans op hoogwater juist toe. Deze effecten heffen elkaar vrijwel op. Wel resulteert doorgaande erosie van het zomerbed ook in lagere (voorjaars)grondwaterstanden langs de bovenloop van de vrij-afstromende Rijntakken en langs de Grensmaas. Doordat de uiterwaarden en weerden in deze gebieden nu ook al vrijwel uitsluitend geschikt zijn voor de drogere ecotooptypen, leidt dit niet tot significante veranderingen in de potentiële ecotoopverdeling. Kortom: het nulalternatief heeft nauwelijks effect op de *potentiële* ecotoopverdeling.

Er kan tevens worden vastgesteld dat in het nulalternatief in 2050 niet voldaan wordt aan de doelen van de PAGW. Dit komt vooral doordat het landbouwareaal in het nulalternatief groot blijft, maar ook doordat de uiterwaarden op veel plaatsen te droog zijn of worden voor de gewenste natte ecotooptypen. Langs de Rijntakken komt dit vooral door lage grondwaterstanden in het voorjaar en de zomer. Langs de Maas is daarnaast ook de overstromingsduur te beperkt.

Veel bestaande nevengeulen zullen in de toekomst onvoldoende vaak meestromen en delen van de nevengeulen zullen in de zomer droogvallen. Dit is niet alleen het gevolg van de doorgaande rivierbodemerossie, maar ook van de klimaatverandering die leidt tot frequentere en lagere laagwaterstanden. Hierdoor komen KRW-doelstellingen verder onder druk te staan.

Voor dynamiek, habitat- of milieudiversiteit en connectiviteit wordt geconcludeerd dat verdergaande erosie van het zomerbed weliswaar leidt tot een verdere afname van de hydrodynamiek in de uiterwaarden, maar dat deze door de klimaatverandering juist weer toeneemt: het netto effect is daardoor beperkt. Rivierverruimingsmaatregelen die al in het nulalternatief zijn voorzien, leiden ertoe dat op die locaties de milieudiversiteit iets toeneemt (het vergraven van uiterwaarden leidt immers tot meer reliëf), maar dat betreft een beperkt aantal locaties. De doorgaande bodemerossie op de bovenloop van de Rijntakken en de Grensmaas leidt ertoe dat de connectiviteit tussen de uiterwaarden en het zomerbed daar verder afneemt.

Zoetwaterbeschikbaarheid

Methode

Het effect van het nulalternatief IRM op een aantal belangrijke indicatoren voor de zoetwatervoorziening is berekend met het model QWAST. QWAST is ontwikkeld voor het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) om een snelle indruk te kunnen krijgen van de effecten van maatregelpakketten op de zoetwaterbeschikbaarheid in de verschillende wateraanvoergebieden van Nederland. QWAST maakt gebruik van de rivierafvoeren conform Deltascenario Stoom2050 en van de waterstanden en afvoerverdeling op de Rijntakken zoals die zijn berekend met de hydraulische modellen.

In tweede instantie is berekend wat de gevolgen van de veranderingen zijn voor de landbouw, waarbij tevens is verkend wat het nathouden van veengebieden voor additioneel effect zou kunnen hebben.

Huidige situatie

Uit analyses is gebleken dat er – met de meteorologische condities van de afgelopen 100 jaar – in de huidige situatie eens in de 50 jaar sprake is van een watertekort in Noord-Nederland van 10% van de watervraag. Dit deel van het land is afhankelijk van zoetwateraanvoer vanuit het IJsselmeer, dat hoofdzakelijk wordt gevoed door de IJssel.

Het kritieke peil voor inlaat van water uit de IJssel naar de Twentekanalen wordt gemiddeld eens in de 10 jaar overschreden.

Voor de zoetwatervoorziening naar West-Nederland is onder meer gekeken naar de kans op verzilting. Daarbij is vastgesteld dat bij Krimpen aan de IJssel de kritieke grens van 200 mg/l nu ongeveer eens per 10 jaar wordt overschreden.

Nulalternatief IRM

Door alleen al klimaatverandering, uitgaande van klimaatscenario W_{Hdry} , zal de vullingsgraad van het IJsselmeer vaker problematisch worden. De frequentie waarmee sprake zal zijn van een watertekort (van 10% ten opzichte van de watervraag) in Noord-Nederland neemt daardoor toe van gemiddeld eens in de 50 jaar naar gemiddeld eens in de 12 jaar. Als tevens wordt uitgegaan van doorgaande rivierbodemerossie en daardoor afnemende IJsselafoeren, kan deze frequentie verder toenemen tot gemiddeld eens in de 9 jaar. De toenemende watertekorten beïnvloeden onder meer de landbouw in Noord-Nederland: in Deltascenario Stoom neemt het landbouwisico (de gemiddelde jaarlijkse schade) toe met 10-11 miljoen euro per jaar. Ongeveer 18% hiervan is toe te schrijven aan de gevolgen van de rivierbodemerossie op de afvoerverdeling.

Het kritieke rivierpeil voor watertoevoer naar de Twentekanalen wordt in het nulalternatief vaker overschreden. De frequentie neemt door klimaatverandering alleen toe van gemiddeld eens in de 10 jaar, naar gemiddeld eens in de 3 jaar. Door eveneens doorgaande rivierbodemerossie en het effect daarvan op de afvoerverdeling kan dit zelfs gemiddeld eens per 2 jaar worden.

Door klimaatverandering zal ook de kans op – en de duur van – perioden waarbij de chloridenorm in West-Nederland wordt overschreden toenemen. Bij Krimpen aan de IJssel wordt de kritieke grens van 200 mg/l nu gemiddeld eens per 10 jaar overschreden, in klimaatscenario W_{Hdry} neemt dit in 2050 toe tot gemiddeld eens in de 2 à 3 jaar. De verandering in rivierbodempligging heeft een zeer klein positief effect op de externe verzilting, doordat er bij afvoeren kleiner dan 3.000 m³/s te Lobith relatief meer Rijnwater naar het westen stroomt.

Door een toegenomen watervraag en lage afvoeren op de Maas kunnen als gevolg van klimaatverandering tekorten ontstaan in de wateraanvoer naar Noord-Brabant. Bodemerosie heeft hier geen invloed op, omdat de zoetwatervoorziening hier alleen afhankelijk is van de aanvoer van water uit het stroomgebied van de Maas en niet van de waterstanden (deze veranderen overigens ook nauwelijks, omdat de Maas – met uitzondering van de Grensmaas en de Getijdenmaas – grotendeels is gestuwd).

Bevaarbaarheid

Methode

Voor de bevaarbaarheid van de rivieren zijn de waterdieptes bij verschillende rivierafvoeren berekend en is gekeken in hoeverre deze voldoen aan vanuit de scheepvaart gewenste waterdieptes.

De gewenste waterdieptes zijn overgenomen uit nationale en internationale vaarwegeisen. Voor de Boven-Rijn, Waal, het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn-Lek betekent dit dat de waterdiepte bij OLA (de Overeengekomen Lage Afvoer, gedefinieerd als de afvoer die gedurende 20 dagen per jaar wordt overschreden) minimaal 2,8 m moet zijn. Voor de IJssel is dit 2,5 m.

Met behulp van QINCoM is vervolgens berekend wat te geringe waterdieptes betekenen voor de vaarkosten.

Huidige situatie

Op dit moment wordt op de Waal op drie locaties (over een totale lengte van ongeveer 1,5 km) niet voldaan aan de minimaal vereiste waterdiepte bij OLA. De belangrijkste ondiepte betreft een alluviale ondiepte die ontstaat door sedimentatie stroomafwaarts van de vaste laag bij Nijmegen. Hier is de waterdiepte gedurende 49 dagen per jaar minder dan 2,8 m (in plaats van de geaccepteerde 20 dagen per jaar). Ook op de Nederrijn en de IJssel wordt op een aantal locaties niet aan de vereiste waterdiepte voldaan.

Het aantal vaarbewegingen op de Waal bedraagt momenteel gemiddeld 113.000 per jaar. Op de IJssel gaat het om 20.000 vaarbewegingen. De vaarkosten op de Waal bedragen gemiddeld 1,3 miljard euro per jaar; op de IJssel is dit 93 miljoen euro.

De Maas is een gestuwde rivier, waardoor er ook bij lage rivierafvoer voldoende waterdiepte is voor de scheepvaart. Een lage rivierafvoer geeft wel beperkingen voor de sluisbediening, doordat er onvoldoende water beschikbaar is om afzonderlijke schepen te schutten en ondertussen de waterstand op peil te houden; dan wordt pas geschut als de sluis vol is.

Nulalternatief IRM

Door rivierbodemerosie op de Boven-Waal neemt het aandeel van de Rijnafvoer dat naar de Waal gaat toe en dat lijkt gunstig voor de waterdieptes en dus voor de bevaarbaarheid van deze riviervak. Maar het grootste knelpunt verschuift van de alluviale ondiepte in de binnenbocht net benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen naar de vaste laag zelf. En of dit dan gunstig of ongunstig uitpakt voor de bevaarbaarheid is afhankelijk van hoe omgegaan wordt met de minimaal benodigde kielspeling: indien bij een vaste laag rekening moet worden gehouden met een grotere kielspeling dan bij alluviale ondieptes (vanwege een grotere kans op schade-varen), dan neemt de *beschikbare* vaardiepte toch iets af.

De verschuiving in de afvoerverdeling leidt tot een sterke afname van de waterdiepte op de IJssel en in stuwpand Driel op de Neder-Rijn². De bevaarbaarheid van deze beide trajecten neemt hierdoor sterk af.

Klimaatverandering alleen (uitgaande van het scenario W_{Hdry}) heeft een zeer groot effect op de bevaarbaarheid van de Rijntakken, want de rivierafvoer is in dit scenario in 2050 vaker en langduriger gering. De gewenste 2,8 m waterdiepte op de Waal bij OLA wordt nu gedurende zo'n 49 dagen per jaar niet gehaald, maar dit zal door de klimaatverandering kunnen toenemen tot 84 dagen per jaar. Ook het aantal locaties waar niet aan deze eis kan worden voldaan neemt fors toe. Op de Boven-Waal wordt nu over zo'n 5% van de totale trajectlengte niet voldaan aan de minimaal vereiste waterdiepte; in klimaatscenario W_{Hdry} neemt dit in 2050 toe tot bijna 50%.

Zoals al vermeld, stroomt er door erosie van het zomerbed bij lage afvoeren meer water naar de Waal. Dit vergroot de bevaarbaarheid op deze tak weer enigszins, want het aantal dagen per jaar dat 2,8 m waterdiepte wordt onderschreden neemt hierdoor in het nulalternatief iets af: van 84 tot 73. Het percentage van de lengte van de Boven-Waal dat niet aan de vereiste waterdiepte voldoet is dan ongeveer 40% (in plaats van de 50% die resulteert bij alleen klimaatverandering).

Door het gecombineerde effect van klimaatverandering en rivierbodemerossie neemt het aantal benodigde vaarbewegingen (om dezelfde hoeveelheid goederen te transporteren met dezelfde vlootsamenstelling) op de Waal toe van 113.000 per jaar naar 130.000 per jaar. Op de IJssel neemt het aantal benodigde vaarbewegingen toe van 20.000 naar 22.000. Daarmee nemen ook de vaarkosten in de toekomst toe: van 1,3 miljard euro naar 1,4 miljard euro op de Waal en van 93 miljoen euro naar 105 miljoen euro op de IJssel (uitgaande van huidig prijspeil). Door sociaal-economische ontwikkelingen zullen de aantallen vaarbewegingen en de vaarkosten naar verwachting nog veel sterker toenemen.

Omdat de Maas een met stuwen gekanaliseerde rivier is, hebben klimaatverandering en rivierbodemerossie niet of nauwelijks effect op de bevaarbaarheid. Wel zal er door klimaatverandering (vaker en langdurigere perioden met lage rivierafvoeren) vaker sprake zijn van beperkingen voor de sluisbediening.

Waterveiligheid

Methode

De resultaten van de hydraulische berekeningen vormen de basis voor de effectbepaling voor waterveiligheid (of: hoogwaterbescherming). Aan de hand van de hydraulische belasting bepaalt het rekenhulpmiddel OKADER voor alle primaire waterkeringen in het rivierengebied in hoeverre deze verhoogd en/of versterkt moeten worden om in het nulalternatief in 2050 aan de wettelijke beschermingsnorm te voldoen, gegeven de klimaatverandering en de in het nulalternatief nog doorgaande rivierbodemerossie. Op grond van de berekende versterkingsopgave levert OKADER een schatting van de kosten van de versterking op basis van gegevens uit KOSWAT.

Huidige situatie

Op dit moment voldoen de meeste waterkeringen in het rivierengebied nog niet aan de wettelijke normen. Dit komt deels door de nieuwe (veelal strengere) normen die sinds 2017 van kracht zijn, maar ook door nieuwe inzichten in de bijdrage van de faalmechanismen *piping* en macro-instabiliteit aan de totale faalkans van de waterkeringen.

² De waterstand in stuwpand Driel wordt bepaald door de waterstand bij de IJsselkop. Omdat deze waterstand omlaag gaat, daalt de waterstand in stuwpand Driel eveneens. En daarmee de waterdiepte.

Nulalternatief IRM

Om in 2050 aan de wettelijke normen te voldoen zijn forse dijkverhogingen en dijkversterkingen nodig. De benodigde dijkverhoging is hoofdzakelijk het gevolg van de strengere normen en in mindere mate het gevolg van klimaatverandering. De gemiddeld noodzakelijke dijkverhogingen per IRM-traject variëren van minder dan 0,1 m op de Sallandse IJssel tot 0,9 m op de Peelhorstmaas. De mate van benodigde dijkversterking (de 'opgave') wordt voornamelijk bepaald door de strengere normen en nieuwe inzichten in de faalmechanismen piping en macro-instabiliteit. De noodzakelijke verbreding van de dijkbasis die nodig is om te voldoen aan de eisen voor macrostabiliteit, varieert van enkele meters op de Maasvallei tot bijna 25 m op de Waal. De benodigde verbreding van de dijkbasis om piping te voorkomen varieert van maximaal een paar meter op de Grensmaas en de Plassenmaas tot meer dan 100 m op de Beneden-Waal.

Veranderingen in rivierbodempligging hebben een klein effect op de hoogteopgave (maximaal 0,1 m lagere dijken zijn mogelijk op het traject van de Waalbochten) en een zeer klein effect op de dijkversterkingsopgave (pipingbermen langs de Bovenrijn en het traject Waalbochten kunnen ten hoogste een paar meter smaller).

De kosten voor benodigde dijkversterking tot het jaar 2050 (contante waarde minus restwaarde) worden geraamd op ongeveer 7,1 miljard euro (5,4 miljard euro voor de Rijntakken inclusief de IJssel-Vechtdelta en 1,7 miljard euro voor de Maas). Wanneer er geen sprake zou zijn van doorgaande rivierbodemerossie zouden de kosten 16,5 miljoen euro hoger uitvallen. Rivierbodemerossie leidt dus tot minder dan 1% lagere kosten voor dijkverzwaring.

Gevoeligheid voor aannames over klimaatverandering en rivierbodempligging

Voor de berekeningen van de effecten van het nulalternatief in 2050 is uitgegaan van het Deltascenario Stoom. Dat is een scenario met relatief snelle klimaatverandering (W_{dry}) en sterke economische groei. In dat scenario zijn de negatieve effecten als gevolg van klimaatverandering voor de zoetwatervoorziening en bevaarbaarheid (veel) groter dan die van doorgaande rivierbodemerossie. Wanneer echter zou worden uitgegaan van het Deltascenario Rust (geringe klimaatverandering volgens klimaatscenario G_L , met een krimpende bevolking en bescheiden economische groei), dan is het vooral de doorgaande bodemerossie die leidt tot grotere problemen. Dit komt doordat de rivierafvoeren in scenario Rust in de zomer gelijk blijven of zelfs iets toenemen, in tegenstelling tot die in scenario Stoom, waarin in de zomer vaker sprake is van lange perioden met lage afvoeren.

De voorziene rivierbodemerossie leidt tot lagere rivierwaterstanden en lagere grondwaterstanden. Dit heeft belangrijke consequenties voor de zoetwatervoorziening, de bevaarbaarheid en de natuurontwikkelingsmogelijkheden. De grootste effecten hangen op de Rijntakken echter niet zozeer samen met de absolute veranderingen in rivierbodempligging, maar met de gevolgen van verschillen in erosiesnelheid tussen de Waal enerzijds en het Pannerdensch Kanaal en de IJssel anderzijds. Wanneer, zoals in deze studie is aangenomen, de rivierbodem op de Waal sneller daalt dan op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel, dan leidt dit tot een verschuiving van de afvoerverdeling, waarbij meer water via de Waal wordt afgevoerd. Dit leidt op de Waal tot een iets grotere waterdiepte, wat gunstig is voor de bevaarbaarheid van die rivier, maar tegelijkertijd wordt de bevaarbaarheid van de IJssel veel slechter en neemt de kans op watertekorten in Oost- en Noord-Nederland toe.

Overige effecten rivierbodemerossie

Bij de effectbepaling van het nulalternatief IRM lag de nadruk op de effecten van de ontwikkelingen voor de natuur, zoetwatervoorziening, bevaarbaarheid en waterveiligheid; ontwikkelingen die de Rijntakken en Maas in hun geheel raken evenals hun hoofdfuncties. Uit enkele aanvullende analyses blijkt dat doorgaande erosie van het zomerbed er tevens toe kan leiden dat lokaal de afdeklaag boven kabels en leidingen onvoldoende wordt. En het aantal locaties waar zich problemen met de stabiliteit van oevers, kribben en/of kunstwerken zouden kunnen voordoen, kan beperkt toenemen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	15
1.1	Aanleiding	15
1.2	Effectbepaling	15
1.3	Doel	15
1.4	Afbakening	16
1.4.1	Inhoudelijk	16
1.4.2	Ruimtelijk	16
1.5	Leeswijzer	18
2	Het nulalternatief IRM	19
2.1	Inleiding	19
2.2	Scenario's voor klimaatverandering en rivierbodemerrosie	19
2.3	Vaststaand beleid en geplande inrichtingsmaatregelen	24
3	Methode op hoofdlijnen	25
3.1	Inleiding	25
3.2	Gebruikte modellen en instrumenten	26
3.3	Basis RivierBodemLigging (BRL)	28
4	Hydraulica	29
4.1	Inleiding	29
4.2	Methode	29
4.3	Resultaten	30
4.3.1	Maas	30
4.3.2	Rijntakken	32
4.3.2.1	Afvoerverdeling	32
4.3.2.2	Waterstanden	35
4.4	Conclusies	37
5	Natuur	38
5.1	Inleiding	38
5.2	Methode	39
5.3	Resultaten	42
5.3.1	Overstromingsduur	42
5.3.2	Grondwaterstandsveranderingen	48
5.3.3	Veranderingen in potentiële ecotoopverdeling op basis van overstromingsduur	52
5.3.4	Veranderingen in potentiële ecotoopverdeling op basis van grondwaterstanden	56
5.3.5	Vergelijking met de PAGW	61

5.3.6	Dynamiek, connectiviteit en (interne) habitatdiversiteit	64
5.3.7	Waterkwaliteit	65
5.3.8	Aanvullende bevindingen BRL	66
5.4	Conclusies	69
6	Effectbepaling zoetwaterbeschikbaarheid	71
6.1	Inleiding	71
6.2	Methode	72
6.3	Resultaten	74
6.3.1	Noord-Nederland	74
6.3.2	West-Nederland	77
6.3.3	Watertekorten en effect op gewasopbrengst en landbouwschade	82
6.3.4	Aanvullende bevindingen BRL	85
6.4	Conclusies	86
7	Effectbepaling bevaarbaarheid	87
7.1	Inleiding	87
7.2	Methode	87
7.2.1	Toestand van het watersysteem	88
7.2.2	Impact van laagwater op de scheepvaart	88
7.3	Resultaten	89
7.3.1	Toestand watersysteem	89
7.3.1.1	Waterdiepte bij 1.020 m ³ /s (de huidige OLA)	89
7.3.1.2	Beschikbaarheid van de gewenste waterdiepte	91
7.3.1.3	Bereikbaarheid van havens, kades en sluizen	93
7.3.2	Impact scheepvaart	94
7.3.2.1	Afname in vrachtpotentieel	94
7.3.2.2	Scheepvaartintensiteit op de vaarweg	96
7.3.2.3	Toename vaarkosten	98
7.3.3	Nautische veiligheid	100
7.3.4	Constructieve stabiliteit	101
7.3.5	Aanvullende bevindingen BRL	101
7.4	Conclusies	104
8	Effectbepaling waterveiligheid	105
8.1	Inleiding	105
8.2	Methode	105
8.3	Resultaten	107
8.3.1	Waterstanden en afvoerverdeling	107
8.3.1.1	Maas	107
8.3.1.2	Rijntakken	108
8.3.2	Versterkingsopgave	110
8.3.2.1	Hoogteopgave	110
8.3.2.2	Macrostabieliteits- en Pipingopgave	114
8.3.3	Kosten dijkversterking	116
8.3.4	Effect klimaatverandering en verandering in rivierbodempligging	120
8.3.5	Aanvullende bevindingen BRL	122

8.4	Conclusies	124
9	Discussie	125
9.1	Gevoeligheidsanalyse rond klimaatscenario's	125
9.1.1	Inleiding	125
9.1.2	Rivierafvoer, afvoerverdeling en waterstanden	126
9.1.3	Natuur	128
9.1.4	Zoetwaterbeschikbaarheid	130
9.1.5	Bevaarbaarheid	131
9.1.6	Waterveiligheid	132
9.2	Gevoeligheidsanalyse rond rivierbodempligging	133
9.3	Overige effecten van een verandering in rivierbodempligging	134
10	Conclusies	137
11	Referenties	142
A	Bijlage wijziging effectenmethodiek	146
B	Bijlage (rivierverruimende) maatregelen die deel uitmaken van het nulalternatief IRM147	
C	Bijlage hydraulica	148
C.1	Uitgangspunten modellering	148
C.1.1	Software	148
C.1.2	Baseline	148
C.1.2.1.	Maas	148
C.1.2.2.	Rijntakken	149
C.1.3	Aanpassing bodemhoogte	151
C.1.4	Randvoorwaarden	157
C.1.4.1.	Afvoerverdeling Rijntakken	158
C.1.5	Afregelen regelwerken	158
C.1.6	Stuwsturing	159
C.1.7	Modeluitvoer	161
C.2	Vergelijking resultaten met eerdere studies	161
C.2.1	Afvoerverdeling Rijntakken	161
C.2.2	Waterstanden Rijntakken	164
C.3	Gevoeligheid afvoer Betuwepand	165
C.4	Vergelijking situatie IRM met huidige situatie	166
C.4.1	Maas	166
C.4.2	Rijntakken	169
C.5	Model post-processing	171
C.5.1	Afvoerverdeling (t.b.v. waterdistributiemodellering)	171
C.5.2	Distributiekrommes (t.b.v. natuurmodellering)	172
C.6	Aanvullende figuren	177
C.6.1	Afvoerverdeling	177
C.6.2	Heatmaps distributiekrommes	179
C.6.2.1.	Maas	180
C.6.2.2.	Rijntakken	182

D	Bijlage natuur	184
D.1	Overstromingsduur	184
D.2	Potentiële ecotoopverdeling op basis van overstromingsduur	192
D.3	Korte beschouwing rekenregels ecotopen op basis van overstromingsduren versus grondwaterstanden	201
E	Bijlage bevaarbaarheid	204
E.1	Methode	204
E.2	Overzicht nationale en internationale vaarwegeisen	209
E.3	Toestand watersysteem	210
E.3.1	Waterdiepte langs de verschillende riviertakken bij verschillende afvoeren	210
E.3.2	Beschikbaarheid van gewenste waterdiepte	212
E.3.3	Afvoer-Waterdiepte relaties voor QINCoM	216
E.4	Resultaten scheepvaart	218
E.5	Vergelijking KBN	223
F	Bijlage waterveiligheid – vergelijking eerdere berekeningen	224

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Ons rivierengebied is economisch, ecologisch en recreatief belangrijk en beeldbepalend voor Nederland. Diverse ontwikkelingen zetten het riviersysteem echter onder druk. Het klimaat verandert: de zeespiegel stijgt, er is sprake van extremere regenval en we hebben te maken met langere perioden van droogte. Het riviersysteem zelf is door menselijke ingrepen uit evenwicht geraakt, waardoor de rivierbodem op een aantal locaties steeds lager komt te liggen. Vanaf de zomer van 2019 bouwen het Rijk, provincies, waterschappen en gemeenten samen aan het programma Integraal Riviermanagement. Doel van dit programma is om te komen tot een vitaal, bevaarbaar, veilig en aantrekkelijk rivierengebied; duurzaam te beheren en voorbereid op de toekomst. De resultaten van deze samenwerking worden uiteindelijk vastgelegd in een Programma onder de Omgevingswet (PoW) 'Integraal Riviermanagement'.

In het PoW komt een visie op hoe het toekomstbestendig rivierengebied eruitziet in 2050. Er worden beleidskeuzes vastgelegd voor de rivierbodemplugging & sedimenthuishouding en de afvoercapaciteit van het riviersysteem.

Een belangrijk onderdeel bij de totstandkoming van de POW vormt de planMER met daarin een beschrijving van te verwachten kosten en baten. Verschillende alternatieven die door IRM worden onderzocht, worden vergeleken met het nulalternatief. Het nulalternatief is de referentiesituatie, oftewel de situatie die in de toekomst ontstaat als er géén Integraal Riviermanagement plaatsvindt. Het nulalternatief wordt bepaald door continueren van het huidige (ongewijzigde) beleid en zogenaamde autonome ontwikkelingen.

1.2 Effectbepaling

Dit rapport gaat over de effectbepaling van het nulalternatief. Een eerste voorstel voor de methode van effectbepaling is opgesteld door Asselman in 2020 (vastgestelde versie zie Asselman, 2021). Omdat na dit voorstel nieuwe instrumenten en modellen beschikbaar zijn gekomen, is deze methode op een aantal punten aangepast. De gehanteerde methode en uitgangspunten staan in detail beschreven in Asselman et al. (2022).

In dit rapport gaan we vooral in op de bevindingen na toepassing van deze methode op het nulalternatief IRM. De bevindingen hebben betrekking op de berekende effecten op het riviersysteem en vier belangrijke functies die dit systeem vervult: zoetwaterbeschikbaarheid, natuur, waterveiligheid en scheepvaart. Het vormt daarmee een eerste kwantitatieve probleemanalyse voor IRM. De inzichten uit deze analyse worden meegenomen in de verdere uitwerking en vergelijking van de alternatieven in de PlanMER en MKBA. Daarmee is dit rapport slecht één van de bouwstenen van IRM om te komen tot beslisinformatie voor de beleidskeuzes voor de rivierbodemplugging & sedimenthuishouding en de afvoercapaciteit van het riviersysteem.

1.3 Doel

Het doel van de werkzaamheden is tweeledig:

- 1 Het toepassen (en daarmee 'testen') van de voorgestelde methode voor effectenbepaling met bijbehorende modellen, instrumenten en uitgangspunten.

- 2 Het kwantificeren van de effecten van het nulalternatief op het riviersysteem (hydrologie, hydraulica) en de functies waterveiligheid, zoetwaterbeschikbaarheid en bevaarbaarheid.

1.4 Afbakening

1.4.1 Inhoudelijk

Dit rapport richt zich op de toepassing van de effectbepalingsmethodiek op het nulalternatief. Het oefenen, leren en evalueren van de methodiek vormt een belangrijk onderdeel van deze studie. Daarnaast beschrijft dit rapport de resultaten van de toepassing van de effectbepalingsmethode: van hydraulische analyses, naar de afzonderlijke effectbepalingen voor de 4 hoofdfuncties. Effecten op overige (gebruikers-)functies zijn niet beschouwd.

Dit rapport geeft geen uitgebreide beschrijving of onderbouwing van het nulalternatief. Dit is te vinden in Asselman en Snoek (2021). De gebruikte methodes en uitgangspunten worden in dit rapport kort samengevat. Voor een uitgebreidere beschrijving wordt verwezen naar Asselman et al. (2022).

Kern van het nulalternatief is dat het laat zien hoe het rivierengebied er bij ligt bij ongewijzigd beleid in 2050, om daar dan de alternatieven die in IRM worden ontwikkeld tegen te kunnen afzetten, en zo de motivering op te leveren voor die alternatieven, via PlanMER en MKBA. Om de effecten die worden berekend voor het nulalternatief beter te kunnen duiden, is er voor gekozen om ook de effecten in de huidige situatie in beeld te brengen. Met andere woorden: alle effectberekeningen zijn uitgevoerd voor zowel de huidige situatie (huidig klimaat en huidige rivierbodempligging) als bij het nulalternatief IRM (situatie 2050 met veranderend klimaat en doorgaande erosie van het zomerbed van de rivier). Om inzicht te krijgen in de mate waarin verschillen tussen de huidige situatie en de situatie in 2050 veroorzaakt worden door rivierbodemerossie danwel door klimaatverandering, zijn twee extra berekeningen uitgevoerd, waarbij alleen de rivierbodempligging of alleen het klimaat is aangepast³. We hebben er voor gekozen om de situatie voor het jaar 2050 door te rekenen

Met deze opzet kunnen we inzicht geven in wat bepalend is voor de veranderingen die we verwachten gaand van nu naar 2050. We kunnen geen inzicht geven in de oorzaken van wat we voor de huidige situatie aan effecten zien. Voor oorzaken achter de huidige problematiek wordt verwezen naar de Systeembeschouwing IRM (Klijn et al., 2022).

1.4.2 Ruimtelijk

Het plangebied van IRM omvat de Rijntakken, de Maas en de IJssel-Vechtdelta. De Rijn-Maasmondig is geen onderdeel van het plangebied. Onderstaande figuur toont dit plangebied. Het plangebied is opgedeeld in deelgebieden en trajecten.

³ Bij het opstellen van het nulalternatief en het voorstel voor de effectbepaling is er voor gekozen om de situatie voor het jaar 2050 door te rekenen met het Deltascenario stoom. Dit scenario combineert snelle klimaatverandering met sterke economische groei. Het effect van een minder extreem scenario is bepaald op basis van expert kennis.

1.5 Leeswijzer

Na deze inleiding volgt in hoofdstuk 2 een korte beschrijving van het nulalternatief IRM. Enige informatie over de gebruikte methode is te vinden in hoofdstuk 3. De effecten van het nulalternatief op de afvoerverdeling bij hoog- en laagwater en op de waterstanden zijn beschreven in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 geeft een overzicht van de effecten van de waterstandsveranderingen op de natuur. De effecten op de zoetwaterbeschikbaarheid zijn te vinden in hoofdstuk 6. Hoofdstuk 7 en hoofdstuk 8 geven een overzicht van de effecten voor de bevaarbaarheid en hoogwaterveiligheid. Een discussie waarbij wordt onder meer wordt ingegaan op de gevoeligheid voor het gekozen klimaatscenario, is te vinden in hoofdstuk 9. De belangrijkste conclusies staan samengevat in hoofdstuk 10.

2 Het nulalternatief IRM

2.1 Inleiding

Het nulalternatief is de referentiesituatie, oftewel de situatie die in de toekomst ontstaat als er géén Integraal Riviermanagement plaatsvindt. Het nulalternatief wordt bepaald door continueren van bestaand en vastgesteld beleid en zogenaamde autonome ontwikkelingen vanuit de bestaande situatie (2020). Ongewijzigd beleid betekent doorgaan met het bestaande beheer en onderhoud, en uitvoeren van maatregelen die tot het bestaand beleid worden gerekend. Autonome ontwikkelingen zijn exogene of endogene ontwikkelingen, die gevolgen hebben voor het rivierensysteem. Bij de exogene ontwikkelingen wordt gekeken naar de verwachte klimaatverandering en socio-economische ontwikkelingen (met gevolgen voor rivierafvoer, stormopzet, watervraag en zoutindringing als gevolg van zeespiegelstijging) en endogeen zijn doorgaande ontwikkelingen in het riviersysteem zoals bodemerosie en sedimentatie.

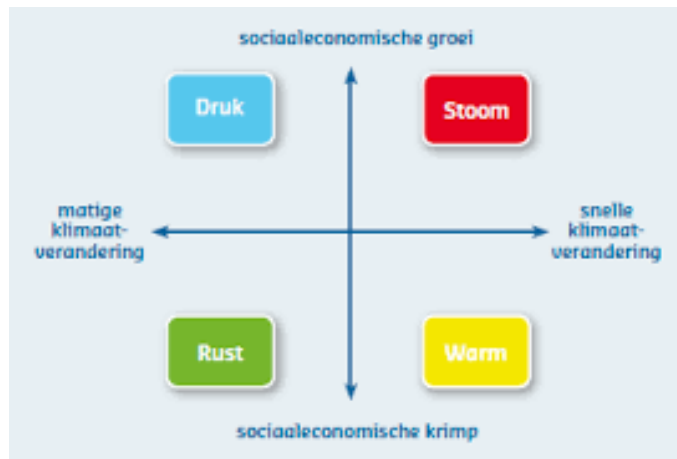
Het nulalternatief IRM beschrijft:

- van welke scenario's wordt uitgegaan voor:
 - klimaatverandering in combinatie met socio-economische ontwikkelingen;
 - veranderingen in rivierbodempligging (erosie en sedimentatie);
- welk bestaand landelijk en regionaal beleid van toepassing is;
- welke inrichtingsmaatregelen de komende decennia vrijwel zeker zullen worden uitgevoerd.

Asselman en Snoek (2021) geven een uitgebreide beschrijving van het nulalternatief. Voor een goed begrip van dit rapport volgt hier een beknopte samenvatting.

2.2 Scenario's voor klimaatverandering en rivierbodemerosie

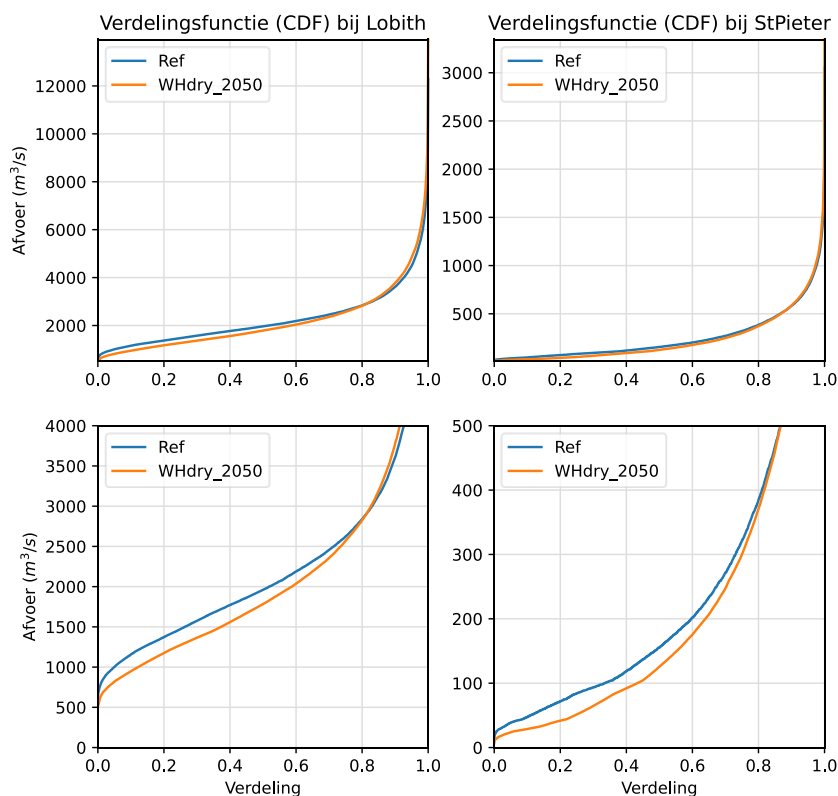
Voor de exogene ontwikkelingen wordt in het nulalternatief IRM gewerkt met scenario's. De scenario's moeten plausibel zijn en bij voorkeur aansluiten bij de scenario's die gebruikt worden in vergelijkbare studies en projecten, zoals Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) en Klimbaatbestendige Netwerken (KBN). Besloten is daarom om gebruik te maken van de Deltascenario's (Wolters et al, 2018). Om het aantal berekeningen te beperken is er voor gekozen om bij de effectbepaling voor IRM gebruik te maken van het Deltascenario Stoom (Figuur 2.1). Het Deltascenario Stoom gaat uit van het snelle klimaatverandering in combinatie met sterke economische groei. In de discussie zal ook een kwalitatieve inschatting worden gemaakt van de effecten bij het meest gematigde scenario (Rust).



Figuur 2.1 Assenkruis; schematische weergave van de Deltascenario's

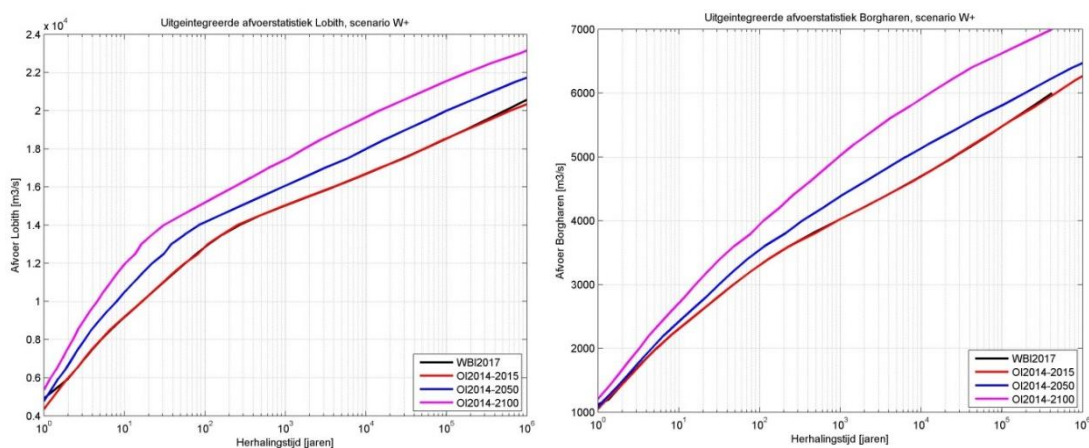
Meer specifiek gaat het om de volgende verwachtingen (Asselman, 2021):

Voor klimaatverandering wordt gebruik gemaakt van de klimaatscenario's zoals bepaald door het KNMI. Voor de verandering in lage en gemiddelde afvoeren wordt gekeken naar het KNMI'14 scenario W_{Hdry} , dat ook voor het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) wordt gebruikt. Figuur 2.2 laat zien hoe vaak een bepaalde afvoer bij Lobith en St. Pieter wordt overschreden. Uit de figuur blijkt dat laagwaters lager kunnen worden en vaker voor zullen komen. Zo wordt een afvoer van $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith nu ongeveer 90 dagen per jaar (25% van de tijd) overschreden. In 2050 neemt dit volgens het scenario W_{Hdry} toe tot bijna 150 dagen per jaar (40% van de tijd). Voor de lage afvoeren op de Maas vormt het Maasafvoeroverdrag een belangrijk uitgangspunt. Hierin is afgesproken dat er zo lang mogelijk ten minste $10 \text{ m}^3/\text{s}$ door de Grensmaas stroomt. In het nulalternatief IRM wordt aangenomen dat alle partijen zich hier aan houden.



Figuur 2.2 Distributiekromme bij Lobith en St. Pieter. De onderste figuren zijn een detailuitsnede van de bovenste figuren voor de lage afvoeren.

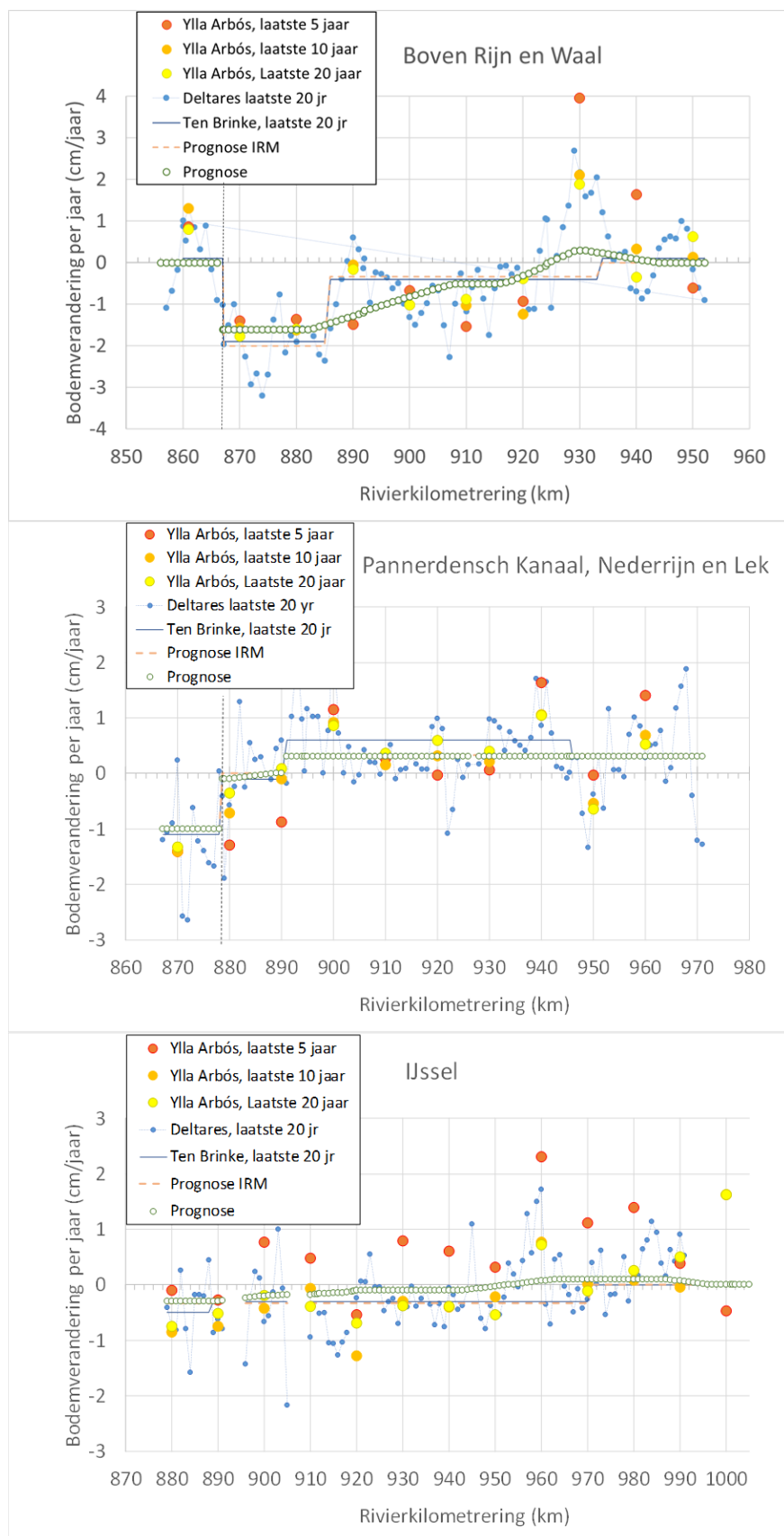
Voor hoogwaters wordt het KNMI'06 scenario W+ gebruikt, omdat de KNMI'06 scenario's plausibeler worden geacht voor hoogwatersituaties en omdat dit scenario ook in WBI2017 (Ontwerpinstrumentarium V4) en eerdere analyses voor het Deltaprogramma Rivieren (DPR) is gebruikt. De verwachte veranderingen in overschrijdingskansen van hoge afvoeren zijn te zien in Figuur 2.3.



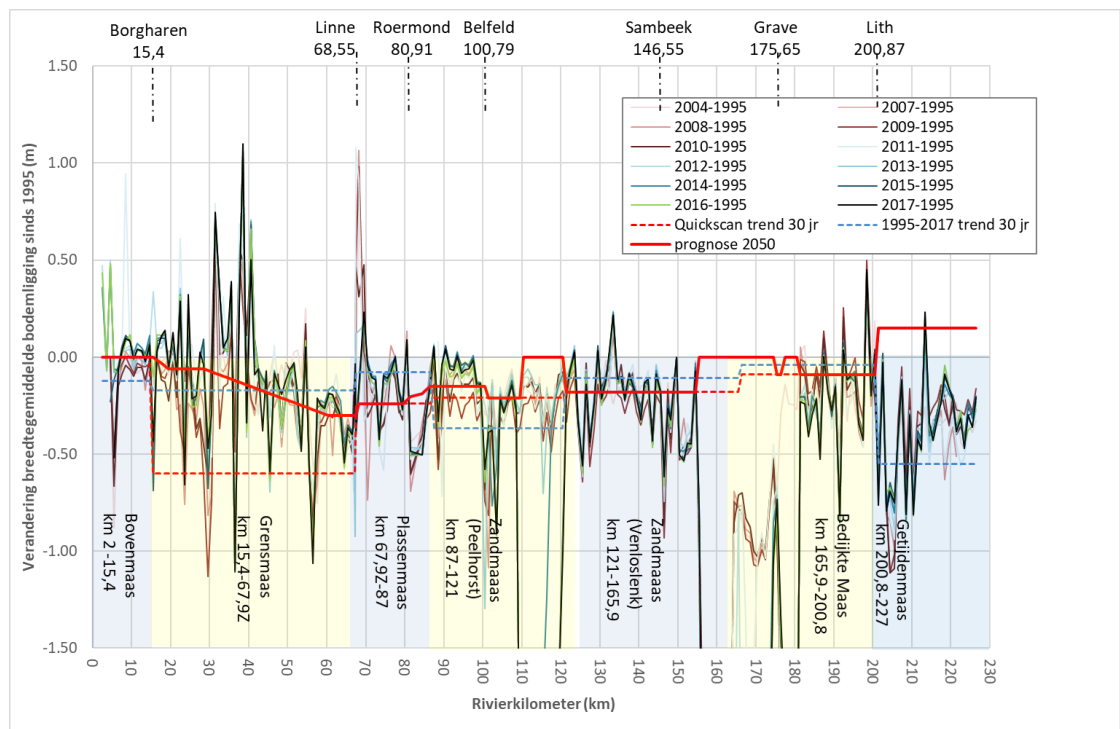
Figuur 2.3 Overschrijdingskans van hoogwaterafvoer in 2015, 2050 en 2100 bij klimaatscenario (KNMI'06) W+ voor de Rijn bij Lobith (links) en de Maas bij Borgharen (rechts) uit GRADE (bron: Smale, 2018).

Het sociaal-economische scenario sluit aan bij de scenario's zoals afgeleid door PBL en CPB in de studie 'Nederland in 2030-2050: twee referentiescenario's – Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving', kortweg WLO (Manders en Kool, 2015). Deze worden ook bij het Deltaprogramma gebruikt. Daarbij wordt vooral gekeken naar de scenario's rust en stoom (voor een beschrijving zie Wolters et al., 2018). Bij het scenario stoom wordt het scenario met snelle klimaatverandering (W_{Hdry}) gecombineerd met het WLO-scenario dat een relatief hoge bevolkingsgroei combineert met een hoge economische groei van ongeveer 2% per jaar (WLO Hoog). Het scenario rust gaat uit van minder snelle klimaatverandering in combinatie met beperkte demografische ontwikkelingen en een gematigde economische groei van ongeveer 1% per jaar. In de effectbepaling voor het nulalternatief IRM maken we gebruik van het Deltascenario Stoom. We maken daarom gebruik van het sociaal-economische scenario WLO-hoog.

Voor veranderingen in rivierbodempligging wordt gebruik gemaakt van de door Sloff (2019; 2021) voor alle riviertrajecten van Rijn en Maas gemaakte inschatting van de verwachte verandering in bodempligging van het zomerbed tot het jaar 2050 (zie Figuur 2.4 voor de Rijntakken en Figuur 2.5 voor de Maas). Deze schatting is gebaseerd op de waargenomen trend in het verleden, recente veranderingen in die trend en een grove correctie voor onder andere uitgevoerde zomerbedverdiepingen. Voor de Rijntakken wordt de sterkste erosie verwacht in het splitsingspuntengebied, met name op de Boven-Waal (maximaal 0,5 m tot 2050). Op de Maas worden de grootste veranderingen in bodempligging verwacht op de Grensmaas (maximaal 0,3 m erosie). Sedimentatie op en delfstofwinning uit uiterwaarden wordt buiten beschouwing gelaten.



Figuur 2.4 Toegepaste trend in bodemontwikkeling op de Rijn ("Prognose", cirkeltjes) in cm per jaar, in relatie tot de metingen. Om tot het scenario van 2050 te komen wordt dit vermenigvuldigd met 31 jaar (bron: Sloff, 2019).



Figuur 2.5 Aangenomen bodemontwikkeling op de Maas tot 2050 (doorgetrokken rode lijn) in relatie tot de metingen (Sloff, 2021). Van de Bergsche Maas zijn geen gegevens aanwezig. In het model is de bodemtrend van de Getijdenmaas ook toegepast op de Bergsche Maas.

2.3 Vaststaand beleid en geplande inrichtingsmaatregelen

Voor de inrichtingsmaatregelen die worden meegenomen in het nulalternatief van IRM geldt dat ze voortvloeien uit bestaand (en verankerd) beleid en beheer óf van voorgenomen beleid, waarbij besluitvorming al zodanig vergeschied is dat het meenemen ervan het meest realistische beeld genereert voor het zichtjaar 2050. Met betrekking tot zoetwaterbeschikbaarheid is aangenomen dat het Deltaplan Zoetwater (fase 1 en 2) wordt gerealiseerd (Rijksoverheid, 2021). Voor waterveiligheid en natuurontwikkeling is aangenomen dat onder meer Rivierklimaatpark IJsselpoort, Stadsblokken Meinerswijk en Meanderende Maas worden gerealiseerd. Een uitgebreid overzicht van de geselecteerde maatregelen is te vinden in Asselman en Snoek (2021). Een beknopter overzicht is te zien in Bijlage B.

3 Methode op hoofdlijnen

3.1 Inleiding

Om de effecten van veranderingen in het riviersysteem op de hydraulica en vier belangrijke rivierfuncties te kwantificeren is gebruik gemaakt van twee methoden:

1. De methode zoals voorgesteld door Asselman (2021);
2. Aanpak van de BasisRivierbodempligging (BRL).

De nadruk bij de effectbepaling ligt op de effecten die zijn berekend met de modellen en instrumenten zoals voorgesteld door Asselman (2021). De BRL is gebruikt om, waar mogelijk, aanvullende effecten in beeld te brengen.

Voorjaar 2020 is gestart met het voorstel voor de methode waarmee de effecten van de IRM-alternatieven op het functioneren van de rivier en de impact op een aantal rivierfuncties kunnen worden gekwantificeerd. Dit is gebeurd aan de hand van gesprekken met diverse deskundigen die betrokken zijn bij (beleids-)studies op het gebied van natuur, zoetwaterverdeling en -beschikbaarheid, bevaarbaarheid en waterveiligheid. Belangrijk uitgangspunt bij het bepalen van de methode is dat deze zoveel mogelijk aansluit op en gebruik maakt van modellen en instrumenten die ook bij andere beleidsstudies worden gebruikt. Denk daarbij onder andere aan het Beoordelings- en OntwerpInstrumentarium (BOI), KlimaatBestendige Netwerken (KBN), en de Deltaprogramma's Rivieren (DPR) en Zoetwaterbeschikbaarheid (DPZW). Begin 2021 is dit voorstel (Asselman, 2021) formeel vastgesteld. Na afronding van de gesprekken in het voorjaar van 2020 is een aantal nieuwe hulpmiddelen beschikbaar gekomen om effecten op het functioneren van het riviersysteem en de impact op functies te kwantificeren. Dit heeft geleid tot een aantal wijzigingen. In dit hoofdstuk staat een beschrijving op hoofdlijnen⁴.

De afgelopen jaren heeft Deltares in opdracht van RWS-WVL en DGWB gewerkt aan de Basis RivierBodemLigging (BRL). In het kader van dit project is voor een aantal rivierfuncties in beeld gebracht welke eisen deze aan de rivierbodempligging stellen. Zo mag er vanuit de scheepvaartfunctie niet te veel lokale aanzanding plaatsvinden, omdat anders de vaardiepte te gering wordt. Vanuit veilige hoogwaterafvoer wordt impliciet de eis gesteld dat de rivierbodem niet hoger ligt dan is aangenomen in de modellen om de hydraulische randvoorwaarden mee vast te stellen. Wanneer de bodem hoger ligt, dan zal dat bij een hoogwater resulteren in hogere waterstanden, waardoor de veiligheid in het geding kan komen. Deze eisen vormen de kern van een instrument dat gebruikt wordt om te bepalen of de meest actuele bodempligging voldoet aan de gestelde eisen of dat op een of meer locaties sprake is van een functiespecifieke over- of onderschrijding. Wanneer dat laatste het geval is, dient door experts te worden bepaald of ingrijpen nodig is. De kennis die is opgedaan in het kader van de BRL en het instrument dat voor de BRL is ontwikkeld, is bij de effectbepaling van het nulalternatief IRM gebruikt om, waar mogelijk, aanvullend inzicht te verkrijgen over de impact van veranderingen in het riviersysteem op een of meer rivierfuncties. Ofwel: met het signaleringsinstrument wordt op kaartbeelden en in statistieken weergegeven in hoeverre in de huidige situatie en bij het nulalternatief IRM aan deze eisen kan worden voldaan.

⁴ Een overzicht van de wijzigingen is te vinden in bijlage A. De in deze studie toegepaste methode staat uitgebreid beschreven in Asselman et al. (2022).

3.2 Gebruikte modellen en instrumenten

Een overzicht van de gebruikte modellen en instrumenten is te zien in Figuur 3.1. De effectbepaling start met het in beeld brengen van de effecten van veranderingen in inrichting van de rivier, rivierbodempligging en klimaat. Hiervoor is gebruik gemaakt van 2D hydraulische modellen die momenteel voor BOI worden ontwikkeld in D-HYDRO (Kosters, 2022; Van der Deijl et al., 2022). In de schematisatie van deze modellen is een aantal aanpassingen doorgevoerd. Voor de Rijntakken is de rivierverruimingsmaatregel rivierklimaatpark IJsselpoort toegevoegd. Voor zowel de Rijntakken als de Maas is de rivierbodempligging aangepast op basis van de in Figuur 2.4 en Figuur 2.5 gepresenteerde aanname voor 2050. Met de hydraulische modellen is een reeks aan rivierafvoeren door gerekend. De uitkomsten van de D-HYDRO-modellen (waterstanden en voor de Rijntakken ook de afvoerverdeling) vormen de invoer voor de verschillende effectmodellen.

Waterveiligheid

Voor waterveiligheid zijn zogenaamde Qh-relaties afgeleid uit de resultaten van de D-Hydro-modellen. Deze zijn gecombineerd met informatie over terugkeertijden van verschillende afvoeren te Lobith en Eijsden (zogenaamde QT-relaties). Dit is gedaan voor verschillende zichtjaren (huidig en 2050). Deze informatie wordt gebruikt in OKADER om de dijkversterkingsopgave in de tijd te bepalen en om de dijkversterkingskosten te berekenen. Ook is in D-Hydro gekeken of de 'beleidsmatig vastgestelde' (en daarmee gewenste) afvoerverdeling behorend bij een afvoer van 17.000 m³/s te Lobith, waarbij de Nederrijn-Lek wordt ontzien, gerealiseerd kan worden en of de regelwerken daarbij in de gewenste middenstand komen te staan. In dat geval is namelijk sprake is van regelbereik naar twee kanten.

Bevaarbaarheid

Na een nabewerking in GIS zijn de berekende waterstanden gebruikt om waterdieptes te berekenen. Dit vormde de belangrijkste invoer voor de effectbepaling bevaarbaarheid. Voor alle riviertakken is gekeken waar en hoe vaak niet aan de vereiste waterdiepte kan worden voldaan. Met behulp van QINCoM is gekeken naar het effect op het aantal vaarbewegingen en op de vaarkosten.

Zoetwaterbeschikbaarheid

Voor zoetwaterbeschikbaarheid vormde de berekende afvoerverdeling bij lage afvoeren een belangrijke invoer voor QWAST. Met behulp van QWAST is onder meer gekeken naar de vullingsgraad van het IJsselmeer en de daaruit voortvloeiende watertekorten in Noord-Nederland. QWAST is ook gebruikt om de afvoeren door het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal te bepalen. Dit is belangrijk voor de wateraanvoer naar (en het voorkomen van watertekorten in) West-Nederland. QWAST is ook gebruikt om een beeld te krijgen van veranderingen in gewasopbrengst en landbouwschade. Absolute waterstanden op de IJssel bij Eefde zijn gebruikt om te berekenen hoe vaak en hoe lang er beperkingen zijn in de wateraanvoer naar de Twentekanal. Op basis van eerdere berekeningen die zijn uitgevoerd met het NDB-model (voor het Noordelijk Deltabekken) is afgeleid hoe het nulalternatief IRM van invloed is op de verzilting⁵.

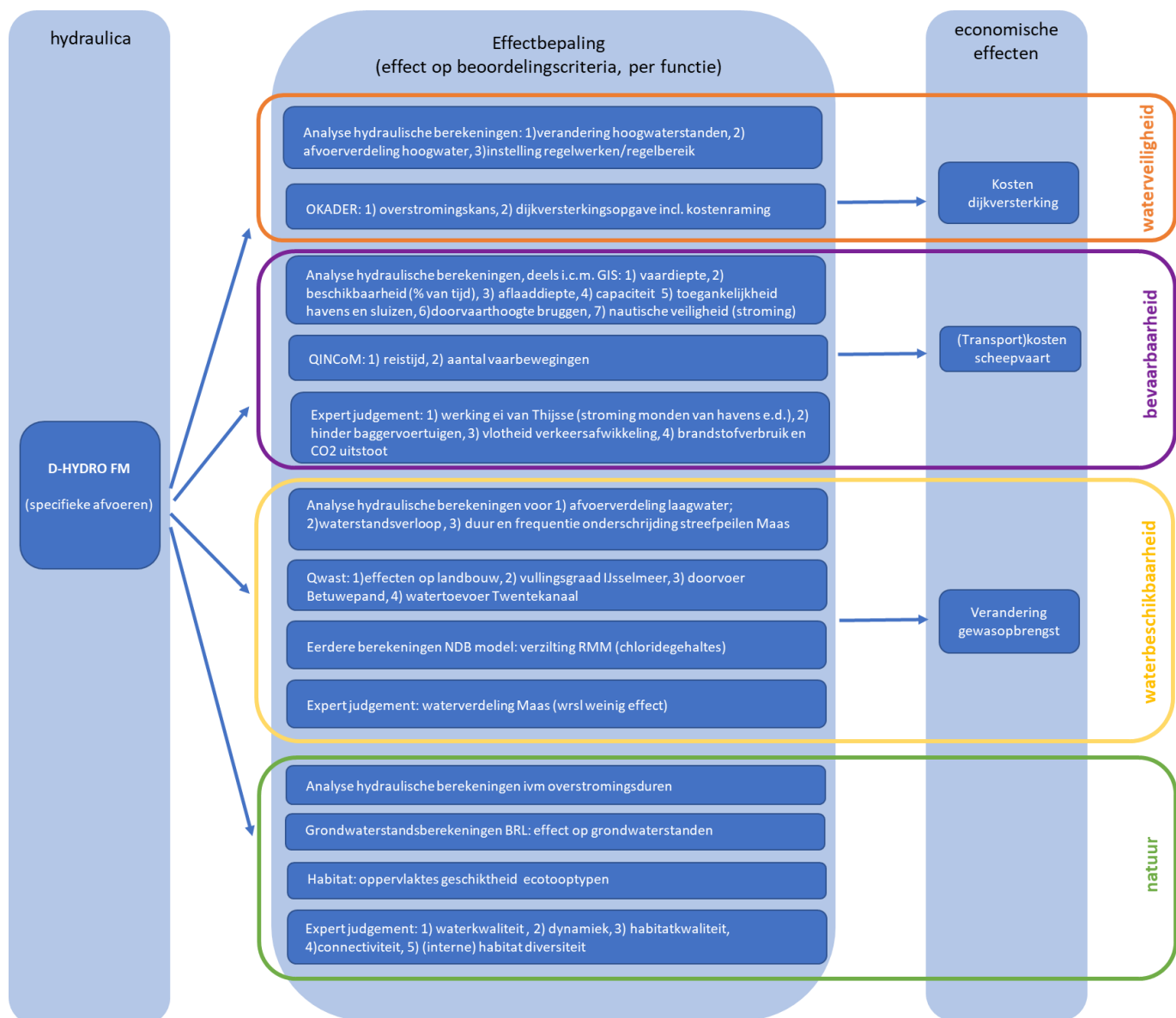
Natuur

Voor natuur vormt informatie over de overstromingsduur en de waterdiepte de belangrijkste invoer. Op basis van deze gegevens is met HABITAT de potentie voor verschillende ecotootypen in beeld gebracht.

⁵ Bij deze berekeningen is nagegaan wat het effect is van een verandering in Waalafvoer op verzilting. De Waalafvoer is direct afhankelijk van de afvoerverdeling bij de Pannerdensch Kop, welke beïnvloed wordt door veranderingen in rivierbodempligging.

Door de uitkomsten hiervan te vergelijken met de doelen van de PAGW wordt een beeld verkregen van de haalbaarheid van deze doelen, in dit geval bij het nulalternatief. In een aparte analyse is gekeken naar mogelijke veranderingen in grondwaterstanden en het effect daarvan op de riviernatuur. De grondwaterstanden zijn berekend in eerdere studies (Deltaprogramma Zoetwater en de BRL) met het Landelijk Hydrologisch Model (LHM). De relaties tussen de hydrologische randvoorwaarden (grondwaterstandskarakteristieken in termen van GHG, GVG en GLG) en de potentie voor verschillende ecotooptypen zijn overgenomen uit Van den Berg (2021).

Alle effectberekeningen zijn uitgevoerd voor zowel de huidige situatie (huidig klimaat en huidige rivierbodempligging) als bij het nulalternatief IRM (situatie 2050 met veranderd klimaat en veranderde ligging van het zomerbed van de rivier). Om de resultaten beter te kunnen duiden zijn twee extra berekeningen uitgevoerd, waarbij hetzij alleen de rivierbodempligging hetzij alleen het klimaat is veranderd.



Figuur 3.1 Overzicht van gebruikte modellen en tools

3.3 Basis RivierBodemLigging (BRL)

In het kader van de BRL is voor een groot aantal rivierfuncties in beeld gebracht welke eisen deze aan de rivierbodempligging stellen. Een overzicht van de eisen is te vinden in Flierman en Van der Sleen (2021). Van der Deijl (2022) geeft een uitgebreide beschrijving van de wijze waarop de BRL is toegepast binnen de effectbepaling IRM. Voor de effectbepaling IRM is voor de volgende functie-eisen gecontroleerd of in 2050 sprake zou kunnen zijn van knelpunten:

- **Waterveiligheid:** voor deze functie is gekeken of de bodempligging lager of hoger is dan de bodempligging die gebruikt is bij het berekenen van de hydraulische belastingen in het kader van BOI2017. Wanneer de bodempligging hoger is, leidt dit tot hogere waterstanden dan die waar de dijken op beoordeeld en ontworpen zijn. Ook is gekeken of veranderingen in rivierbodempligging problemen kunnen geven met de stabiliteit van keringen.
- **Zoetwaterbeschikbaarheid:** voor deze functie is het belangrijk om na te gaan of de afvoerverdeling bij lage rivierafvoeren niet te veel verschuift. Het gaat hierbij vooral om de relatieve veranderingen in de bodempligging op de Waal ten opzichte van veranderingen in bodempligging op het Pannerdensch Kanaal en de IJssel. Wanneer de rivierbodem van de Waal meer uitschuurt dan de bodem van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel, dan kan bij lage afvoeren te veel water naar de Waal stromen. Dit kan gevolgen hebben voor de vullingsgraad van de strategische zoetwaterbuffer het IJsselmeer
- **Natuur:** voor natuur is onder meer gekeken naar het voldoende meestromen van nevengeulen. In het project 'Grip op Nevengeulen' is de norm gesteld dat een nevengeul minimaal 335 dagen per jaar in verbinding moet staan met de rivier. Hiervoor wordt (conservatief) gecontroleerd of de bodem van een nevengeul lager ligt dan de waterstand bij het instroompunt bij de overeengekomen lage afvoer (OLA) die 20 dagen per jaar wordt overschreden. De BRL controleert dus of de geul 345 dagen per jaar meestroomt in plaats van 335 dagen per jaar.
- **Bevaarbaarheid:** om te controleren of de waterdiepte voldoet aan de internationale afspraken voert de BRL een aantal controles uit. Zo wordt gekeken of de waterdiepte bij de overeengekomen lage afvoer (1.020 m³/s te Lobith bij het huidige klimaat) voldoet aan de gestelde eis. Om voldoende waterdiepte boven sluisdrempels en vaste lagen te behouden (aanvullende eis) stelt de BRL dat de bodempligging benedenstrooms van de vaste laag niet lager mag worden dan de ligging in 2012.
- **Overig:** behalve aan bovenstaande functies besteedt de BRL ook aandacht aan de volgende aspecten:
 - **Stabiliteit van oevers, kribben en kunstwerken:** het talud bij een oever of een krib mag niet te steil worden en de erosielimietlijnen mogen niet worden overschreden;
 - **Dekking infrastructuur:** om schade aan kabels, leidingen en tunnels te voorkomen wordt gecontroleerd of de afdeklaag voldoende dik is;
 - **Erosiebestendige lagen:** op een aantal locaties in het rivierengebied is sprake van erosiebestendige lagen die onderliggende fijnere zanden afdekken. Wanneer de erosiebestendige laag wordt doorsneden en de onderliggende fijne zanden vrij komen te liggen is de kans groot dat er erosiekuilen ontstaan. De BRL checkt of de afdekkende laag nog voldoende dik is.

De kennis die is opgedaan in het kader van de BRL is gebruikt om, waar mogelijk, aanvullende informatie te verstrekken over de impact van veranderingen in het riviersysteem op een rivierfunctie.

4 Hydraulica

4.1 Inleiding

De effectbepaling hydraulica is een belangrijke bouwsteen voor de beoordeling van het functioneren van het riviersysteem. Er wordt berekend hoe de afvoerverdeling en de waterstanden worden beïnvloed door de rivierbodemerossie. Het effect van klimaatverandering op de kans van voorkomen van verschillende rivierafvoeren is apart in beeld gebracht.

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van de hydraulische modelberekeningen en geeft een interpretatie van 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. Dit gebeurt pas in de volgende hoofdstukken over natuur, zoetwaterbeschikbaarheid, bevaarbaarheid en waterveiligheid.

4.2 Methode

Voor de hydraulische berekeningen is zoveel mogelijk aangesloten bij de modellen en uitgangspunten van het project BOI2023. Dit betekent dat gebruik is gemaakt van de nieuwe (zesde) generatie modellen in D-HYDRO en van de geometrie van de vergunde situatie. De berekeningen bestrijken het gehele afvoerbereik van zeer laag tot extreem hoge afvoeren. Een uitgebreidere beschrijving van de uitgangspunten en methode is opgenomen in Bijlage C.1. De belangrijkste uitgangspunten zijn:

- Omdat bij aanvang van het project de OI- en HR2023-modellen nog niet beschikbaar waren, is gebruik gemaakt van de (voorlaatste versie van de) beno19-modellen van Rijn en Maas. Deze komen overeen met de modellen die ten grondslag liggen aan WBI2023 (onderdeel van BOI2023). Vergunde gebiedsmaatregelen zijn hierin al opgenomen.
- Enkel in de Rijntakken is een aanpassing aangebracht aan de Baseline-data: de maatregel Klimaatpark IJsselpoort is toegevoegd aan de schematisatie. De overige vergunde maatregelen waren al opgenomen in het basismodel.
- De veronderstelde rivierbodemerossie in het zomerbed tot 2050 berust op prognoses die zijn gebaseerd op metingen en expert judgement (Sloff, 2019; 2021; zie Figuur 2.4 en Figuur 2.5). Voor de modellering in 2D is voor de alluviale bodem naast de vaste lagen de bodemligging aangepast op basis van metingen (zie bijlage C.1.3). De toekomstige bodemligging is aangebracht door aanpassing van de bodemhoogtepunten in het D-HYDRO-model.
- De regelwerken in het Rijntakkenmodel zijn voor 2050 afgeregeld op de beleidsmatig vastgestelde verdeling behorend bij een afvoer van 17.000 m³/s te Lobith, waarbij de Lek wordt ontzien.
- De boven-randvoorwaarden in het Rijntakkenmodel lopen van stationair 600 m³/s tot een afvoergolf van 24.000 m³/s (in totaal 16 simulaties), en in het Maas-model van stationair 50 m³/s tot een afvoergolf van 6.000 m³/s (in totaal 13 simulaties). Aanvullend is een extra semi-stationaire simulatie voor de Rijntakken bij lage afvoeren uitgevoerd, ten behoeve van een nauwkeurigere bepaling van de afvoerverdeling bij lage rivierafvoeren.

De berekeningsresultaten worden beoordeeld op de waterstand op de rivier-as en op de afvoerverdeling over de Rijntakken. Bij deze analyses wordt enkel gekeken naar de veranderingen bij een gegeven afvoer. Het effect van klimaatverandering blijkt dus niet uit deze berekende waterstanden, omdat de kans op de verschillende afvoerniveaus nog niet in de resultaten is verwerkt. De overschrijdingskans van een bepaalde afvoer kan echter wel veranderen ten gevolgen van de klimaatverandering. Deze effecten worden echter pas zichtbaar als de resultaten worden omgewerkt tot zogenaamde 'distributiekrommes' en 'onderschrijdingskrommes'. Met andere woorden: dit hoofdstuk geeft slechts aan hoe de waterstanden bij een gegeven afvoer veranderen als gevolg van veranderingen in rivierbodempligging. Veranderingen in de kans van voorkomen van de verschillende afvoeren en waterstanden (als gevolg van klimaatverandering) worden gebruikt in de effectbeoordelingen op de verschillende functies en zijn opgenomen in Bijlage C.5.

4.3 Resultaten

Simulaties zijn uitgevoerd voor situaties met en zonder bodemverandering (respectievelijk ligging in 2050 en huidige ligging). Ter controle van de plausibiliteit van de modelresultaten wordt in dit hoofdstuk een vergelijking gemaakt met beschikbare gegevens en eerder uitgevoerde modelberekeningen.

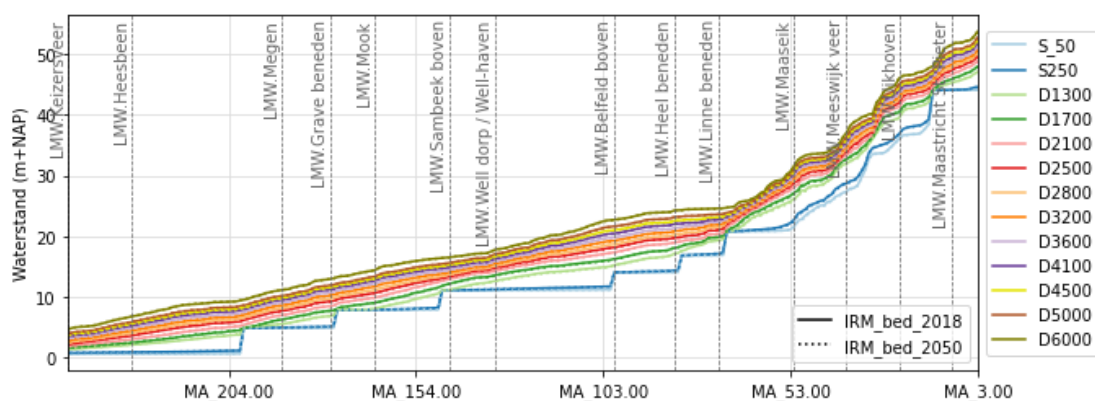
4.3.1 Maas

De resultaten van de simulaties van de Maas zijn weergegeven als absolute waterstanden (Figuur 4.1) en als waterstandsverschillen (Figuur 4.2). In het tweede geval is met een stippellijn ook de veronderstelde verandering in rivierbodempligging weergegeven.

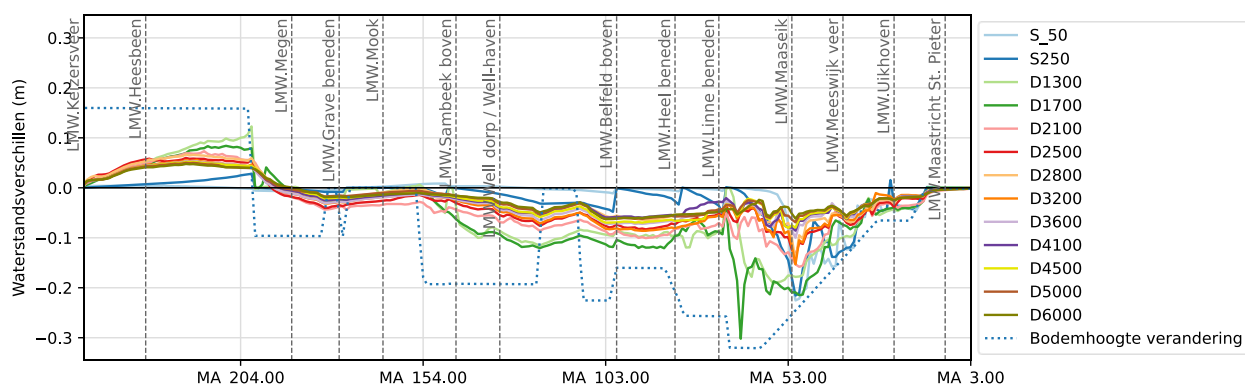
In de figuur met absolute waterstanden (Figuur 4.1) vallen de veranderingen weg tegen de grote verticale schaal. Uit de waterstandsverschillen (Figuur 4.2) blijkt dat de veranderingen beperkt zijn en variëren tussen +0,1 en -0,2 m. De waterstandsdaling is het grootst bij middelhoge afvoeren (1.300 tot 1.700 m³/s). De waterstandsveranderingen zijn kleiner dan de bodemhoogteverandering. Verder kan per deeltraject het volgende worden geconcludeerd:

- Op de Bovenmaas (tot rkm 10) is geen bodemverandering verondersteld en is ook geen verandering in waterstanden berekend.
- Op de Grensmaas (rkm 10 tot 56) is een rivierbodemerrosie opgelegd, oplopend tot 0,3 m (rond rkm 60). De waterstanden worden hierdoor op de hele Grensmaas lager. De grootste waterstandsdaling is er voor de lagere afvoeren (simulaties S50, S250 en D1300) op het benedenstroomse traject en bedraagt 0,2 m. Opvallend is dat bij lage afvoer de waterstanden op dit traject niet evenveel dalen als de rivierbodemerrosie. Dit wordt veroorzaakt door opstuwing vanuit stuwpand Linne en door lokale opstuwing door grinddrempels (bij de analyses is verondersteld dat deze, conform het huidige beleid, op gelijke hoogte worden gehouden).
- Op de Plassenmaas (rkm 56 tot 93) is in de simulatie D1300 een 0,1 m hogere waterstand te zien. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt door verminderde topvervlakking door de verdere insnijding op de Grensmaas. In mindere mate is dit ook nog zichtbaar bij D1700. Bij andere simulaties is de waterstand op de Plassenmaas nauwelijks lager.

- Op de Zandmaas (rkm 93 tot 165) is sprake van rivierbodemerossie tot 0,1 m en zien we ook een lagere waterstand in alle simulaties. Het verschil is het grootst in de simulaties waarin de stuwen net gestreken zijn (D1300, D1700). Bij lagere afvoeren worden de waterstanden vooral bepaald door het stuwpeil, bij hogere afvoeren wordt de bijdrage van de rivierbodemerossie kleiner doordat verhoudingsgewijs meer water door het winterbed gaat.
- Op de Bedijkte Maas (rkm 150 tot 201) zijn trajecten waar de rivierbodemerossie gering is. Er is nog steeds sprake van lagere waterstanden (maximaal -0,1 m bij D1700), maar minder dan op de eerdere trajecten.
- Op de Getijdenmaas (rkm 201 tot 227) veronderstelt de prognose een hogere bodemligging door netto sedimentatie. De waterstanden zijn op dit traject hierdoor ook hoger (maximaal 0,1 m), met wederom het grootste verschil bij D1300.
- Op de Bergsche Maas (vanaf rkm 227) is sedimentatie verwacht (de bodemtrend van de Getijdenmaas is ook hier toegepast). Dit zorgt ook voor hogere waterstanden (maximaal 0,05 m). Nabij de monding wordt de opstuwende werking vanuit zee steeds groter, waardoor het effect van de bodemverandering kleiner wordt.



Figuur 4.1 Waterstand (m+NAP) bij simulaties met bodem 2018 (doorgetrokken lijn) en bodem 2050 (stippellijn). De kleurtjes van de lijnen hebben betrekking op de doorgerekende afvoeren. S duidt op een stationaire simulatie, D op een dynamische berekening.



Figuur 4.2 Waterstandsverschillen door overgang van bodem 2018 naar bodem 2050. De verwachte verandering in bodemligging is aangegeven met een blauwe stippellijn. Negatieve waarden geven aan dat de waterstanden in 2050 lager zijn dan in de huidige situatie.

4.3.2 Rijntakken

Voor de Rijntakken is het belangrijk zowel te kijken naar de waterstanden als de – mogelijk veranderende – afvoeren op de verschillende takken. Tussen beide resultaten zit een verband: een lagere waterstand op de Waal zorgt immers voor een grotere afvoer naar die riviertak. In onderstaande passage wordt eerst over de afvoerverdeling gerapporteerd. Daarna wordt ingegaan op de verandering in waterstanden.

De modelresultaten van D-HYDRO uit deze studie zijn ook vergeleken met eerdere modelresultaten met SOBEK3 uit De Jong (2020). Deze vergelijking is opgenomen in Bijlage C.2.

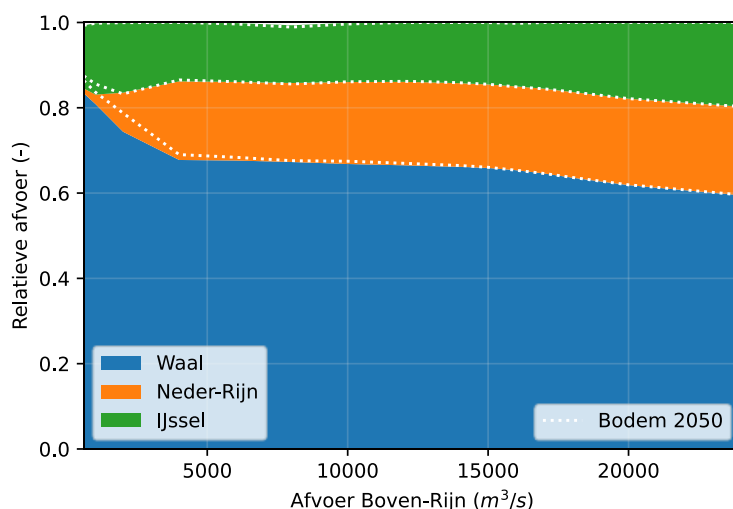
4.3.2.1 Afvoerverdeling

Het effect van de verandering in rivierbodempligging op de afvoerverdeling is in eerste instantie bepaald voor de 16 simulaties met stationaire afvoeren en afvoergolven, en weergegeven als relatieve afvoer in Figuur 4.3. Voor de lage afvoeren bleken de afvoerniveaus te ver uit elkaar te liggen, waardoor besloten is extra simulaties uit te voeren met lage afvoeren (Figuur 4.4). Een alternatieve visualisatie van deze resultaten (als absolute afvoeren) is gegeven in Figuur 4.5. Aanvullende figuren zijn gegeven in Bijlage C.6.1.

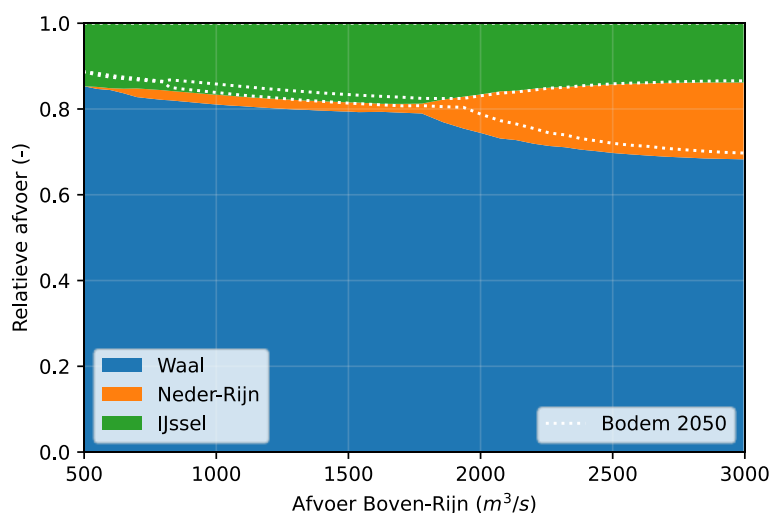
Op basis van deze resultaten wordt het volgende geconcludeerd (van lage afvoer naar hoge afvoer):

- In de huidige situatie wordt berekend dat bij zeer lage Rijnafoeren ($600 \text{ m}^3/\text{s}$) de afvoer over de Nederrijn afneemt naar $0 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit wordt veroorzaakt doordat de stuw bij Driel volledig gestreken is en in de stuwsturing van stuw Amerongen geen functie voor lage afvoeren is ingebouwd in het model (ook niet voor lekverlies en vistrap). Voor dit bereik is geen duidelijk stuwprogramma vastgesteld. Er is een minimaal debiet naar de Nederrijn nodig (van orde $25 \text{ m}^3/\text{s}$) voor doorstroming in verband met waterkwaliteit en omdat langs de Nederrijn onttrekkingen plaatsvinden. Bij de effectbepaling voor zoetwaterbeschikbaarheid wordt de afvoer over de Nederrijn niet lager dan $20 \text{ m}^3/\text{s}$; hiervoor is een correctie uitgevoerd op de D-Hydro berekeningen. De correctie is in de referentieberekening nodig bij Rijnafoeren $< 800 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij bodem2050 vindt de correctie plaats bij Rijnafoeren $< 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Het punt waarop stuw Driel actief wordt verschuift door de rivierbodemerose van $1.800 \text{ m}^3/\text{s}$ naar $1.950 \text{ m}^3/\text{s}$. Ofwel: door de rivierbodemerose zullen de stuwen op de Nederrijn in het huidige stuwprogramma steeds langer gesloten blijven. Dit wordt veroorzaakt door de in de praktijk toegepaste (en zo ook gemodelleerde) stuwsturingsregels op basis van waterstanden. Door de rivierbodemerose gaan de waterstanden bij een gegeven Boven-Rijnafoer omlaag. De waterstand waarbij de stuwen worden gestreken treedt dus op bij steeds hogere Boven-Rijnafoeren. Kijken we naar de afvoer van de IJssel, dan is te zien dat door het volgen van het huidige stuwprogramma de afvoer naar de IJssel zo lang mogelijk vast gehouden wordt op $330 \text{ m}^3/\text{s}$ en dit zelfs iets toeneemt in het bodemerosescenario. Deze afvoer is hoger dan de gewenste afvoer van $285 \text{ m}^3/\text{s}$ die ten grondslag ligt aan het stuwprogramma. Deze afwijking tussen gewenste en gerealiseerde afvoer, wordt ook uit metingen bevestigd (Verbeek, 2022).
- De verandering in afvoerverdeling is het grootst bij lage tot middelhoge afvoeren (tot $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$). De afvoerfractie verandert met meerdere procenten: toename op de Waal en afname op het Pannerdensch Kanaal. De verdeling op de IJsselpop blijft vrijwel gelijk, maar omdat er al minder water naar het Pannerdensch Kanaal stroomt neemt de absolute afvoer op de IJssel en de Nederrijn af. De totale verschuiving bedraagt ongeveer $25 \text{ m}^3/\text{s}$ (meer naar de Waal en minder naar met name de IJssel).

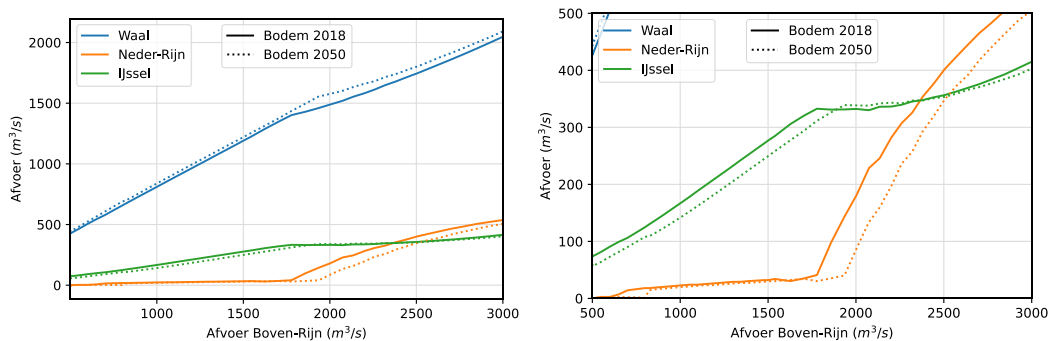
- Bij afvoeren hoger dan 5.000 m³/s verandert de afvoerverdeling (relatief) minder sterk: minder dan 1 procent. De trend blijft een kleine toename naar de Waal en een afname naar de Nederrijn en IJssel.
- Bij 17.000 m³/s is de afvoerverdeling bij zowel bodemligging 2018 als bodemligging 2050 vrijwel identiek, omdat de regelwerken hierop afgeregeld zijn (zie Bijlage C.1.5). Met andere woorden: in 2050 kan worden voldaan aan de Beleidsmatig Vastgestelde Afvoerverdeling (BVA) behorend bij een afvoer van 17.000 m³/s te Lobith, ongeacht of de huidige bodemligging wordt gehandhaafd of dat sprake is van erosie zoals verondersteld in het nulalternatief van IRM. Een kleine afwijking kan ontstaan omdat is afgeregeld op een stationaire som zonder lateralen en in de hier gepresenteerde analyses gekeken wordt naar een dynamische afvoergolf met lateralen. Opgemerkt wordt dat de regelwerken bij zowel bodem 2018 als bodem 2050 in een middenpositie staan na het afregelen op de afvoerverdeling '17.000 m³/s Lek Ontzien' (zie Tabel 4.1). Dit terwijl in de actuele modellen (j19 en beno19) de huidige Beleidsmatig Vastgestelde Afvoerverdeling (BVA) behorend bij een afvoer van 16.000 m³/s te Lobith niet gerealiseerd kan worden doordat regelwerk Hondsbroeksche Pleij al helemaal dicht staat (Kosters, 2022). Ofwel: omdat we in 2050 uitgaan van een andere afvoerverdeling behorend bij een afvoer van 17.000 m³/s te Lobith in plaats van 16.000 m³/s, zullen de regelwerken meer in een middenpositie komen te staan. Dit geldt vooral voor de Hondsbroeksche Pleij. Regelwerk Pannerden komt bij de huidige rivierbodempligging relatief ver dicht te staan. Door de doorgaande rivierbodemerose gaat de Waal echter meer afvoer trekken waardoor dit regelwerk iets minder ver dicht hoeft te worden gezet en dus ook in een middenstand komt te staan.



Figuur 4.3 Relatieve afvoerverdeling op de totale afvoer bij Lobith. De verdeling bij de huidige bodem is weergegeven in gekleurde vlakken. De verschuiving t.g.v. rivierbodemerose tot 2050 is weergegeven met een witte stippellijn.



Figuur 4.4 Relatieve afvoer voor het lage afvoerbereik. De verdeling bij de huidige bodem is weergegeven in gekleurde vlakken. De verschuiving t.g.v. rivierbodemerrosie tot 2050 is weergegeven met een witte stippellijn.



Figuur 4.5 Afvoer per riviertak bij verschillende afvoeren te Lobith. De rechter figuur heeft een aangepaste y-as, waardoor de verschuivingen op de Nederrijn en IJssel beter zichtbaar zijn (en de Waal uit beeld verdwijnt).

Tabel 4.1 Instelling van de regelwerken (hoogte in m+NAP) in verschillende modellen. De modellen j19 en beno19 zijn afgeregeld op de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling (BVA) bij 16.000 m³/s. Het IRM-model is afgeregeld op de BVA bij 17.000 m³/s.

Naam regelwerk	Regelbereik	j19_6-v2a (Kosters, 2022)	beno19_6-v1a (Kosters, 2022)	IRM bodem 2018	IRM bodem 2050
Pannerden	12.00 – 17.00	13.91	14.31	16.71	15.82
Hondsbroeksche Pleij	11.00 – 15.20	15.2 ¹	15.2 ²	13.61	13.70

¹ Dit is de maximale hoogte. Het verschil met de gewenste verdeling is 2 m³/s (te weinig naar Nederrijn, te veel naar IJssel)

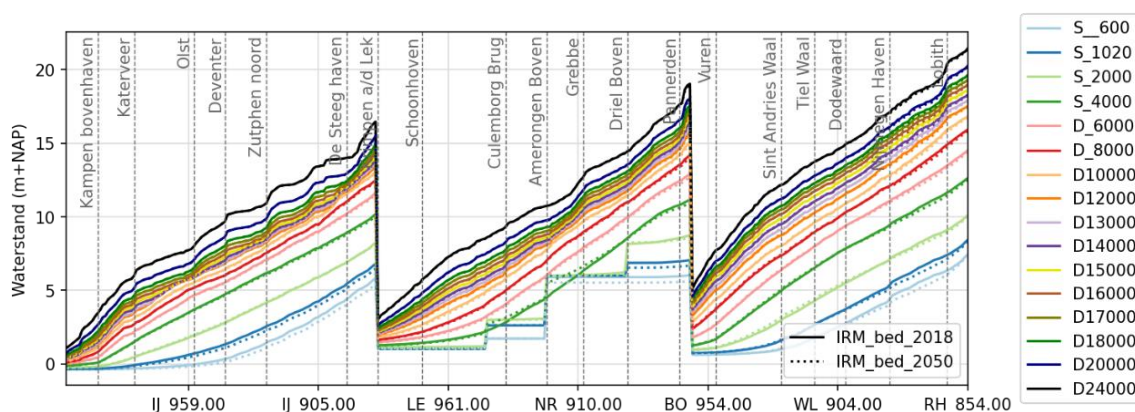
² Dit is de maximale hoogte. Het verschil met de gewenste verdeling is 9 à 10 m³/s (te weinig naar Nederrijn, te veel naar de IJssel)

4.3.2.2 Waterstanden

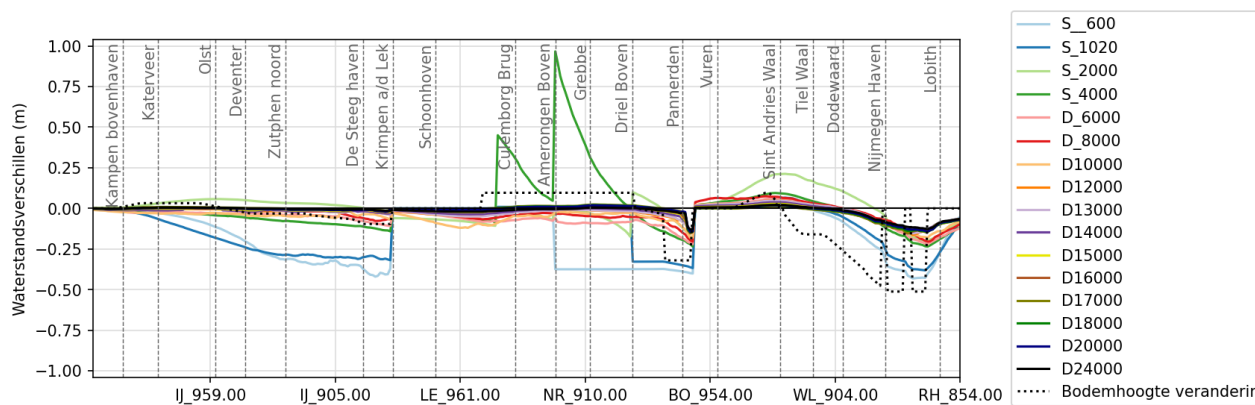
Door de rivierbodemerossie en de hierdoor veranderende bodemhoogte ontstaat een waterstandsverandering op de Rijntakken. De waterstanden en de verandering hierin zijn gegeven in Figuur 4.6 en Figuur 4.7.

De sterkste rivierbodemerossie wordt verwacht op de Boven-Waal (tot -0,5 m). De sterkste aanzanding wordt verwacht op de Nederrijn-Lek (circa 0,1 m). Uit de resultaten blijkt dat de waterstandsverandering doorgaans tussen de -0,4 en +0,2 m zit. Op hoofdlijnen wordt het volgende geconcludeerd:

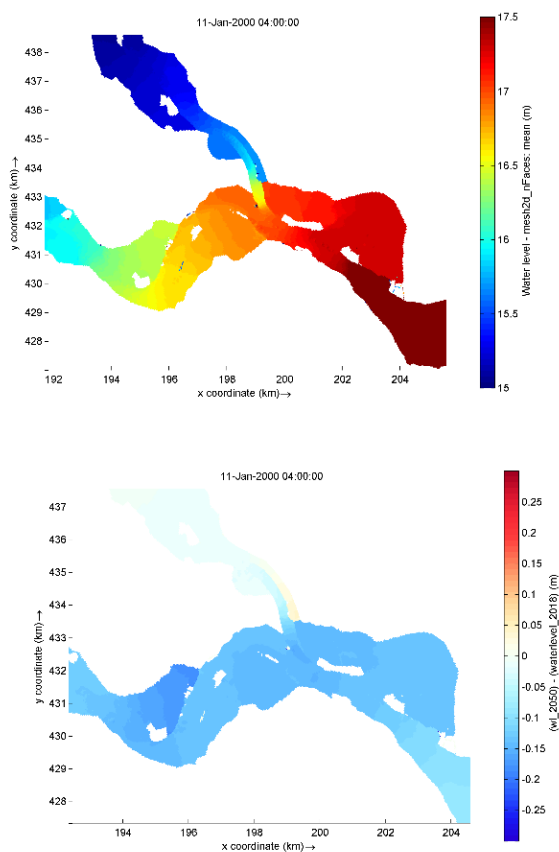
- De berekende waterstandsveranderingen zijn het grootst bij lage afvoer (600 en 1.020 m³/s). Op de bovenloop van alle drie de Rijntakken is dan een waterstandsval van -0,3 tot -0,4 m te verwachten.
- In alle simulaties neemt de afvoer naar de Waal toe. Hierdoor worden de waterstanden op de Beneden-Waal hoger. De hogere waterstanden treden op bij alle afvoeren, maar zijn het grootst bij een afvoer van 2.000 m³/s doordat de afvoerverandering dan het grootst is. Door de sterke rivierbodemerossie op de Boven-Waal is hier – ondanks de grotere afvoer –, bij deze afvoer toch sprake van een lagere waterstand.
- Op de Nederrijn is er een opvallend hogere waterstand bij stuw Hagestein en Amerongen te zien bij een afvoer van 4.000 m³/s. Dit wordt veroorzaakt doordat de stuwen in de simulatie met bodem 2018 wel gestreken zijn, en (net) niet in de simulatie met bodem 2050.
- De waterstandsval op de IJssel is over een lang traject -0,3 m ten gevolge van de geringere afvoer (en in mindere mate de veranderde bodemligging).
- Doordat de Neder-Rijn bovenstrooms van stuw Driel in vrije verbinding staat met de IJssel, daalt hier de waterstand in gelijke mate. Omdat bij zeer lage afvoer (S_600 m³/s) de stuw bij Driel geopend wordt, is deze lagere waterstand bij zeer lage afvoeren merkbaar tot aan stuw Amerongen.
- Net bovenstrooms van Pannerden zijn op het Pannerdensch Kanaal lokaal lagere waterstanden te zien. De waterstanden volgen hier de lagere waterstanden op de Waal. Dit is ook weergegeven in de kaarten in Figuur 4.8.



Figuur 4.6 Waterstand (m+NAP) bij simulaties met bodem 2018 (doorgetrokken lijn) en bodem 2050 (stippellijn). De kleurtjes van de lijnen hebben betrekking op de doorgerekende afvoeren. S duidt op een stationaire simulatie, D op een dynamische berekening. De Rijntakken zijn in deze figuur achter elkaar geplaatst.



Figuur 4.7 Waterstandsverschillen door overgang van bodem 2018 naar bodem 2050. De verandering in bodemligging is aangegeven met een stippellijn. De Rijntakken zijn in deze figuur achter elkaar geplaatst.



Figuur 4.8 Links: waterstanden bij de Pannerdensche Kop (bodem 2050; D17000). Rechts: waterstandsverschillen tussen bodem 2050 en bodem 2018 (D17000).

4.4 Conclusies

Door het uitvoeren van hydraulische berekeningen is verkend wat het effect van de rivierbodemerrosie is op de afvoerdeling (enkel voor de Rijntakken) en de waterstanden op de Rijn en de Maas.

- Op de Maas bedraagt de verwachte rivierbodemerrosie maximaal 0,3 m. Toch is de waterstandsverandering beperkt door stuwen (bij lage afvoer) en de grote bijdrage van stroming door het winterbed (bij hoge afvoer). Op de Grensmaas zijn veranderingen in waterstanden bij lage afvoeren beperkt doordat is aangenomen dat de grinddrempels (conform huidig beleid) in stand worden gehouden. Op de Grensmaas treedt de grootste verandering in waterstand op bij lage tot middelhoge afvoeren; ongeveer -0,2 m. Bij hoge afvoeren neemt het effect af tot maximaal ongeveer -0,05 m⁶.
- Op de Rijntakken zorgt de rivierbodemerrosie voor een verandering in afvoerdeling bij lage afvoeren (lager dan 3.000 m³/s te Lobith). De afvoer naar de Waal neemt toe, en gaat met name ten koste van de IJssel (verschuiving in de orde van 25 m³/s). Op de IJssel worden hierdoor de waterstanden bij zeer lage afvoeren ongeveer 0,35 m lager. Op de Boven-Waal zorgt de rivierbodemerrosie nog voor een waterstandsval (de extra afvoer naar de Waal is te gering om het effect van de rivierbodemerrosie te compenseren). Doordat op de Beneden-Waal de erosie beperkt is, zorgt de grotere afvoerfractie daar voor hogere waterstanden. De bodemerrosie op de Boven-Waal en Pannerdensch Kanaal leidt ook tot lagere waterstanden op de Boven-Rijn. Ook hier kunnen de waterstanden tot ongeveer 0,35 m lager worden.
- Bij hoogwater verandert de afvoerdeling niet doordat de regelwerken in de toekomst anders worden ingesteld. Door die andere instelling (behorend bij een afvoer van 17.000 m³/s te Lobith) en door de doorgaande rivierbodemerrosie, komen de regelwerken meer in een middenpositie te staan. De grootste verandering in waterstanden treedt dan op de Boven-Rijn op: -0,15 m.

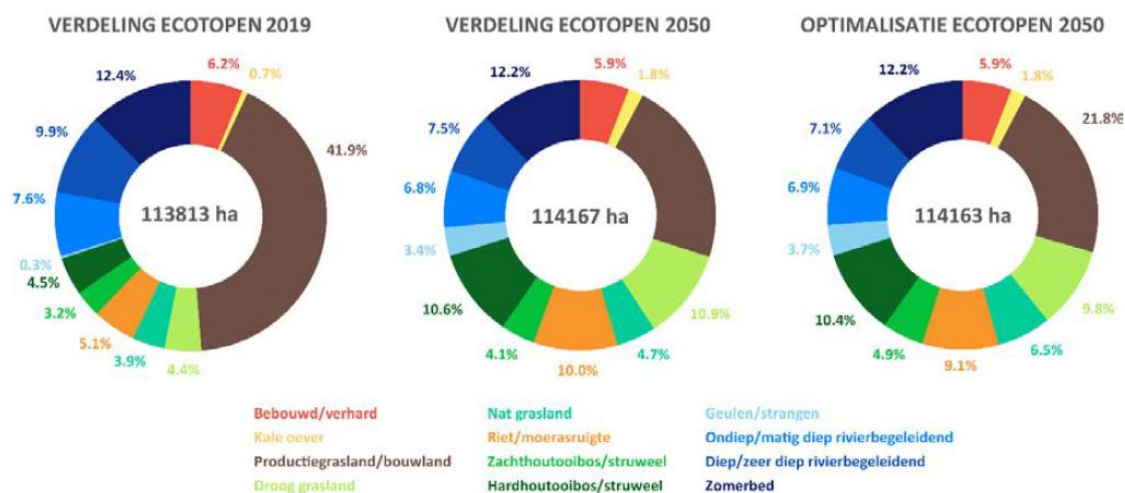
⁶ RWS-ZN heeft aan gegeven dat uit eerdere gevoeligheidsanalyses is gebleken dat de bodemverandering voor 25 tot 33% doorwerkt in de waterstanden bij maatgevende T100 afvoeren. De hier gepresenteerde resultaten zijn dus in lijn met eerdere bevindingen.

5 Natuur

5.1 Inleiding

De fysisch-chemische en biologische kwaliteit van de grote wateren is de laatste jaren verbeterd, maar gaat niet altijd voldoende vooruit om de doelen te halen. Met het oog op doelstellingen uit de Waterwet (KRW) en de Wet natuurbescherming (Natura 2000) willen de ministers van Infrastructuur en Waterstaat (I&W) en Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) een verbetering van de chemische en ecologische kwaliteit van deze grote wateren bewerkstelligen. Dit is nodig om ruimte te bieden aan economische ontwikkelingen. Om de KRW- en N2000 doelen te borgen naar de toekomst en om de natuur in het rivierengebied robuust te maken voor klimaatverandering en ruimtelijke ontwikkeling mogelijk te maken, hebben zij het investeringsprogramma Programmatische Aanpak Grote Wateren (PAGW) gestart. Binnen dit programma krijgt het water meer ruimte, worden verbindingen hersteld en wordt er gewerkt aan een gevarieerder leefgebied. Voor het rivierengebied zijn de doelen onder meer beschreven in Heusden et al. (2021) en Van der Sluis et al. (2020). Om meer rivierecotopen te kunnen realiseren zal het areaal productiegasland en bouwland af moeten nemen. Daarvoor in de plaats ontstaat meer ruimte voor nat en droog grasland, hardhoutoibos en riet/moerasruigte (Figuur 5.1).

Bij de effectbepaling natuur gaan we na in welke mate de doelen van de Programmatische Aanpak Grote Wateren (PAGW) gerealiseerd kunnen worden indien IRM niet wordt uitgevoerd (situatie van het nulalternatief). Daarnaast is een beoordeling uitgevoerd van de natuureffecten in algemene zin, waarbij kwalitatief wordt ingegaan op de indicatoren (hydro-)dynamiek, habitatdiversiteit en connectiviteit.



Figuur 5.1 Procentuele ecotoopverdeling voor het rivierengebied in de huidige situatie en wensbeeld 2050 (bron: Van der Sluis et al., 2020)

5.2 Methode

Of een ecotooptype ergens kan ontstaan is afhankelijk van meerdere standplaatsfactoren, waaronder overstromingsduur, het tijdstip van overstroming (winter of voorjaar/zomer), grondwaterstanden, bodemtype en beheer (zie bijvoorbeeld Klijn et al., 1998). In deze effectbepaling is alleen gekeken naar de effecten van veranderingen in overstromingsduur en grondwaterstanden. Verschillende ecotooptypen stellen verschillende eisen aan de overstromingsduur. Hardhoutoibos kan alleen ontstaan in gebieden die minder dan 50 dagen per jaar overstromen. Riet/moerasruigte moet juist een groot deel van het jaar onder water staan. Voor de grondwaterstanden is gekeken naar de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG), de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) en de gemiddeld laagst grondwaterstand (GLG). Voor natuur is met name de GVG van belang, omdat de condities in het voorjaar goed moeten zijn om zaden te laten ontkiemen.

Bepaling overstromingsduur

De overstromingsduur van uiterwaarden wordt sterk beïnvloed door de aanwezigheid van zomerkades. Zomerkades kunnen voorkomen dat uiterwaarden bij middelhoge afvoeren overstromen (afname overstromingsduur), maar kunnen water ook langer vasthouden (toename overstromingsduur). Om het effect van zomerkades op de overstromingsduur in voldoende detail te kunnen beschouwen is informatie nodig over de ligging van de zomerkades, de hoogte en het beheer ervan. Omdat deze informatie niet beschikbaar was, is aangenomen dat de zomerkades bij natuurgebieden zijn verwijderd of zijn doorgestoken.

Analyses op basis van overstromingsduur - HABITAT

Bij de effectbepaling voor het nulalternatief IRM is gebruik gemaakt van HABITAT. In HABITAT zijn rekenregels geïmplementeerd om te kunnen vaststellen of ecotoopgroepen (ecotooptypen met dezelfde standplaatsseisen, maar verschillend qua beheer/successiestadium) zich kunnen ontwikkelen. Er is een bestaande set rekenregels gebruikt, gebaseerd op het Rijksecotopenstelsel (RES), waarin met name de veranderingen in hydrodynamiek van belang zijn (Tabel 5.1)⁷.

Tabel 5.1 Rekenregels HABITAT

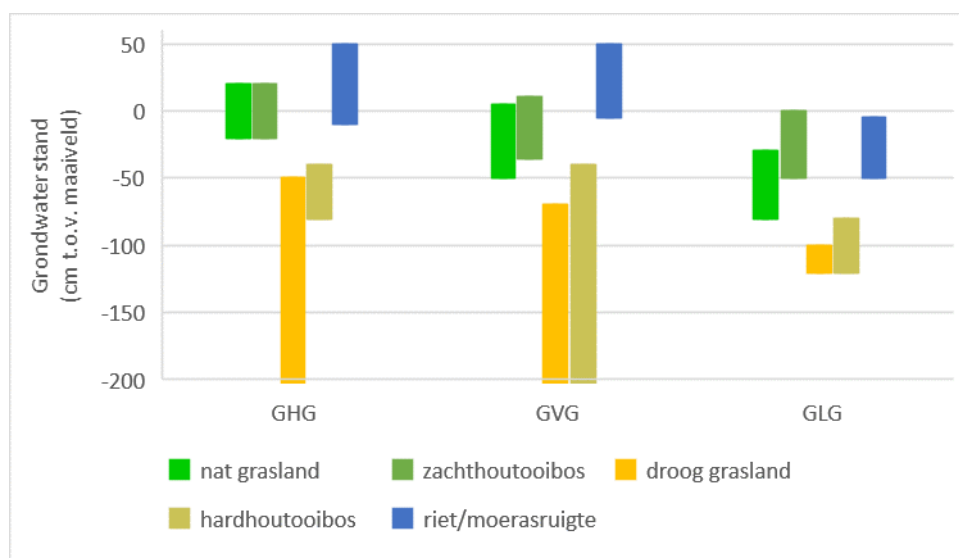
Ecotooptype	Overstromingsduur (dagen per jaar)	Waterdiepte
Drijfplanten- en waterplantenzone	365	>20cm
Helofytenzone	365	0-20cm
Droogvallende zone	150 – 365	
Zachthoutzone	50 – 150	
Hardhoutzone	20 – 50	
Hardhoutzone (2-20 dgn)	2 – 20	
Hoogwatervrije zone	0 – 2	

⁷ De rekenregels in HABITAT kunnen worden uitgebreid met rekenregels waarin ook rekening wordt gehouden met grondwaterstanden, maar dit is nu nog niet beschikbaar.

De belangrijkste invoer voor HABITAT zijn (raster)kaarten met de overstromingsduur. De overstromingsduur is bepaald op basis van de rivierwaterstanden berekend met D-HYDRO (zie hoofdstuk 4), een landgebruikskaart en een gedetailleerde bodemhoogtekaart. Voor het nulalternatief IRM is de aangepaste bodemhoogtekaart gebruikt, waarin rivierverruimende maatregelen die voor 2050 worden uitgevoerd, zoals Meanderende Maas, zijn meegenomen. Via een aantal tussenstappen worden op basis van deze kaartlagen voor iedere rastercel de overstromingsduur (0, 2, 20, 50, 150 of 365 dagen per jaar) en de waterdiepte berekend. Vervolgens is op basis van de landgebruikskaart (LGN 5x5m) bepaald welke rasterpunten op dit moment de bestemming natuur hebben. De gewenste natuurecotopen kunnen alleen voorkomen op de locaties die volgens de LGN kaart op dit moment een natuurbestemming kennen. Een omissie in deze methode is dat 'nieuwe' natuurgebieden, die wel onderdeel zijn van het nulalternatief, niet zijn opgenomen in de LGN kaart.

Analyses op basis van grondwaterstanden

Om na te gaan hoe veranderingen in grondwaterstanden van invloed zijn op de natuur, heeft Van den Berg (2021) rekenregels voorgesteld (Figuur 5.2). De exacte waarden van de rekenregels zijn in tabelvorm te vinden in Bijlage D.3). Hier staat ook een korte beschouwing in verband met onderlinge tegenstrijdigheden).



Figuur 5.2 Grafische weergave rekenregels voorgesteld door Van den Berg (2021). Positieve waarden duiden op overstromingen.

Op basis van grondwaterstandseffecten die zijn berekend in het kader van de BRL (Levelt et al., 2022) en DPZW (Mens et al., 2020b) is een eerste verkenning uitgevoerd naar de mogelijke effecten van veranderingen in grondwaterstand op de riviernatuur.

Beheer

Welk ecotooptype ergens ontstaat is niet alleen afhankelijk van de overstromingsduur of grondwaterstand, maar ook – zo niet vooral – van het beheer. Wanneer de overstromingsduur maximaal 20 dagen per jaar is kan hardhoutooibos ontstaan. Maar bij ander beheer kan ook droog uiterwaardgrasland ontstaan. Wanneer HABITAT aangeeft dat een plek geschikt is voor hardhoutooibos, betekent dit dus dat hier ook droog grasland, struweel of een pionierfase met zachthoutooibos kan voorkomen; allemaal 'voorstadia' van hardhoutooibos, al dan niet gefixeerd door beheer.

Vergelijking met nu aanwezige ecotopen

Om de resultaten beter te kunnen duiden is een vergelijking gemaakt tussen de berekende ecotooppotentie en de nu aanwezige ecotopen zoals gerapporteerd in Van der Sluis (2020).

Vergelijking PAGW

Om te kijken in welke mate de doelen van de PAGW gerealiseerd zouden worden wanneer geen sprake zou zijn van IRM, is de ecotooppotentie zoals bepaald met HABITAT vergeleken met de doelen van de PAGW. Hierbij is ingezoomd op twee PAGW hotspots: de Gelderse Poort en de Grensmaas.

Omdat de PAGW meer ecotopen onderscheidt dan HABITAT, zijn bij het vergelijken van de HABITAT-resultaten met de doelen van de PAGW enkele ecotooptypen samengevoegd, zie Tabel 5.2. Habitat kent een helofytenzone die 365 dagen per jaar overstroomd moet zijn, met een beperkte waterdiepte. Deze ecotoop is gelijk gesteld aan de ecotoop riet/moerasruigte uit de PAGW. De zachthoutzone uit HABITAT is op basis van overstromingsduur gelijk gesteld aan de ecotopen zachthoutoibos/struweel en nat grasland uit de PAGW. HABITAT kent een droogvallende zone.

Tabel 5.2 Samenvoeging ecotopen PAGW om vergelijking met resultaten HABITAT te faciliteren

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	zachthoutoibos/struweel & nat grasland
Hardhoutzone (20-50)	20 – 50 dgn	hardhoutoibos
Hardhoutzone (2-20)	2 – 20 dgn	hardhoutoibos & droog grasland
Hoogwatervrije zone	0 – 2 dgn	
Bebouwd	-	bebouwd/verhard
Landbouw	-	productiegrasland/bouwland

Expert judgement - dynamiek, connectiviteit en (interne) habitat diversiteit

Zoals in Figuur 3.1 is aangegeven wordt in het kader van de functie natuur ook gekeken naar de sleutelfactoren van de PAGW dynamiek, connectiviteit en (interne) habitat diversiteit. De beoordeling vindt plaats op basis van expert judgement. Dit geldt ook voor de beoordeling van de waterkwaliteit.

Varianten

De natuureffecten zijn met HABITAT in beeld gebracht voor de volgende scenario's:

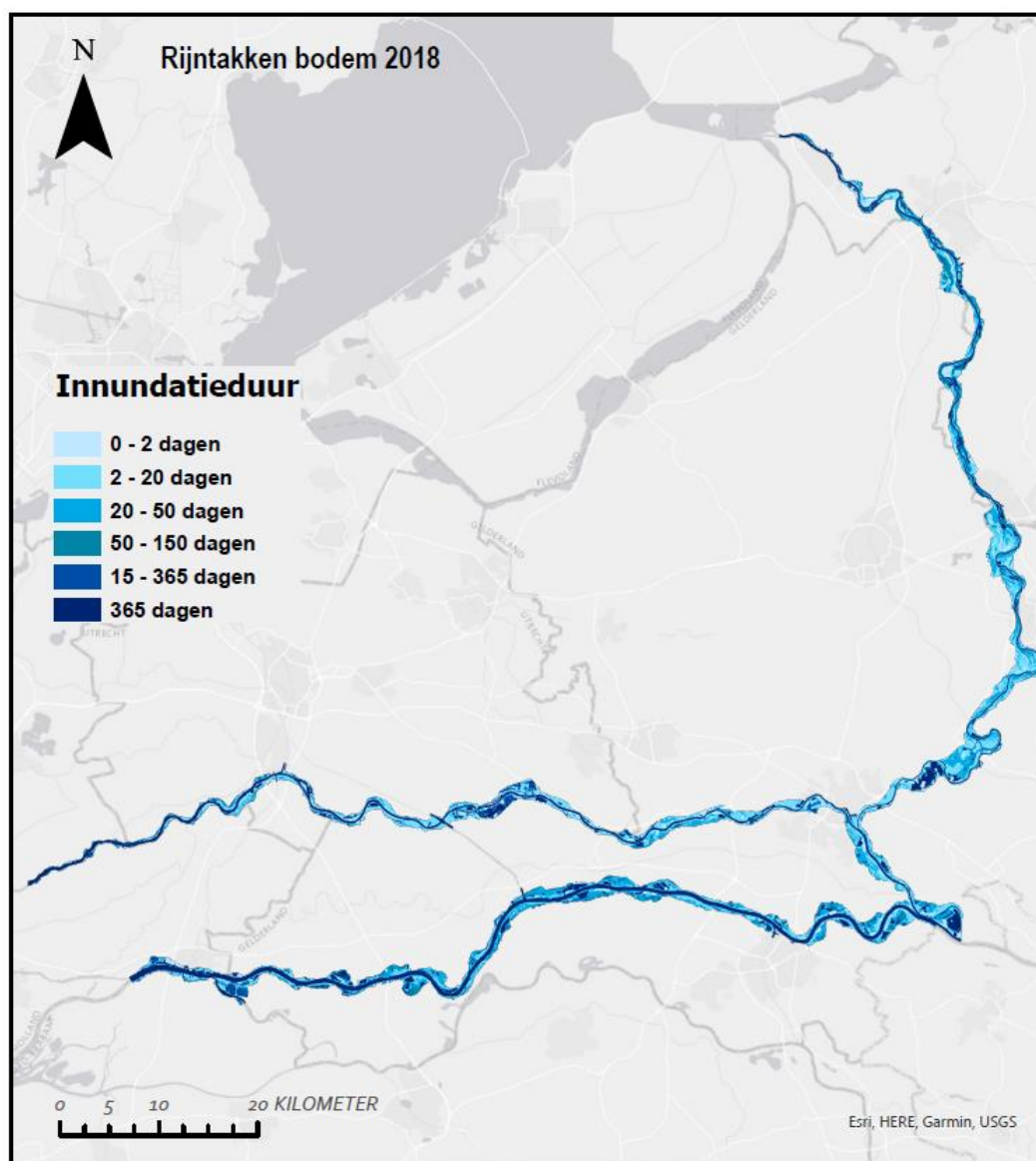
- Ref_2018: huidig klimaat en rivierbodempligging (huidige situatie)
- Ref_2050: huidig klimaat, maar met veranderde rivierbodempligging in zichtjaar 2050
- W_{Hdry}_2018: klimaatverandering conform het klimaatscenario W_{Hdry}, in combinatie met bodempligging 2018
- W_{Hdry}_2050: dit is het nulalternatief van IRM. Klimaat en rivierbodempligging zijn beide aangepast.

Omdat gebruik is gemaakt van reeds beschikbare grondwaterstandsberekeningen, is de invloed van veranderingen in grondwaterstand alleen bepaald voor de huidige situatie (Ref_2018) en de situatie waarbij alleen de rivierbodempligging is aangepast conform de verwachte ligging in 2050 (Ref_2050). Het gecombineerde effect van veranderingen in klimaat en rivierbodempligging is in deze studie niet met modelberekeningen verkend. Wel is gebruik gemaakt van de bevindingen van Van Geest (2020) en expert judgement.

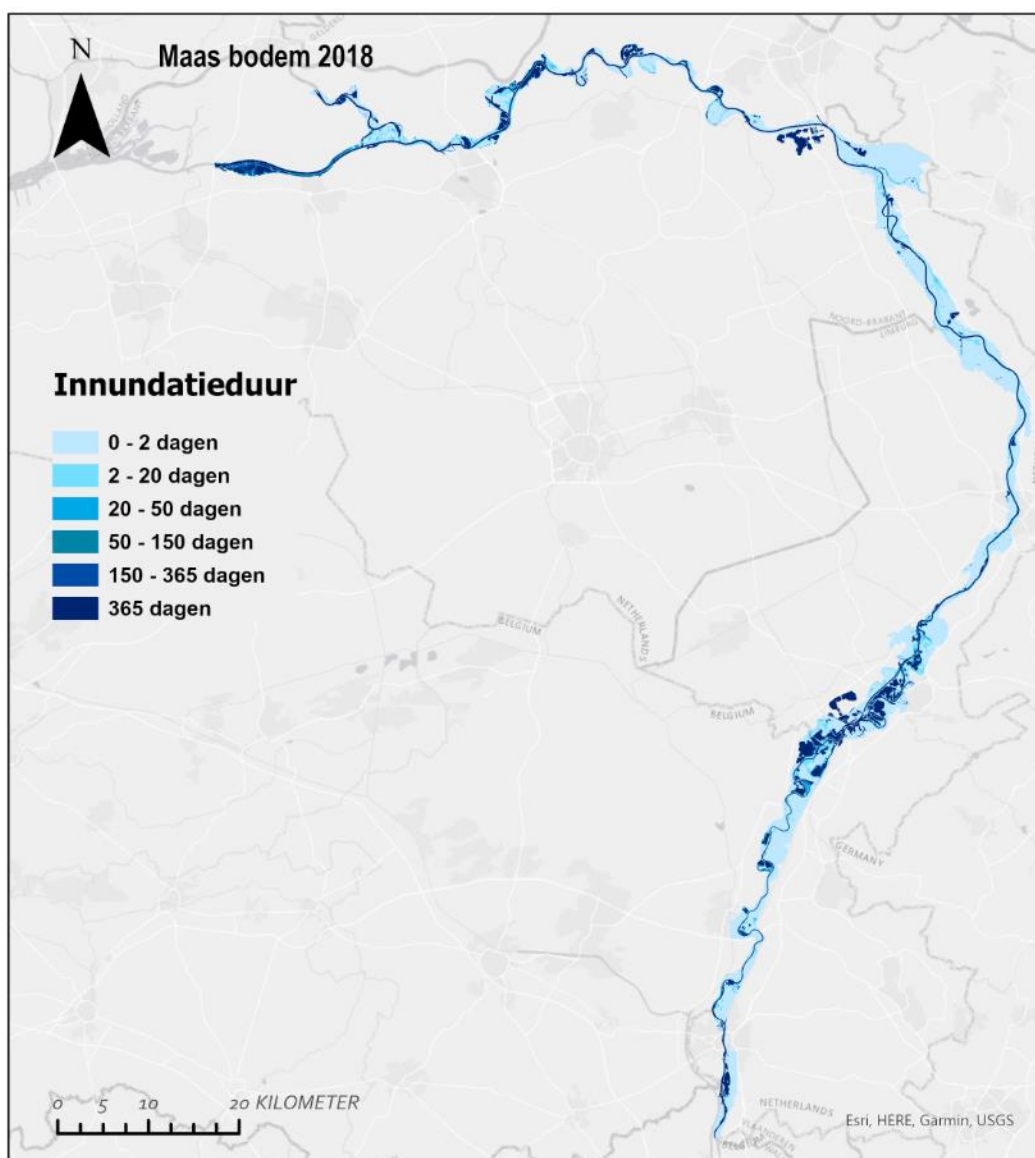
5.3 Resultaten

5.3.1 Overstromingsduur

Figuur 5.3 toont de overstromingsduur van de uiterwaarden langs de Rijntakken in de huidige situatie, wanneer geen rekening wordt gehouden met de aanwezigheid van zomerkades. Veel uiterwaarden langs de Waal overstromen gemiddeld 20 tot 50 dagen per jaar. Langs de IJssel en de Nederrijn/Lek is de gemiddelde overstromingsduur iets korter, want de uiterwaarden liggen daar hoger. De uiterwaarden langs de Maas liggen relatief hoog ten opzichte van het zomerbed en staan daarom nog minder vaak en lang onder water. In veel uiterwaarden langs de Maas is de overstromingsduur minder dan 2 dagen per jaar (Figuur 5.4), omdat het zomerbed zo ruim bemeten is voor het afvoerregime van deze rivier (zie ook Klijn et al., 2022). De overstromingsduren die zijn berekend voor een veranderd klimaat, een andere rivierbodempligging of bij een combinatie van beide, staan in Bijlage D.1.

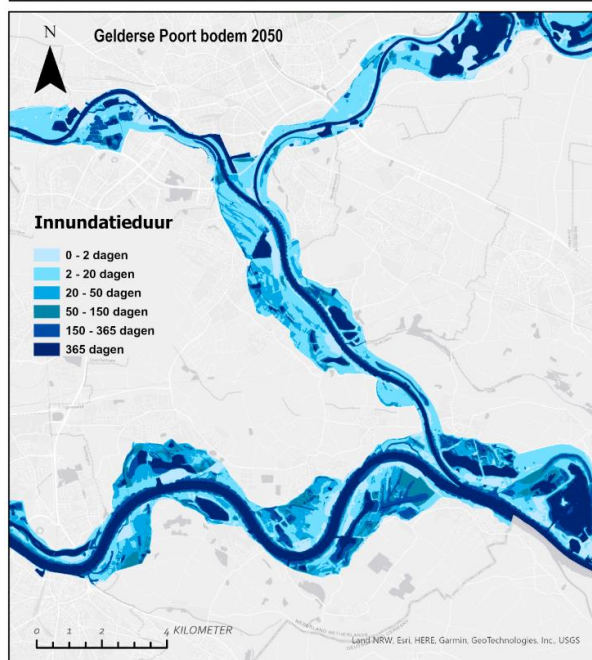
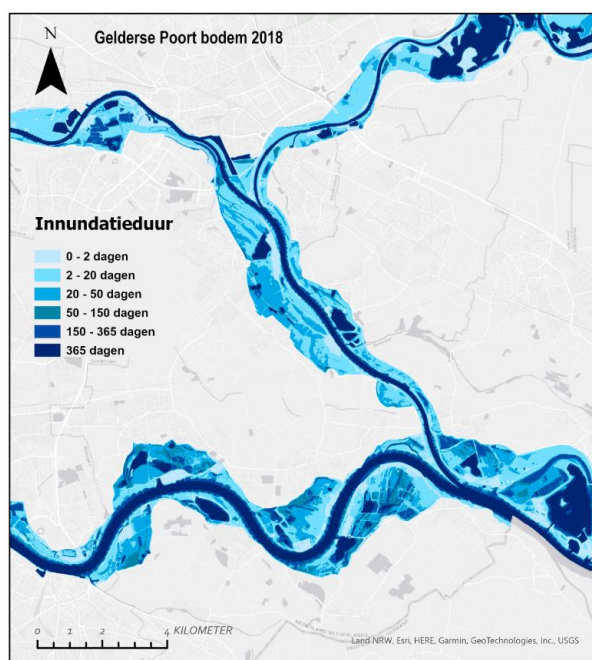


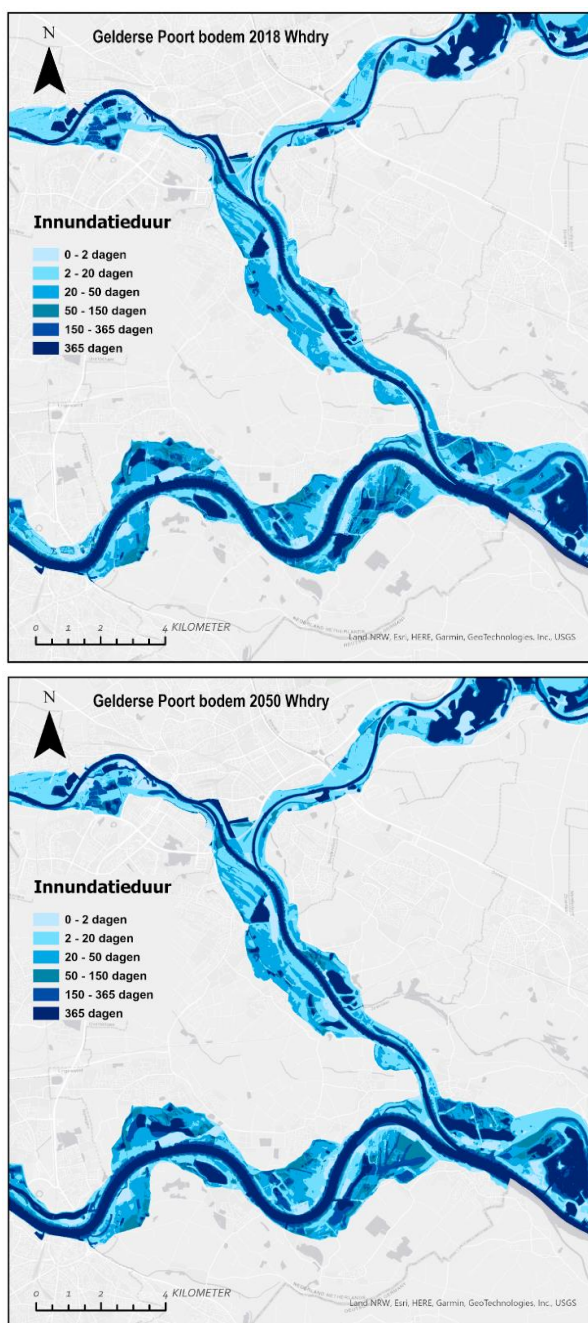
Figuur 5.3 Overstromingsduur van de uiterwaarden langs de Rijnakken in de huidige situatie, zonder rekening te houden met zomerkades.



Figuur 5.4 Overstromingsduur van de uiterwaarden langs de Maas in de huidige situatie, zonder rekening te houden met zomerkades.

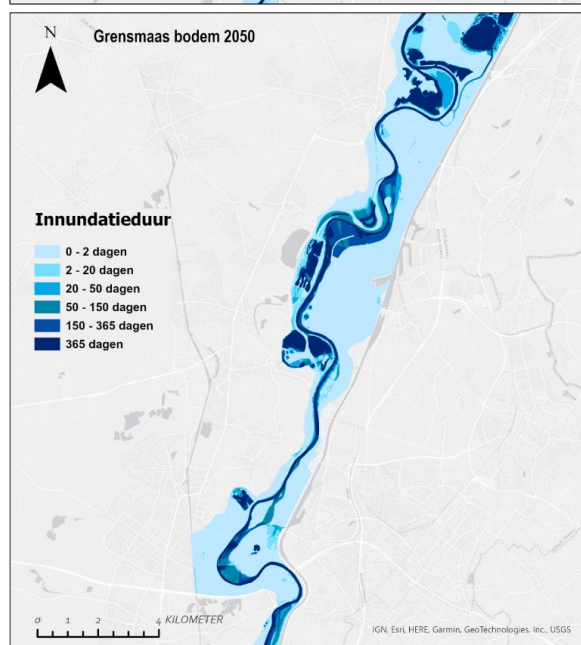
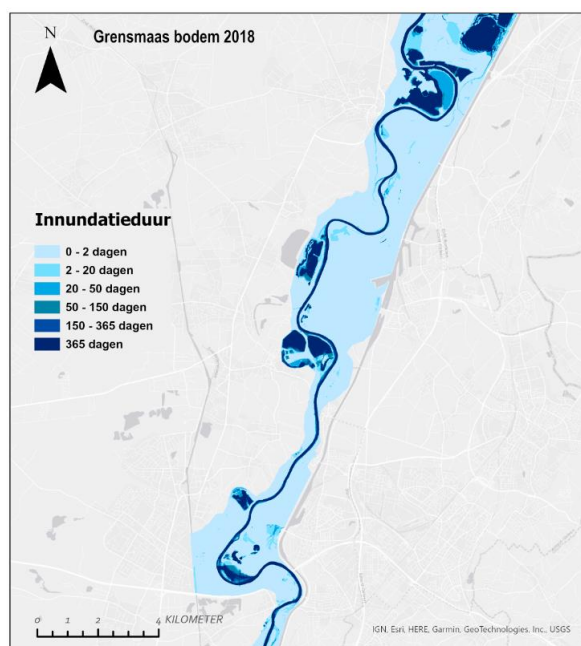
Figuur 5.5 toont de overstromingsduur voor de uiterwaarden in de Gelderse Poort in de referentiesituatie en bij het nulalternatief IRM. De veranderingen in rivierbodempligging leiden lokaal tot een beperkte afname van de overstromingsduur (zie bijvoorbeeld de uiterwaarden aan de westkant van het Pannerdensch Kanaal). De grootste veranderingen zijn het gevolg van inrichtingsmaatregelen (vergravingen in uiterwaarden) die tussen nu en 2050 gerealiseerd of afgerond zullen worden. Dit resulteert onder meer in een toename van de overstromingsduur in het oostelijke deel van de Millingerwaard en in de Kijfwaard (respectievelijk ten zuidwesten en ten oosten van de Pannerdensch Kop) en bij Rivierklimaatpark IJsselpoort. Door klimaatverandering neemt de kans op hoogwater iets toe, wat resulteert in een beperkte toename van de overstromingsduur. Bij het nulalternatief IRM (combinatie van veranderingen in rivierbodempligging en klimaatverandering), neemt de overstromingsduur beperkt toe. De veranderingen zijn echter klein en vooral het gevolg van inrichtingsmaatregelen..

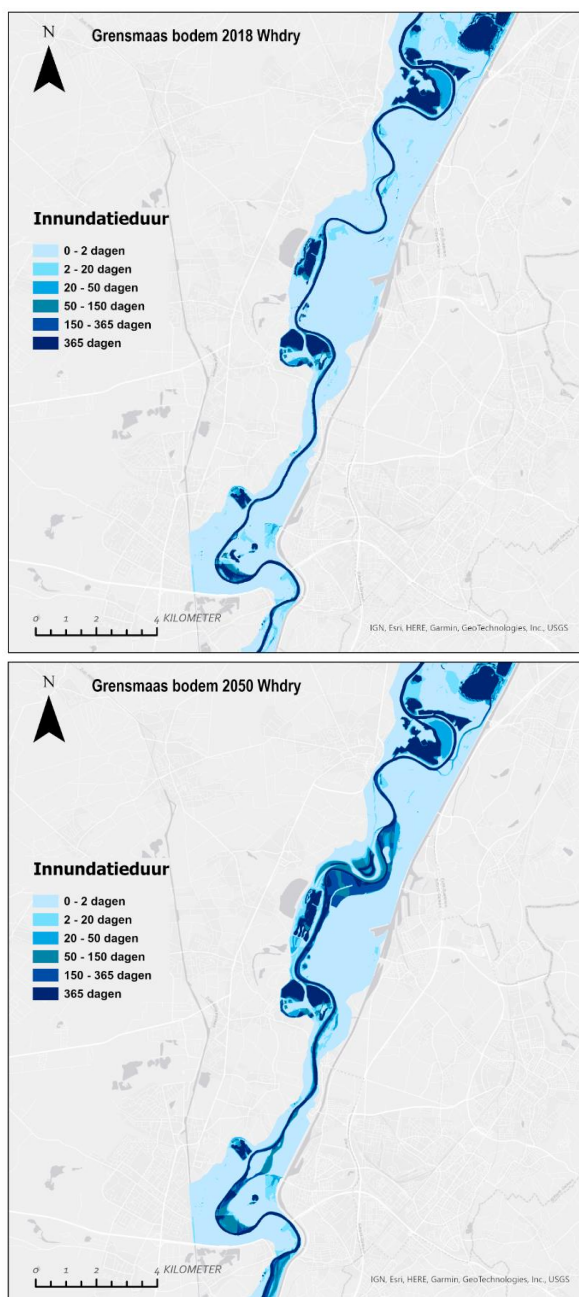




Figuur 5.5 Overstromingsduur van de uiterwaarden in de Gelderse Poort in de huidige situatie (linksboven), met veranderde rivierbodempligging (rechtsboven), met veranderd klimaat (linksonder) en het nulalternatief IRM (combinatie van veranderde rivierbodempligging en klimaatverandering) (rechtsonder).

Figuur 5.6 toont de veranderingen in overstromingsduur langs de Grensmaas. Net als langs de Rijntakken zijn de grootste verschuivingen het gevolg van rivierverruimingsmaatregelen, waarbij de weerden worden verlaagd.





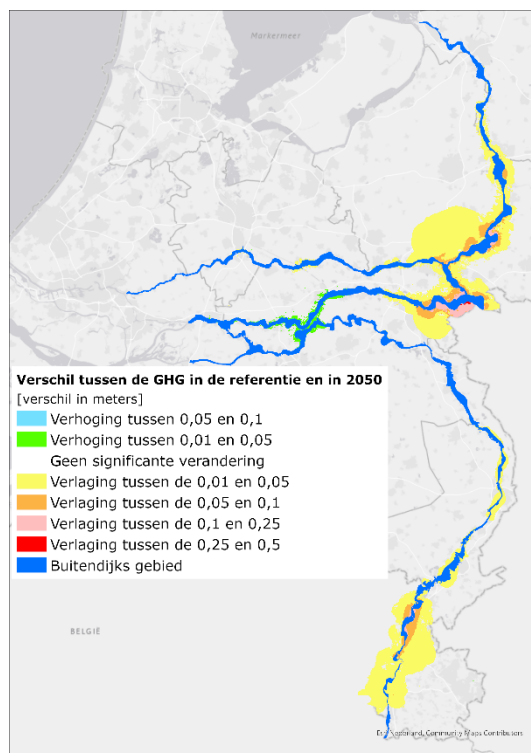
Figuur 5.6 Overstromingsduur van de weerden langs de Grensmaas in de huidige situatie (linksboven), met veranderde rivierbodempligging (rechtsboven), met veranderd klimaat (linksonder) en het nulalternatief IRM (combinatie van veranderde rivierbodempligging en klimaatverandering) (rechtsonder)..

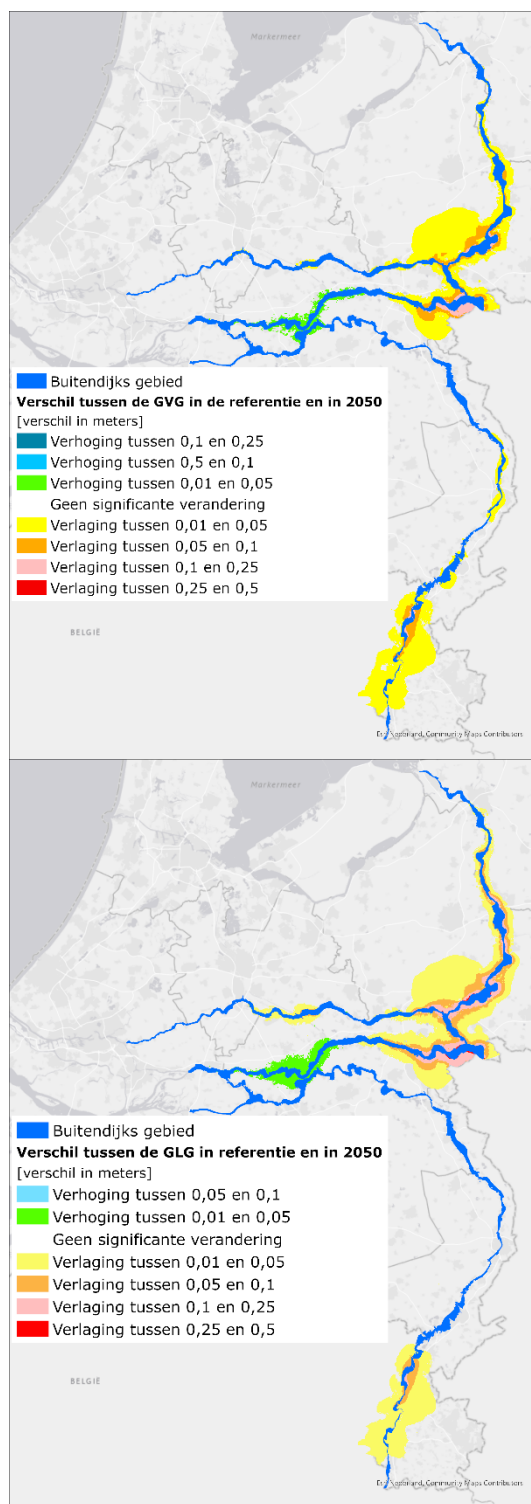
5.3.2 Grondwaterstandsveranderingen

Effect veranderde rivierbodempligging op grondwaterstanden

Om effecten op natuur te bepalen is niet alleen gekeken naar veranderingen in overstromingsduur, maar ook naar veranderingen in grondwaterstand. Hiervoor is gebruik gemaakt van grondwaterstandsberekeningen uit Levelt et al. (2022). Levelt et al. hebben berekende rivierwaterstanden gebruikt als invoer voor een hydrologisch grondwatermodel (het LHM). Ze hebben berekeningen gemaakt voor de huidige situatie en voor een situatie waarbij de rivierbodempligging is aangepast naar de verwachte ligging in 2050.

Figuur 5.7 toont de veranderingen in de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG), de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG), en de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) als gevolg van dezelfde verandering in rivierbodempligging als aangenomen in het nulalternatief van IRM (zie Levelt et al., 2022). In de studie van Levelt et al. (2022) is geen rekening gehouden met het effect van klimaatverandering.





Figuur 5.7 Verandering in grondwaterstand (GHG, GVG en GLG) als gevolg van veranderingen in rivierbodempligging (Levelt et al., 2022). Tijdsafhankelijk betekent dat gerekend is met tijdseries (dynamisch).

De erosie op de bovenloop van de Waal, het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel leidt tot lagere rivierwaterstanden en daarmee tot een daling van de grondwaterstanden met maximaal ongeveer 20 cm, zie de oranje kleuren. Ook op de Grensmaas leidt rivierbodemerisatie en de daarmee gepaard gaande lagere rivierwaterstand tot een daling van de grondwaterstanden.

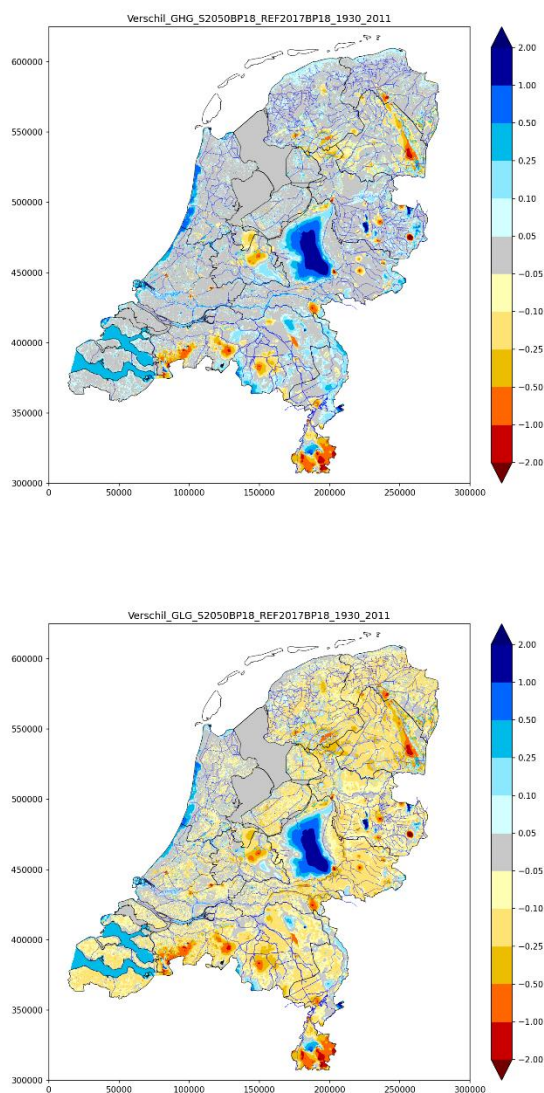
In dit geval bedraagt de berekende afname maximaal 10 cm. Een stijging van de grondwaterstanden is te verwachten langs de Midden-Waal. Dit komt doordat sprake is van aanzanding en doordat er bij lage afvoeren verhoudingsgewijs meer water over de Waal wordt afgevoerd. Dit leidt op dit traject van de Waal tot hogere waterstanden en dus tot iets hogere grondwaterstanden (maximaal ongeveer 5 cm hoger). Het effect op de grondwaterstanden is op veel locaties ook (ver) binnendijs merkbaar.

Effect klimaatverandering en socio-economische ontwikkelingen op grondwaterstanden

Mens et al. (2020b) hebben eerder al het effect van veranderingen in het klimaat en onttrekkingen aan het grondwatersysteem op de grondwaterstand berekend. Effecten van rivierbodemerossie zijn in deze studie echter niet beschouwd. De berekende verandering in GHG en GLG bij scenario Stoom zijn getoond in Figuur 5.8. In het scenario Stoom zijn de GHG's in de meeste infiltratiegebieden lager, behalve in de grote infiltratiegebieden met zeer diepe grondwaterstanden, zoals de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe, waar de GHG en GLG mogelijk hoger worden. Dit komt doordat het grondwater te diep zit om in de zomer te verdampen. Een belangrijke kanttekening is dat de grondwaterstanden in dit gebied erg diep zijn waardoor een hogere grondwaterstand geen tot nauwelijks effect heeft op de wortelzone.

Voor de GLG's laat het scenario Stoom op veel locaties een veel lagere stand zien. Dit komt door een combinatie van klimaatverandering (drogere zomers) en grotere onttrekkingen uit het grondwater ten behoeve van drinkwatervoorziening.

Langs de rivieren is een iets hogere GHG te zien (veelal maximaal 10 cm). Dit komt doordat de kans op hoogwater in de wintermaanden toeneemt. Er is een lagere GLG te zien die langs de Rijntakken en de Grensmaas lokaal 25 à 50 cm kan zijn. Deze is het gevolg van vaker voorkomende en langdurigere periodes met lage afvoeren. De GVG is bij klimaatscenario W_{dry} langs de rivieren ongeveer gelijk aan de huidige GVG (de verwachting is dat de rivierafvoer in het voorjaar nauwelijks zal veranderen).



Figuur 5.8 Verandering in grondwaterstand GHG (links) en GLG (rechts) als gevolg van veranderingen in klimaat (incl. rivierafvoerregime) en socio-economische ontwikkelingen (Mens et al., 2020b)

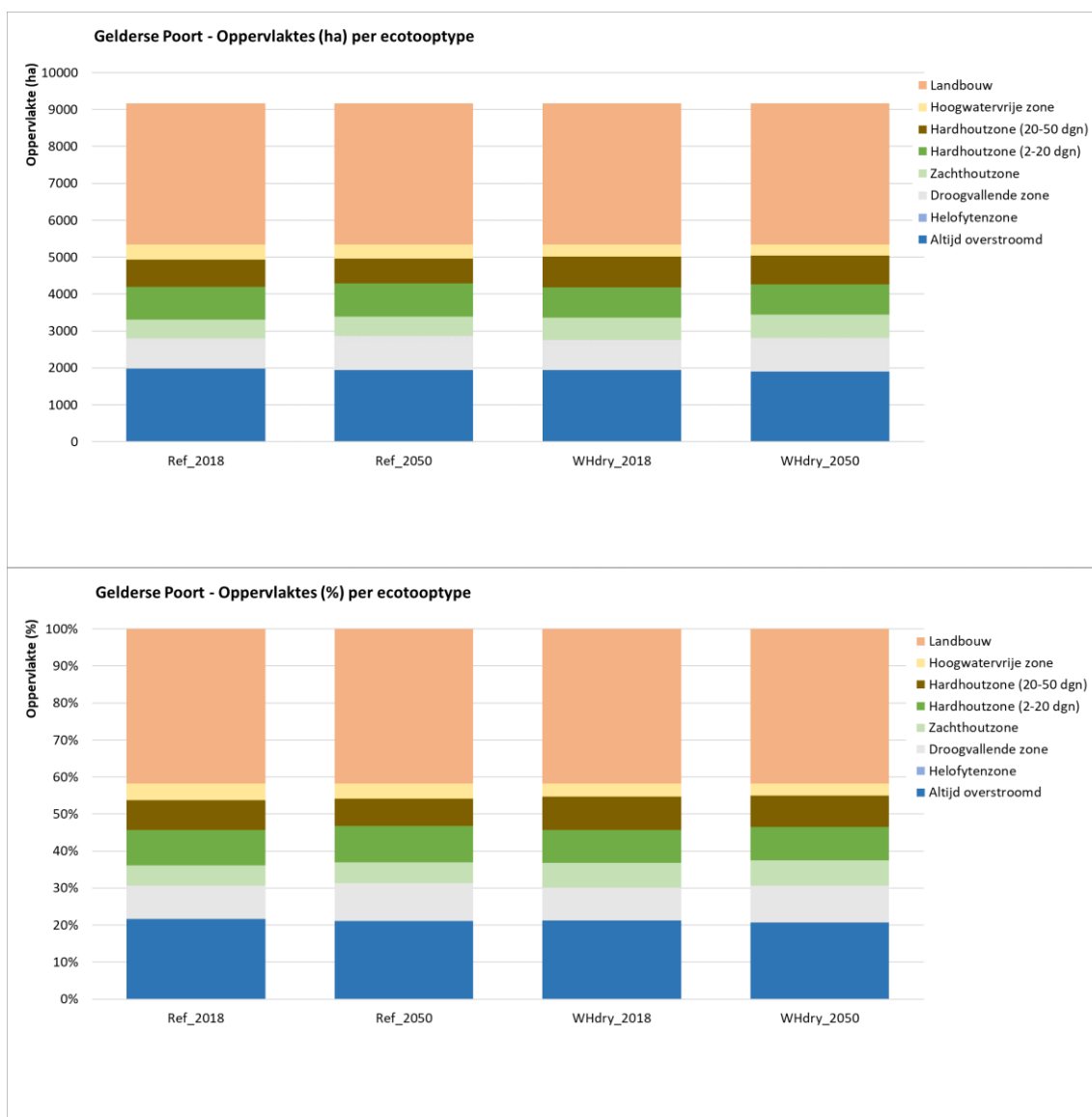
5.3.3

Veranderingen in potentiële ecotoopverdeling op basis van overstromingsduur

Op basis van de overstromingsduren is met HABITAT de potentiële ecotoopverdeling langs de Rijntakken en de Maas bepaald. Voor de buitendijkse gebieden in de Gelderse Poort is het resultaat getoond in Figuur 5.9:

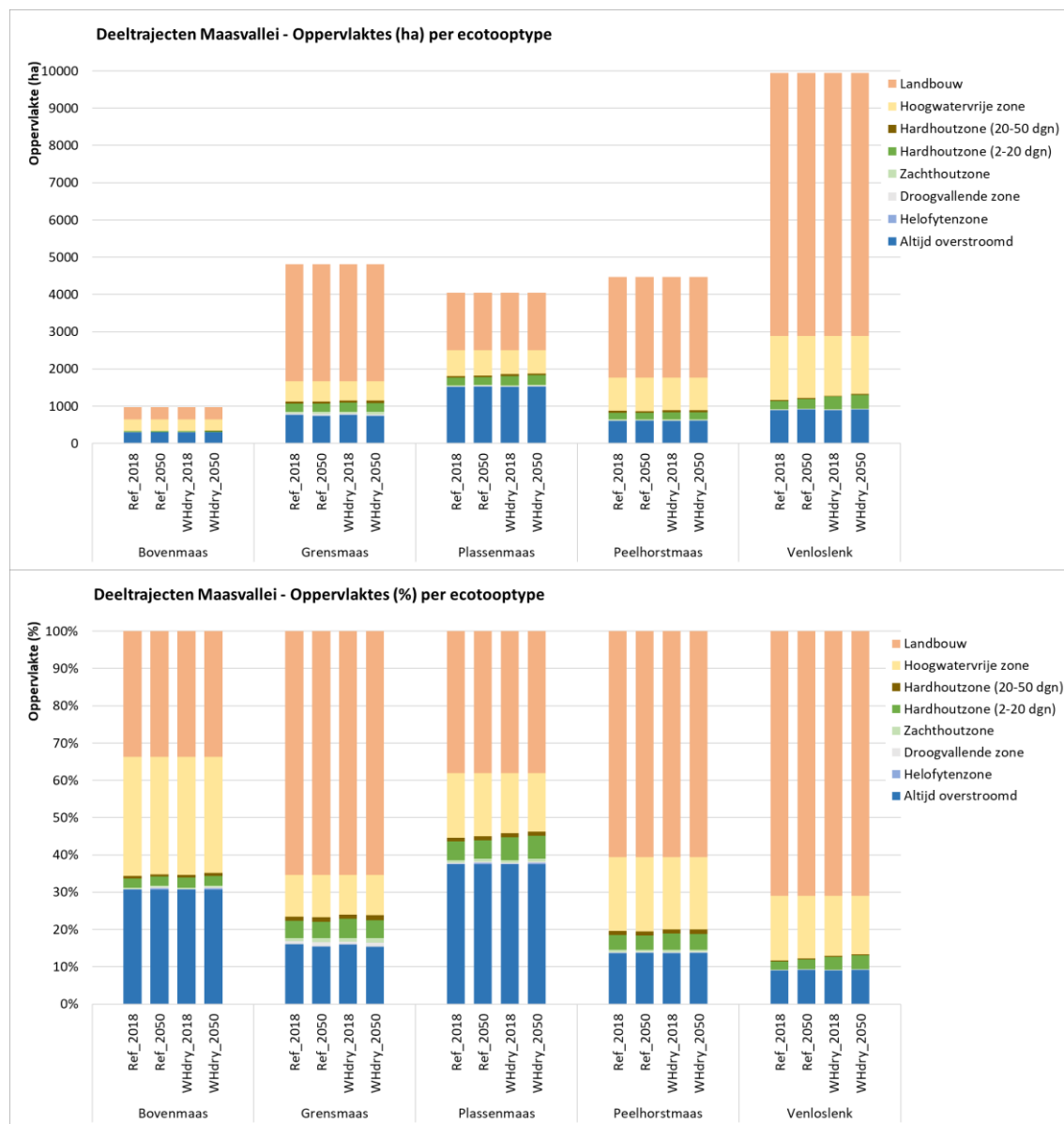
- In de huidige situatie is ongeveer 2000 ha (ruim 20% van het gebied) permanent overstroomd. Dit gebied beslaat het zomerbed, maar ook de plassen in de uiterwaarden. Iets minder dan 1000 ha (ongeveer 10%) valt af en toe droog. Dit zijn de rivieroeveren, maar ook locaties in een aantal strangen of nevengeulen. 2000 ha (20% van het gebied) is geschikt voor zacht hout- en hardhoutoibos. De rest (ruim 4000 ha), bestaat uit hoogwatervrije zones (minder dan 2 dagen per jaar overstroomd) en landbouwgebieden.

- Doorgaande erosie van het zomerbed (variant Ref_2050) resulteert in dit gebied in lagere waterstanden. De overstromingsduur kan daardoor lokaal beperkt afnemen (vergelijk de bovenste kaartjes in Figuur 5.5). Lokaal neemt de overstromingsduur echter toe doordat de uiterwaarden in het kader van inrichtingsmaatregelen worden vergraven (Millingerwaard en Kijfwaard). Het netto effect op de potentiële ecotoopverdeling in dit gebied is zeer beperkt (vergelijk Ref_2018 met Ref_2050).
- Het effect van klimaatverandering (variant WHdry_2018) op de overstromingsduur en daarmee op de ecotooppotentie is eveneens beperkt.
- Bij het nulalternatief IRM lijkt de potentiële ecotoopverdeling sterk op de huidige ecotoopverdeling.



Figuur 5.9 Potentiële ecotoopverdeling in de buitendijkse gebieden van de Gelderse Poort met een natuurfunctie, in hectares (boven) en als percentage van het totale oppervlak (onder). Het landbouwareaal is toegevoegd om een beeld te geven van het aandeel natuur in het totale oppervlak. Ref_2018 is de huidige situatie (referentie), bij Ref_2050 is alleen de rivierbodempligging aangepast naar de verwachte ligging in 2050, bij WHdry_2018 is juist alleen het klimaat veranderd. In WHdry_2050 zijn veranderingen in zowel bodempligging als klimaat mee genomen (het nulalternatief van IRM).

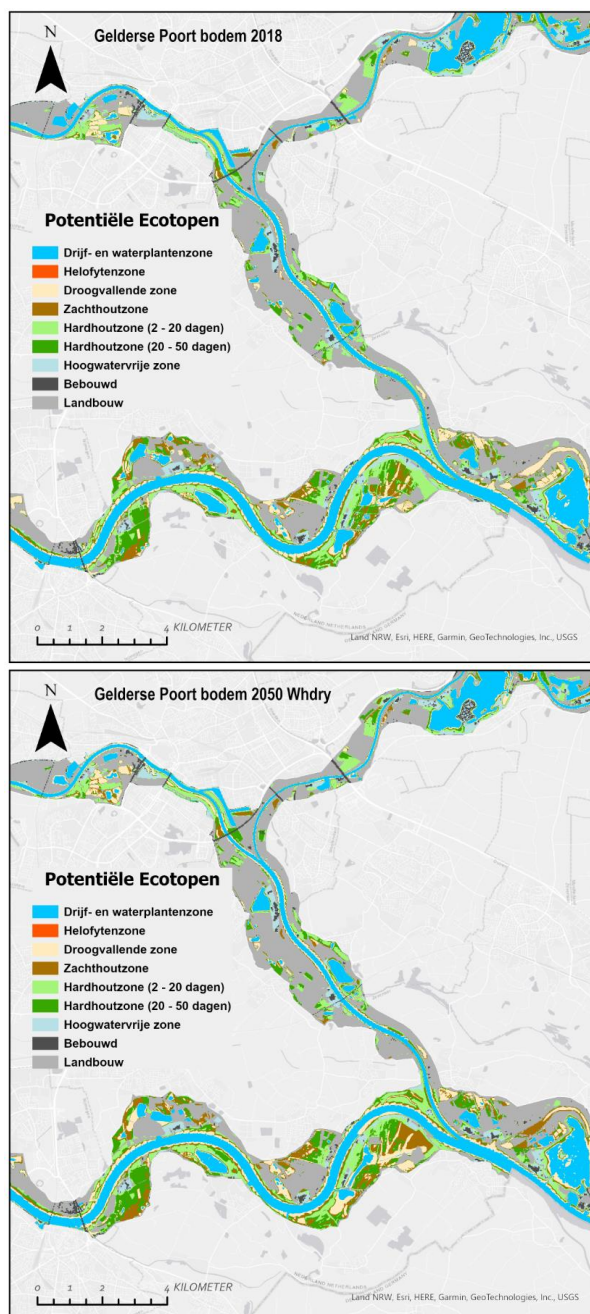
Voor de Maasvallei is in Figuur 5.10 de potentiële ecotoopverdeling getoond per IRM-traject. Wat opvalt is dat in de Maasvallei vooral sprake is van zones die permanent onder water staan (blauwe balkjes) en van zones die minder dan 2 dagen per jaar overstromen of in gebruik zijn als landbouwgebied (gele en oranje balkjes). De arealen die geschikt zijn voor zachthout- of hardhoutoibos zijn beperkt.



Figuur 5.10 Potentiële ecotoopverdeling in de Maasvallei in hectare (boven) en als percentage van het totale oppervlak (onder)

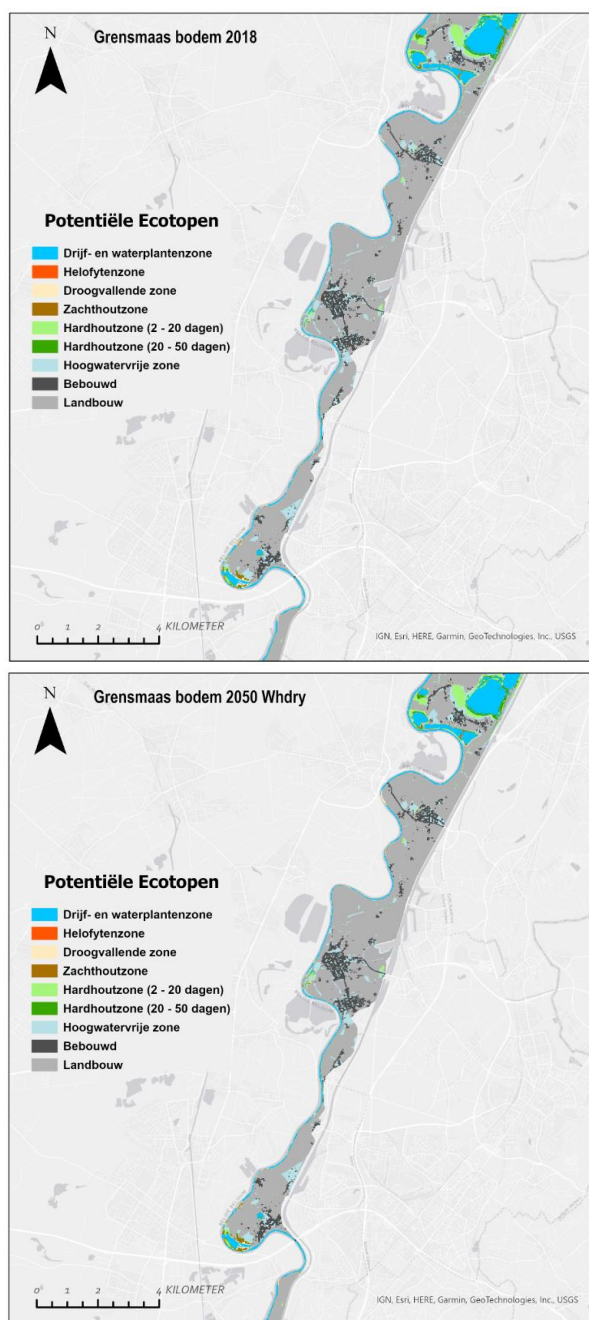
De resultaten voor alle IRM-trajecten (Rijntakken en Maas) zijn in Bijlage D.2 gepresenteerd. Het valt op dat het effect van veranderingen in rivierbodempligging en klimaat (W_{Hdry} scenario) op de potentiële ecotoopverdeling zeer beperkt is. De overstromingsduur is bij het nulalternatief IRM langs de Rijntakken niet wezenlijk anders dan de huidige situatie (de overstromingsduur van de meeste uiterwaarden blijft binnen dezelfde klasse). Langs de Maas neemt de potentie voor hardhoutoibos als gevolg van klimaatverandering zeer beperkt toe (de groene balkjes in Figuur 5.10 worden iets langer). Dit leidt tot een beperkte afname van de hoogwatervrije zone (de gele balkjes worden iets korter).

Dat veranderingen in de potentiële ecotoopverdeling beperkt zijn blijkt ook uit de kaarten die zijn te zien in Figuur 5.11 (Gelderse Poort) en Figuur 5.12 (Grensmaas). In de Gelderse Poort zijn de grootse veranderingen te zien in het oostelijk deel van de Millingerwaard (daar neemt de geschiktheid voor zachthout ooibos toe) en in de Kijfwaard. Dit komt doordat er tussen nu en 2050 gebieden worden afgegraven.



Figuur 5.11 Ecotooppotentie Gelderse Poort berekend met HABITAT in de huidige situatie (links) en bij het nulalternatief IRM (rechts)⁸

⁸ In deze kaartjes is alleen de ecotooppotentie te zien van gebieden die nu een natuurfunctie kennen. De nevengeul van Westervoort is daardoor wel zichtbaar in de overstromingsdurenkaart, maar niet in deze ecotoopenpotentiekaart (dit gebied kent momenteel een landbouwfunctie).



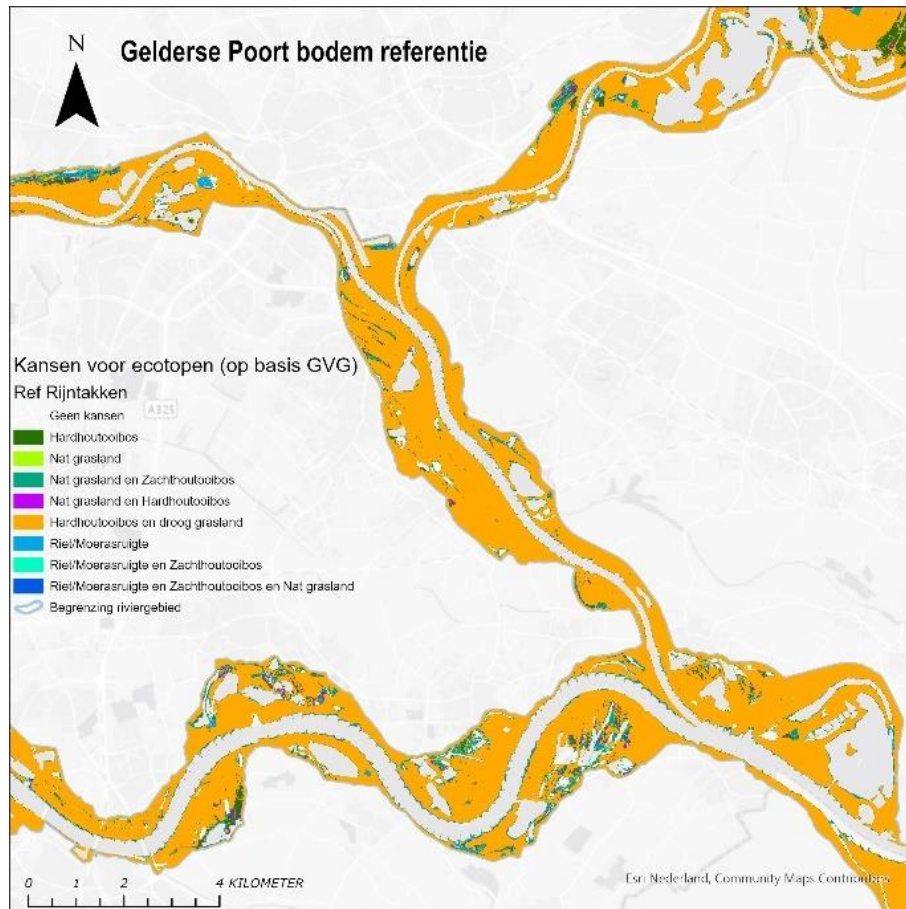
Figuur 5.12 Ecotooppotentie voor huidige natuurgebieden langs de Grensmaas in de huidige situatie (links) en bij het nulalternatief IRM (rechts).

5.3.4

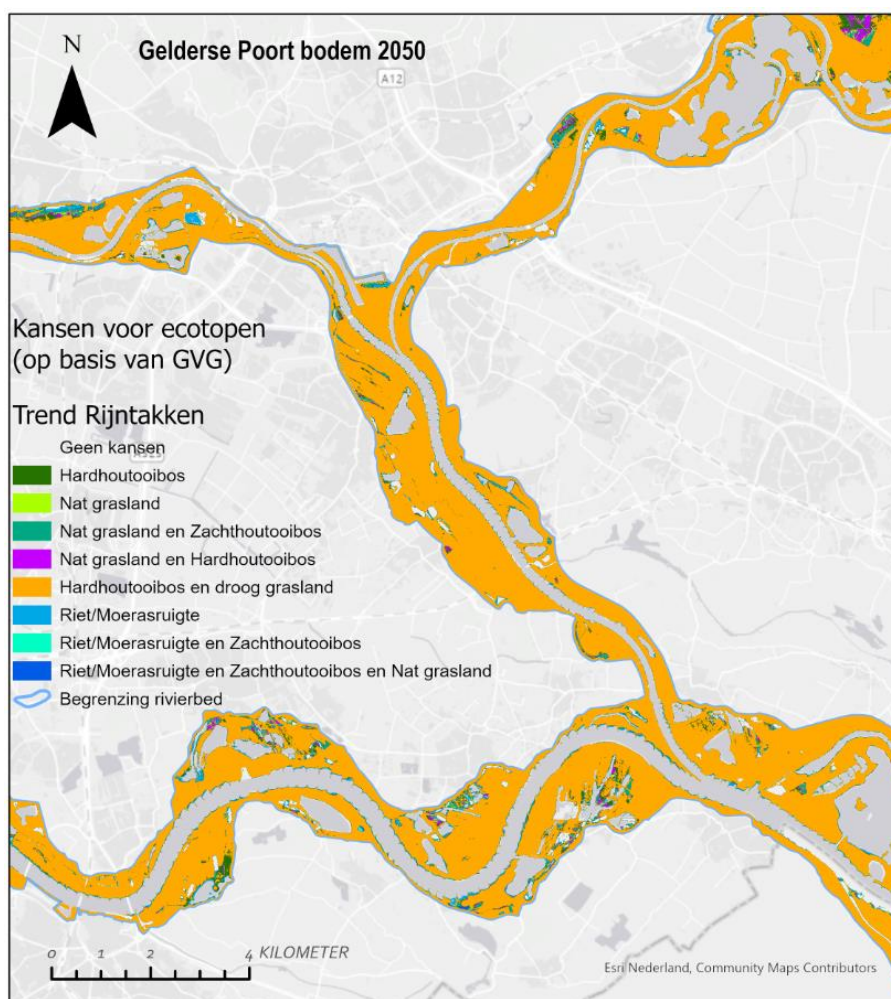
Veranderingen in potentiële ecotoopverdeling op basis van grondwaterstanden

Met de grondwaterstanden die zijn berekend in het kader van de BRL (Levelt et al., 2022) en de rekenregels van Van den Berg (2021) en is berekend welke ecotooptypen voor kunnen komen langs de Rijntakken en de Maas. Dit is apart gedaan met de rekenregels voor de GHG, de GVG en de GLG. Omdat de voorjaarsgrondwaterstand als meest bepalend wordt gezien voor de riviernatuur, richt de effectbepaling zich hier vooral op de GVG.

Figuur 5.13 toont de resultaten voor de huidige situatie in de Gelderse Poort. Op basis van de GVG zijn grote delen in het gebied vooral geschikt voor droog grasland en hardhoutooibos. Er zijn echter ook locaties waar zachthoutooibos, nat grasland of riet/moerasruigte mogelijk zijn; het gezamenlijke oppervlak van deze natte ecotopen is echter gering. Naar de toekomst toe (nulalternatief IRM) zal de GVG in het gebied van de Gelderse Poort als gevolg van rivierbodemerrosie nog iets verder afnemen. Ondanks dat de hydrologische situatie voor de nattere ecotooptypen in theorie nog iets slechter wordt, resulteert dit niet in een wezenlijk ander kaartbeeld (Figuur 5.14): de uiterwaarden in de Gelderse Poort blijven met name geschikt voor de droge ecotooptype. Het oppervlak dat geschikt is voor natte ecotooptypen blijft klein en bevindt zich met name in afgegraven delen van uiterwaarden.



Figuur 5.13 Huidige ecotooppotentie buitendijkse gebieden Gelderse Poort op basis van de voorjaarsgrondwaterstand (GVG)



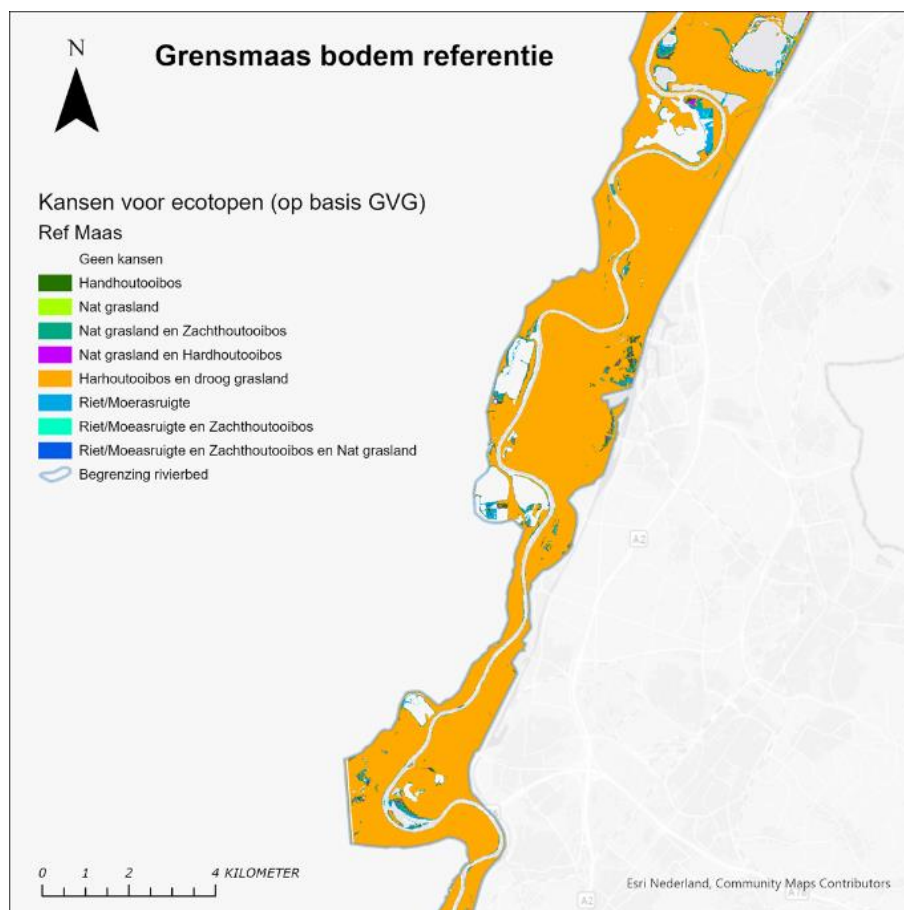
Figuur 5.14 Ecotooppotentie buitendijkse gebieden Gelderse Poort bij doorgaande erosie van het zomerbed in 2050, op basis van de voorjaarsgrondwaterstand (GVG)

Samenvattend leiden veranderingen in grondwaterstand door doorgaande rivierbodemerossie in de Gelderse Poort niet tot grote veranderingen in de (potentie voor) ecotopen. Het merendeel van de uiterwaarden in Gelderse Poort blijven ook in de toekomst geschikt voor hardhoutooibos en droog grasland. Dit neemt niet weg dat het kleine oppervlak van natte ecotopen in de Gelderse Poort wel duidelijk zal afnemen. Deze ecotopen zijn nu overigens vaak al te droog. Dit sluit aan bij de bevindingen van Van Geest (2020). Van Geest schreef dat in de Gelderse Poort sprake was van 'moerassen' terwijl de grondwaterstanden hier reeds in het voorjaar veel lager zijn dan in de moerassen in de IJssel-Vechtdelta en de gestuwde riviertrajecten, zoals de Nederrijn en Lek. Hij stelt dat dit waarschijnlijk grotendeels het gevolg is van voortgaande rivierinsnijding over de afgelopen decennia. De oorspronkelijke moerasvegetatie reageert hier vertraagd op; een soort als riet kan op verdroogde locaties namelijk lang standhouden. Van Geest merkt wel op dat deze terreindelen hun betekenis als moerasgebied (bijvoorbeeld als leefgebied voor kleine vis en amfibieën) merendeels verloren hebben, omdat er in het groeiseizoen geen water meer boven het maaiveld staat. De aanwezigheid deze ecotopen in de Gelderse Poort kunnen dus opgevat worden als een relict van een natter verleden.

De resultaten van deze studie zijn in overeenstemming met de resultaten van de PAGW-studie van Van Geest (2020) over de effecten van lage rivierpeilen op de vochttoestand van uiterwaarden langs de Rijn en Maas. Beide studies concluderen dat het overgrote deel van het oppervlak van de Gelderse Poort als 'droog' tot 'zeer droog' gekarakteriseerd kan worden. Dit geldt zowel voor de huidige situatie als voor de toekoms scenario's. Dit neemt niet weg dat het kleine oppervlak aan natte ecotopen wel duidelijk zal verminderen; dit resultaat wordt door beide studies onderschreven.

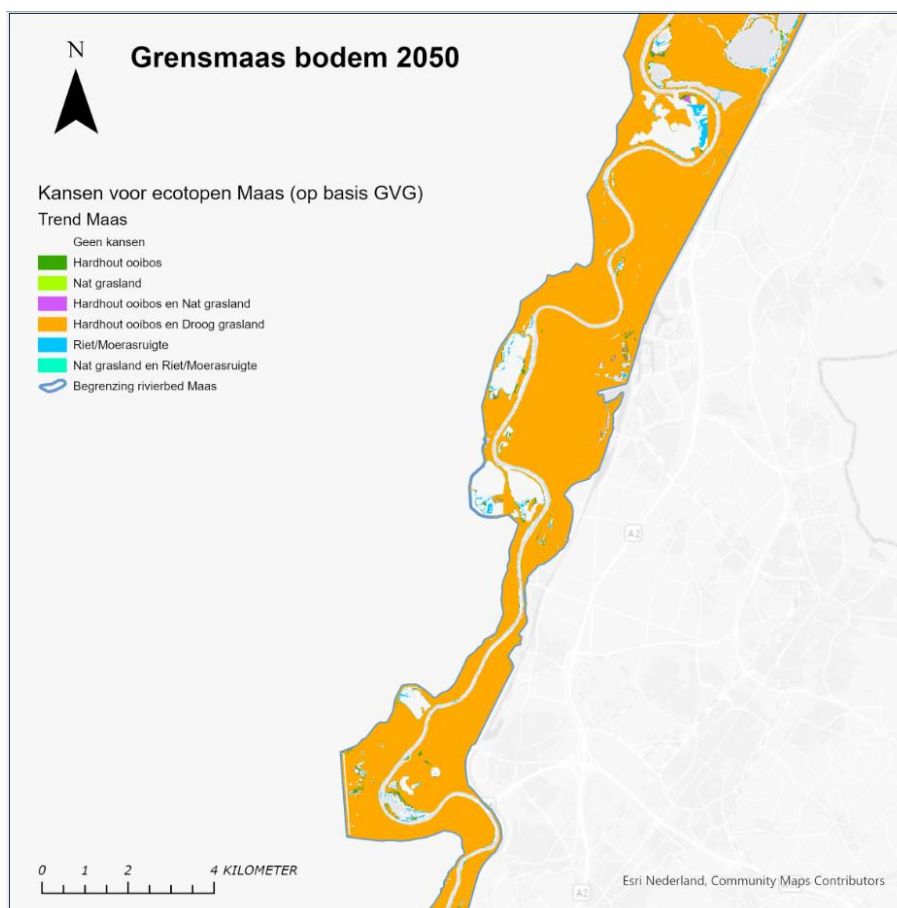
Het effect van klimaatverandering op grondwaterstanden en ecotooppotentie verschilt wel van het effect van rivierinsnijding. Klimaatverandering heeft vooral invloed op de laagste rivierstanden (die veelal aan het einde van het groeiseizoen optreden), terwijl rivierinsnijding de rivierstand gedurende het gehele jaar verlaagt, dus inclusief het voorjaar. Dit onderscheid is relevant, omdat voor bovenstroomse riviertrajecten vooral riviermoeras wordt nagestreefd; dit type moeras heeft hoge voorjaarsstanden, en valt in de loop van het groeiseizoen regelmatig droog (zie Zuidhof et al., 2017: Natuurverkenning Grote rivieren). Deze moerassen dienen in het voorjaar als paai- en opgroeigebied voor jonge vis en amfibieën. Deze functie wordt teniet gedaan door (te) lage voorjaarspeilen, die dus hoofdzakelijk het gevolg zijn van rivierinsnijding. De klimaatscenario's hebben hier veel minder invloed op, vanwege het geringe effect van deze scenario's op de voorjaarsrivierafvoeren en voorjaarspeilen. Weliswaar voorspellen de klimaatscenario's beduidend lagere najaarspeilen, maar omdat riviermoerassen al zijn aangepast aan tijdelijke droogval in de nazomer, heeft dit veel minder consequenties voor het ecologisch functioneren.

Samenvattend kan dus gesteld worden dat het overgrote deel van het oppervlak van de Gelderse Poort geschikt is en blijft voor droge ecotopen. Niettemin zal het kleine areaal van natte ecotopen dat nu nog aanwezig is, verder afnemen. Wanneer uitgegaan wordt van riviermoerassen (met hoge waterstanden in het voorjaar, en geregelde droogval tijdens het groeiseizoen), dan heeft (op dit kleine areaal) rivierinsnijding een veel groter effect dan de klimaatscenario's.



Figuur 5.15 Huidige ecotooppotentie Grensmaas op basis van gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG).

Figuur 5.15 toont de huidige ecotooppotentie langs de Grensmaas op basis van de GVG. Het gebied is vooral geschikt voor hardhouthooibos en droog grasland. Een aantal laag gelegen locaties, vaak grenzend aan open water, heeft een voldoende hoge GVG om nat grasland, riet/moerasruigte of zachthouthooibos mogelijk te maken. Ook bij doorgaande bodemerosie blijft dit gebied vooral geschikt voor de drogere ecotooptypen (Figuur 5.16).



Figuur 5.16 Ecotooppotentie Grensmaas bij doorgaande bodemerrosie in 2050, op basis van gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG).

5.3.5 Vergelijking met de PAGW

Arealen

Om te kijken in welke mate het nulalternatief van IRM bijdraagt aan de realisatie van de PAGW-opgave, zijn de resultaten van HABITAT vergeleken met de doelen van de PAGW. De PAGW onderscheidt meer ecotooptypen dan HABITAT, daarom zijn enkele typen samengevoegd (zie Tabel 5.2).

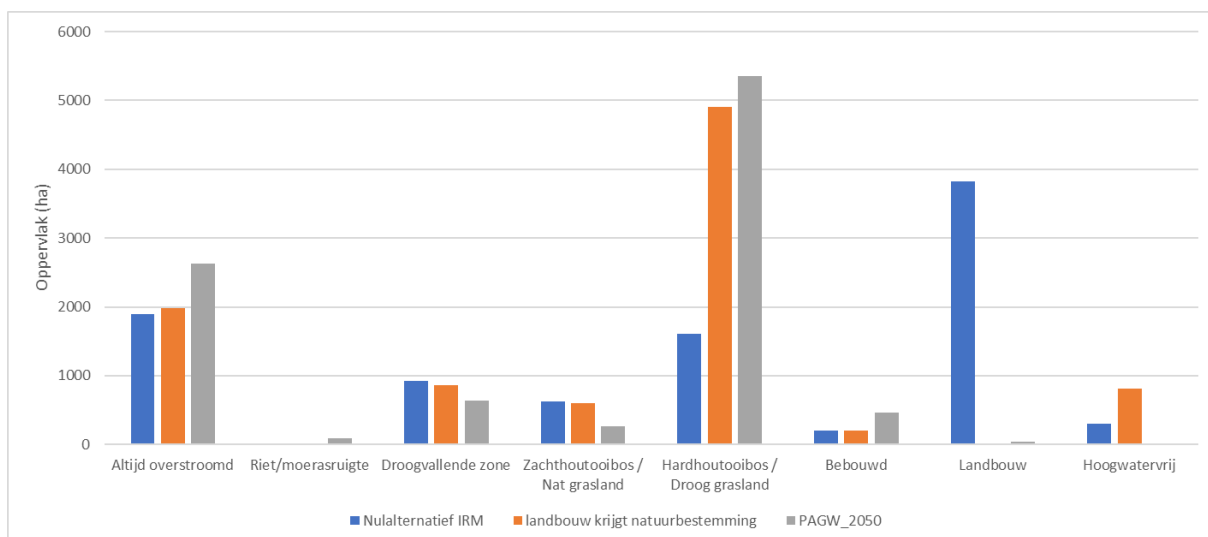
Tabel 5.3 geeft de resultaten voor het hele rivierengebied. Interpretatie van de resultaten wordt echter bemoeilijkt doordat de PAGW een groter gebied bestrijkt. De PAGW omvat namelijk ook de Biesbosch, de IJssel-Vechtdelta en een aantal binnendijkse gebieden in de Gelderse Poort. Deze maken geen deel uit van het HABITAT-model. Wat opvalt is dat het areaal Riet/moerasruigte, zachthoutooibos en natte graslanden groter is dan verwacht op basis van de ecotooppotentie berekend met HABITAT. Mogelijk heeft dit te maken met het vertraagde respons van de vegetatie op de peildaling die het gevolg is van voortschrijdende bodemerrosie (het 'naijl-effect' van vegetatie, zie hierboven; Van Geest, 2020). Voor deze 'natte' ecotopen is de huidige situatie al suboptimaal. Bij de drogere ecotopen (hardhoutooibos en droge graslanden) is het omgekeerde zichtbaar, namelijk dat het huidige areaal kleiner is dan op grond van potentie verwacht zou worden. Voor hardhoutooibossen kan dit deels het gevolg zijn van beheersmaatregelen (zoals 'Stroomlijn'). Met betrekking tot het realiseren van de PAGW opgave in 2050 valt op dat in het nulalternatief van IRM het landbouwareaal te groot is.

Dit komt doordat in het nulalternatief geen functieverandering is voorzien (van landbouw naar natuur). Verder valt op dat in het bovenrivierengebied bij het nulalternatief van IRM nauwelijks geschikte locaties zijn voor Riet/moerasruigte. Dit komt waarschijnlijk door de grote variatie in waterstand (zoals in onbekende uiterwaarden het geval is), in combinatie met het verdwijnen van de laatste restanten van riet en moerasruigte, door verdroging als gevolg van de voortgaande rivierinsnijding/bodemerosie (zie hierboven).

Tabel 5.3 Huidige en gewenste ecotoopverdeling PAGW vergeleken met de potentiële ecotoopverdeling volgens HABITAT voor het hele rivierengebied. (Het areaal van de PAGW is veel groter omdat daar ook de Biesbosch, de IJssel-Vechtdelta en het Rijnstrangengebied worden beschouwd)

	Huidige situatie				Situatie 2050			
	2018 (oppervlak in ha)		2018 (% van totaal)		2050 (oppervlak in ha)		2050 (% van totaal)	
Ecotoop	Potentie volgens Habitat	Van der Sluis et al. (2020)	Potentie volgens Habitat	Van der Sluis et al. (2020)	Potentie volgens Habitat	Opgave PAGW	Potentie volgens Habitat	Opgave PAGW
Altijd overstroomd	17027	33939	23%	30%	17002	34078	23%	30%
Helofytenzone, Riet/moerasruigte	31	5859	0%	5%	73	11415	0%	10%
Droogvallende zone	2704	1100	4%	1%	3045	2031	4%	2%
Zachthoutzone en nat grasland	2053	8038	3%	7%	2458	4643	3%	4%
Hardhoutzone en droog grasland	14652	10153	19%	9%	13890	29820	18%	26%
Bebouwd	3514	7079	5%	6%	3514	6695	5%	6%
Landbouw	35196	47644	47%	42%	35196	25487	47%	22%
	75176	113812			75177	114169		

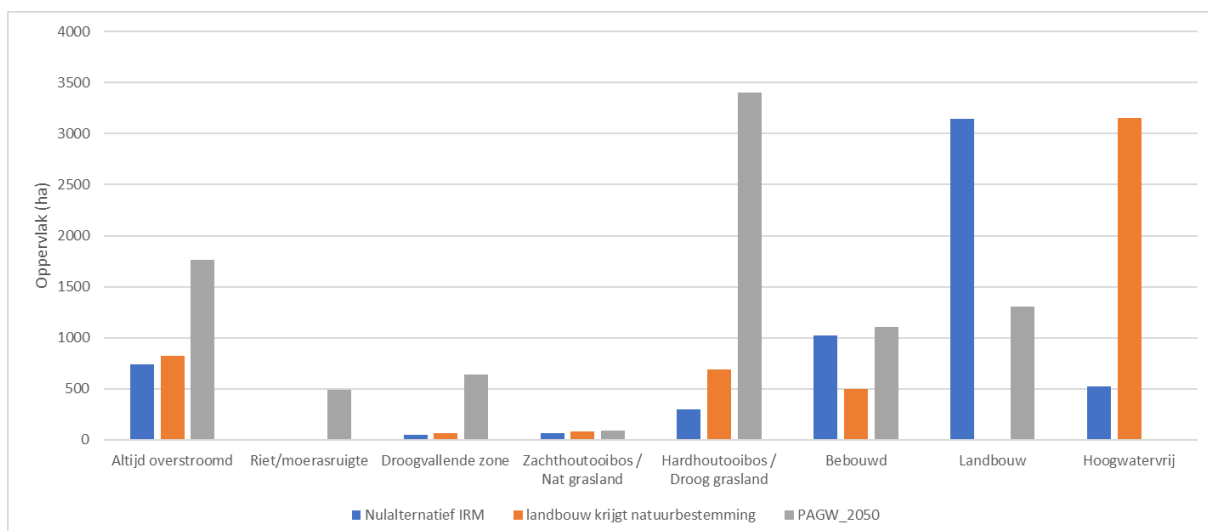
Om de problemen van verschillen in beschouwd areaal tussen IRM en PAGW te omzeilen is een aparte analyse uitgevoerd voor de buitendijkse gebieden in de Gelderse poort en de Grensmaas. Figuur 5.17 toont de resultaten voor de buitendijkse gebieden in de Gelderse Poort (de binnendijkse gebieden zitten niet in het HABITAT-model). De grijze balken tonen de arealen conform de PAGW-opgave. De blauwe balken tonen de potentiële arealen van de verschillende ecotooptypen bij het nulalternatief van IRM. Zoals hiervoor al is opgemerkt ontbreekt Riet/moerasruigte bij het nulalternatief IRM. De buitendijkse gebieden in de Gelderse Poort zijn hier te droog voor en/of de dynamiek (variatie in waterstanden) is te groot. Daarnaast is het areaal hardhoutooibos/droog grasland in het nulalternatief veel kleiner dan beoogd in de PAGW (vergelijk de grijze en de blauwe balk). Wanneer zou worden besloten om landbouwgrond een natuurfunctie te geven, dan kan wel aan de opgave voor hardhoutooibos worden voldaan. **Dit laatste is echter niet voorzien binnen het nulalternatief IRM.**



Figuur 5.17 Potentiële ecotoopverdeling berekend met HABITAT in de buitendijkse gebieden van de Gelderse Poort bij het nulalternatief IRM, een variant waarbij landbouwgrond een natuurbestemming krijgt en de verdeling vanuit de systeemopgave PAGW

De vergelijking tussen potentiële ecotoopverdeling bij het nulalternatief IRM en de PAGW-doelen is alleen gemaakt op basis van de overstromingsduur. Wanneer deze vergelijking ook zou worden gemaakt op basis van de potentiële ecotoopverdeling op basis van grondwaterstanden, dan zal het areaal hardhoutooibos en droog grasland nog groter zijn ten koste van de nattere ecotopen. Met andere woorden: wanneer de overstromingsduur als dominante factor wordt beschouwd, dan zijn de natuurgebieden in de Gelderse Poort geschikt om het beoogde areaal zachthoutooibos en nat grasland te realiseren. Echter, wanneer de grondwaterstanden worden beschouwd, dan zakken deze in het voorjaar op de meeste plaatsen te ver uit voor deze natte ecotooptypen.

Figuur 5.18 toont de resultaten voor de Grensmaas. Het valt op dat de hydrologische omstandigheden slecht zijn voor Riet/moerasruigte. Ook de ecotooptypen droogvallende zone, zachthoutooibos/ nat grasland en hardhoutooibos hebben nauwelijks potentie. Hoewel natuurinclusiefbeheer van landbouwgebieden geen deel uit maakt van het nulalternatief IRM is toch gekeken in hoeverre de doelen uit de PAGW dan wel gehaald zouden kunnen worden. In tegenstelling tot de Gelderse Poort, levert dat langs de Grensmaas vooral hoogwatervrije gebieden op. Er kan hier wel natuur ontstaan, maar geen riviernatuur. Daarvoor overstromen de gebieden onvoldoende vaak (minder dan twee dagen per jaar).



Figuur 5.18 Potentiële ecotoopverdeling langs de Grensmaas (berekend met HABITAT) bij het nulalternatief IRM, een variant waarbij landbouwgrond een natuurbestemming krijgt en de verdeling vanuit de systeemopgave PAGW

Wanneer deze vergelijking zou worden uitgevoerd op basis van de berekende grondwaterstanden, dan zou dat een vergelijkbaar beeld opleveren. De weerden langs de Grensmaas zijn vooral geschikt voor de drogere ecotooptypen.

5.3.6

Dynamiek, connectiviteit en (interne) habitatdiversiteit

Dynamiek – als belangrijkste factor van milieukwaliteit voor riviernatuur –, connectiviteit en (interne) habitat- of milieudiversiteit zijn sleutelfactoren voor natuurherstel in de PAGW. In deze paragraaf geven we kort aan hoe deze factoren tussen nu en 2050 veranderen.

Dynamiek

Een gebrek aan overstromingsdynamiek is vooral langs de Maas een probleem. De afvoercapaciteit van het zomerbed is zo groot dat de uiterwaarden vrijwel niet overstromen. Door verdergaande erosie van het zomerbed zal de dynamiek verder afnemen. Daar staat echter tegenover dat door het effect van klimaatverandering op het afvoerregime de dynamiek zal toenemen (de kans op hoogwater neemt toe). De verwachting is dat (bij de hier gebruikte scenario's) het netto effect op de overstromingsdynamiek gering zal zijn.

De vrij afstromende Rijntakken (Waal en IJssel) kennen een grotere, maar eveneens weinig natuurlijke dynamiek. Door de bedijking en opslibbende uiterwaarden zijn de hoogwaterstanden steeds hoger geworden, terwijl de laagwaterstanden door rivierbodemerisatie steeds verder omlaag zijn gegaan. Dit geldt met name voor de bovenstroomse trajecten. Vooral op de Waal is het verschil tussen de waterstanden bij lage en hoge rivierafvoer zeer groot (zie ook Klijn et al., 2022), waardoor tijdens de infrequente overstromingen de uiterwaarden geheel en diep onder water komen te staan. Bij het nulalternatief IRM zal dit als gevolg van doorgaande bodemerisatie en klimaatverandering nog worden versterkt.

Verwacht wordt dat de hydrodynamiek op de Nederrijn-Lek bij het nulalternatief IRM iets af zal nemen ten opzichte van de huidige situatie. De zomerbederosie op Waal en IJssel heeft immers tot gevolg dat de stuwen pas bij nog hogere rivierafvoeren gestreken worden (zie hoofdstuk 4.3.2.1).

Bij dynamiek kan ook gedacht worden aan morfodynamiek. Klimaatverandering kan resulteren in meer morfodynamiek: omdat de kans op hoogwater toeneemt, zal er vaker sedimentatie plaatsvinden op de uiterwaarden. Doordat de uiterwaarden echter hoog liggen ten opzichte van het zomerbed – en ze door rivierbodemerose op de Rijntakken en de Grensmaas relatief nog hoger komen te liggen – zal er vooral sprake zijn van sedimentatie van fijn sediment (klei en silt). Zomerkades zijn ook nadelig voor de uitwisseling van sediment tussen hoofdgeul en uiterwaarden. In het nulalternatief van IRM zijn geen maatregelen voorzien die de morfodynamiek zullen vergroten.

Connectiviteit

Het begrip connectiviteit heeft betrekking op de ruimtelijke samenhang tussen natuurgebieden, belangrijk voor de dispersie van soorten of om functiegebieden te verbinden (vistrek, paaihabitat, fourageergebied). Dit kan in de lengte van de rivier zijn, maar ook dwars op de rivier (verbinding tussen uiterwaarden en het zomerbed van de rivier, en tussen buitendijks en binnendijks).

In de Maas en de Nederrijn-Lek vormen de stuwen een belangrijk obstakel voor aquatische organismen. In het nulalternatief van IRM blijft dit zo. Doorgaande bodemerose op de bovenloop van de Rijntakken en de Grensmaas zorgt er voor dat de connectiviteit tussen de uiterwaarden en het zomerbed verder afneemt. Ook zal de doorstroming van nevengeulen op steeds meer locaties een probleem worden.

Interne habitat- of milieudiversiteit

Een diversiteit aan milieus vormt de basis voor biotische diversiteit. Het vergroot tevens de overlevingskansen voor dieren door bijvoorbeeld nabije hoogwatervluchtplaatsen. De milieudiversiteit wordt vergroot wanneer het reliëf binnen de uiterwaarden wordt vergroot, want dat resulteert in grotere verschillen aan overstromingsduren, stroomsnelheden en waterdieptes, maar ook grondwaterstanden. In bestaande natuurgebieden langs de Rijntakken is sprake van relatief grote variaties in overstromingsduren. Dit komt de diversiteit ten goede. Echter, de rivierbodemerose van de afgelopen decennia heeft er toe geleid dat de grondwaterstanden over grote trajecten langs de Rijntakken erg diep zijn. Dit is nadelig voor de diversiteit, want zo wordt alles relatief droog.

Langs de gestuwde Maas is de diversiteit aan leefmilieus nog beperkter. Het gestuwde karakter van de rivier en de hooggelegen uiterwaarden betekenen dat we relatief grote homogene gebieden zien die vooral geschikt zijn voor drogere ecotootypen.

In het nulalternatief IRM is een aantal rivierverruimingsmaatregelen voorzien, waaronder Stadsblokken Meinerswijk en Rivierklimaatpark IJsselpoort langs de Rijntakken en Meanderende Maas langs de Maas. Het gedeeltelijk vergraven van uiterwaarden zorgt ervoor dat de diversiteit op deze locaties toeneemt.

5.3.7

Waterkwaliteit

De waterkwaliteit wordt vooral bepaald door de hoeveelheid water die wordt aangevoerd, de verblijftijd van het water en lozingen. Door het Deltaprogramma Zoetwater is onderzocht dat bij het Stoom-scenario in 2050 meer waterkwaliteitsproblemen te verwachten zijn, met name op de Maas (in mindere mate ook op de Rijn). Problemen met de waterkwaliteit nemen toe doordat de aanvoer van water in de zomer afneemt.

Dit leidt tot 'indikking', ofwel hogere concentraties vervuilende stoffen, onder andere als gevolg van lozingen. De lagere rivierafvoeren in de zomer leiden naar verwachting tot een toename van de verblijftijd, wat weer kan leiden tot hogere watertemperaturen. Dit effect wordt versterkt doordat ook de gemiddelde luchttemperatuur toeneemt. Hogere temperaturen zullen naar verwachting ook leiden tot een toename van de waterkwaliteitsproblemen. Omdat de maatregelen die worden overwogen in IRM (vergroting van de afvoercapaciteit en verandering van de rivierbodempligging) geen invloed hebben op de waterkwaliteit op de bovenloop van de Maas en de Rijn in Nederland, wordt hier in dit rapport niet dieper op in gegaan. In de benedenloop van de rivieren speelt verzilting een rol. Dit wordt behandeld bij de effectbepaling voor zoetwaterbeschikbaarheid.

5.3.8 Aanvullende bevindingen BRL

Met het BRL-instrumentarium is gekeken naar de doorstroming van bestaande nevengeulen. Voor de connectiviteit en doorstroming van nevengeulen gaat de BRL uit van eisen die gesteld worden vanuit de KRW. Daarin wordt gesteld dat nevengeulen gemiddeld tenminste 335 dagen per jaar mee moeten stromen. Voor strangen geldt een eis van watervoerendheid van 225 dagen per jaar.

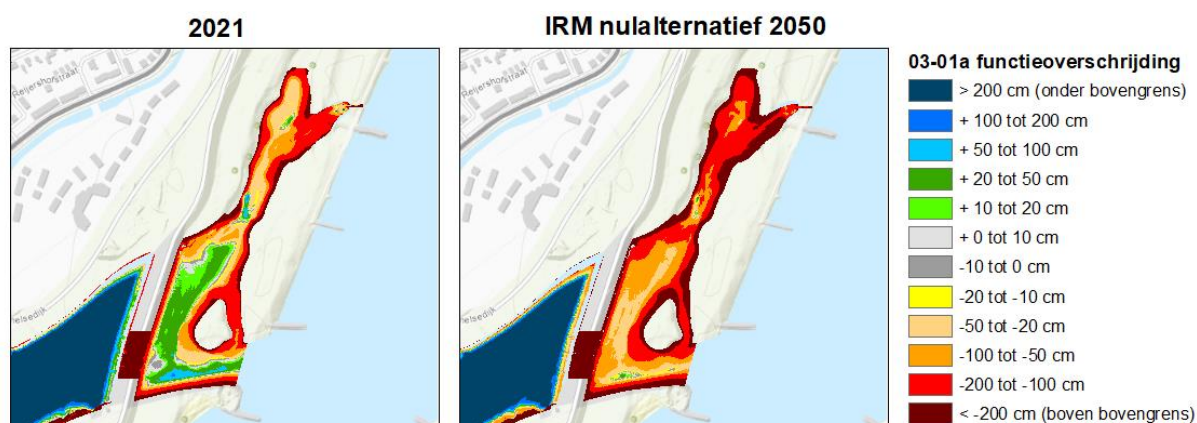
Figuur 5.19 toont een foto van het instroompunt van de nevengeul bij Lent (de Spiegelwaal). De foto is genomen door Waterschap Rivierenland tijdens de periode met lage afvoeren in 2018.



Figuur 5.19 Het instroompunt van de nevengeul bij Lent. Foto genomen door Waterschap Rivierenland in 2018.

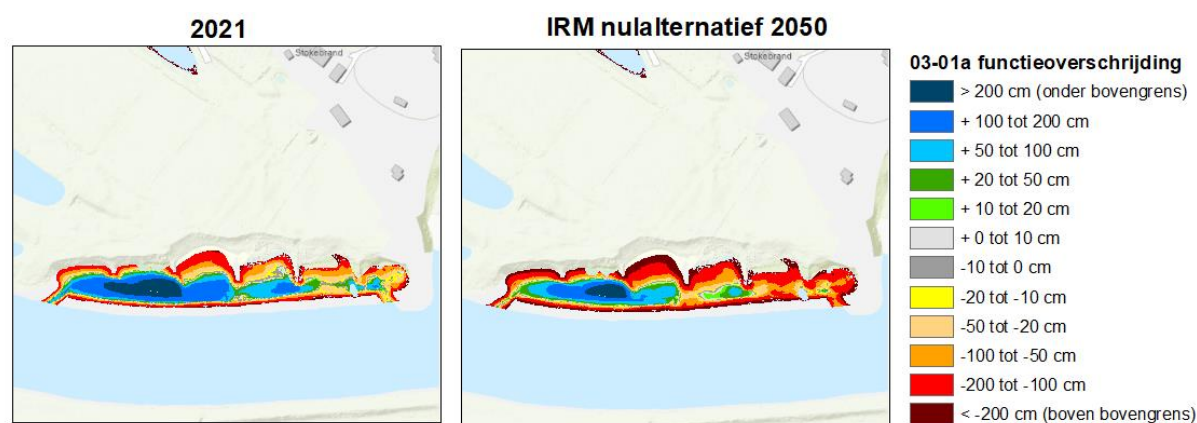
Figuur 5.20 toont in welke mate het instroompunt van de geul bij Lent aan de gestelde eisen voldoet⁹. De blauwe en groene tinten duiden op voldoende waterdiepte. Oranje en rode tinten geven aan dat de instroming belemmerd wordt doordat deze locaties te vaak droogvallen. De linker figuur toont de huidige situatie. De randen van het gebied vallen vaak droog, maar de duiker bij de inlaat van de geul staat voldoende vaak in verbinding met de Waal om aan de vereiste doorstroming te voldoen. Het rechter plaatje toont de situatie volgens het nulalternatief IRM in 2050. Hieruit blijkt dat de instroming van de geul niet aan de gestelde eisen voldoet. De waterstanden op de Waal zijn te laag.

⁹ Met gestelde eis doelen we op de eis die vanuit de KRW wordt gesteld aan nevengeulen. Het is niet zeker dat deze eis ook geldt voor de geul bij Lent. Mogelijk is bij het ontwerp aangenomen dat de geul bij lage afvoeren alleen via de benedenstroomse opening in verbinding staat met de Waal.

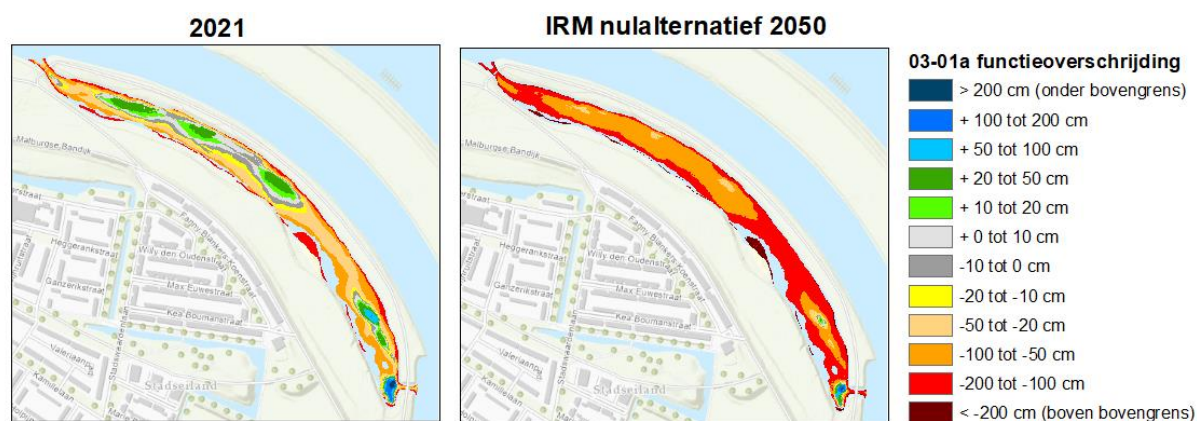


Figuur 5.20 Beperkingen connectiviteit instroompunt nevengeul Lent

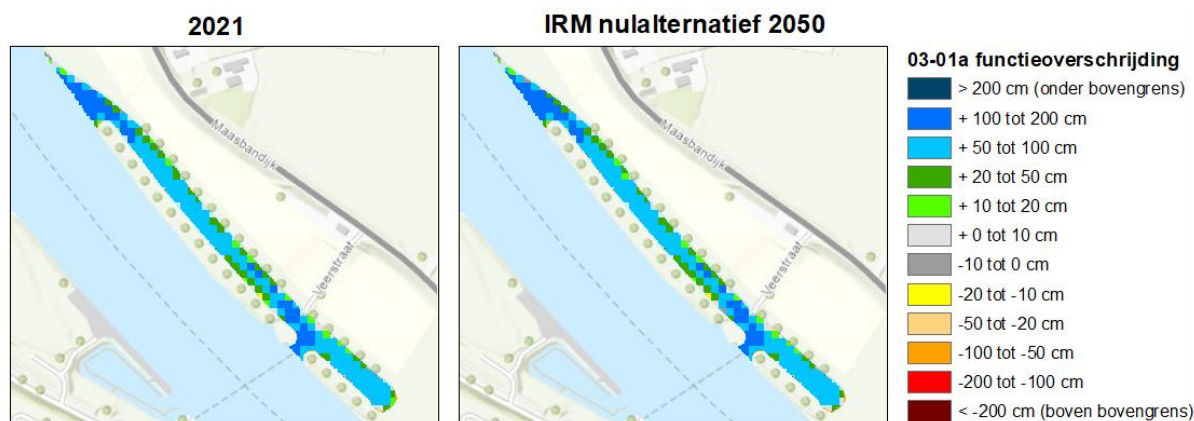
Het beeld dat de connectiviteit van nevengeulen op dit moment nog net aan de eisen voldoet maar bij het nulalternatief in 2050 niet meer, zien we op meer plaatsen. Figuur 5.21 toont de resultaten voor een nevengeul bij Zutphen en Figuur 5.22 die voor een nevengeul bij Arnhem. Er zijn echter ook nevengeulen waar de watervoerendheid ook in 2050 aan de eisen blijft voldoen, zie bijvoorbeeld de nevengeul bij Niftrik in Figuur 5.23. Bij deze geul komt dat mede doordat deze zich bevindt in een gestuwd traject.



Figuur 5.21 Beperkingen connectiviteit instroompunt nevengeul Stokebrandsweerd, Zutphen

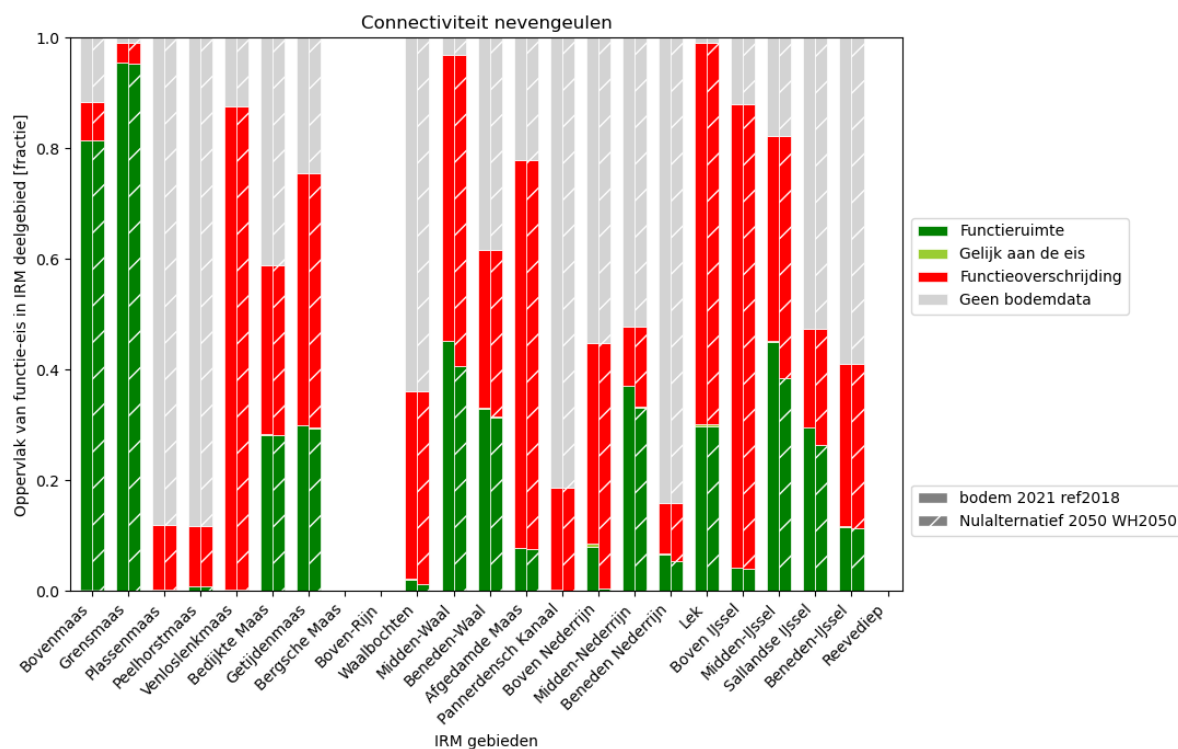


Figuur 5.22 Beperkingen connectiviteit instroompunt nevengeul 'Bakenhof', Arnhem



Figuur 5.23 Beperkingen connectiviteit instroompunt nevengeul bij Niftrik

Een samenvattend overzicht wordt gegeven in Figuur 5.24. Deze figuur toont per IRM traject de fractie van de nevengeulen die niet aan de gestelde doorstromingseis voldoet. De oranje kleur geeft aan dat de BRL voor een groot aantal geulen onvoldoende gegevens heeft om deze analyse uit te voeren. De groene balkjes tonen aan welk deel van de geulen voldoende doorstroomt en met rood is te zien welk deel van de geulen niet aan deze eis voldoet. Uit de figuur blijkt dat de doorstroming van nevengeulen nu op veel trajecten al een probleem vormt. Dit is onder meer het geval langs de Venloslenk, de Waalbochten en de Boven IJssel. Er zijn ook trajecten waar de situatie gunstiger is. Dit is onder meer het geval langs de Bovenmaas en de Grensmaas. Over het algemeen wordt de doorstroming bij het nulalternatief IRM in 2050 slechter.



Figuur 5.24 Deel van de nevengeulen per IRM traject dat nu en bij het nulalternatief IRM in 2050 niet aan de gestelde doorstromingseis voldoet

5.4 Conclusies

Welk type (rivier)natuur nu of in de toekomst kan ontstaan is onder meer afhankelijk van de overstromingsduren en de grondwaterstanden:

- Uiterwaarden met een natuurfunctie waar zomerkades doorgestoken of verwijderd zijn, staan langs de Rijntakken gemiddeld enkele tot enkele tientallen dagen per jaar onder water. Klimaatverandering volgens het scenario W_{Hdry} zorgt voor een zeer kleine toename van de overstromingsduur. Doorgaande rivierbodemerrosie kan lokaal resulteren in een beperkte afname van de overstromingsduur. De netto verschillen in overstromingsduur tussen het nulalternatief IRM en de huidige situatie zijn klein. De belangrijkste verschillen in overstromingsduur worden veroorzaakt door lokale gebiedsontwikkelingen in de uiterwaarden; vergravingen laten een grote toename van de overstromingsduur zien.
- Langs de Maas overstroomden veel uiterwaarden op dit moment minder dan 2 dagen per jaar. Een veranderend klimaat en doorgaande rivierbodemerrosie hebben hier weinig invloed op: de gemiddelde overstromingsduur blijft op veel plaatsen minder dan 2 dagen per jaar.
- De doorgaande rivierbodemerrosie zorgt voor een daling van de grondwaterstanden. Langs de Rijntakken bedraagt de daling in zichtjaar 2050 maximaal ongeveer 20 cm in het splitsingspuntengebied. Langs de Maas dalen de grondwaterstanden met maximaal 10 cm op de Grensmaas.
- Klimaatverandering leidt tot (veelal maximaal 10 cm) hogere grondwaterstanden in de winter (GHG). Dit komt doordat de kans op hoogwater in de wintermaanden toeneemt. Door klimaatverandering (scenario W_{Hdry}) zullen de grondwaterstanden in 2050 in de zomer verder uitzakken (lagere GLG). Ofwel: door klimaatverandering nemen de lage grondwaterstanden aan het einde van de zomer nog verder af. Langs de Rijntakken en de Grensmaas kan de grondwaterstand dan lokaal wel 25 à 50 cm lager zijn. Dit is het gevolg van vaker voorkomende en langdurigere periodes met lage afvoeren. Klimaatverandering heeft weinig effect op de voorjaarsgrondwaterstanden (GVG). Deze worden vooral beïnvloed door rivierbodemerrosie.
- Op basis van overstromingsduren wordt geconcludeerd dat de uiterwaarden langs de Rijntakken *in potentie* geschikt zijn voor zachthout- en hardhoutooibos en, afhankelijk van het beheer, ook voor nat en droog grasland. De uiterwaarden langs de Maas liggen veelal te hoog, waardoor ze nauwelijks overstroomden. Hier zal dus vooral sprake zijn van 'natuur langs de rivier', maar niet van riviernatuur.
- Het effect van veranderingen in overstromingsduren (als gevolg van klimaatverandering en/of verandering in rivierbodempligging) op de potentiële ecotoopverdeling is beperkt. Dit geldt voor zowel de Rijntakken als de Maas.
- Op basis van de nu beschikbare grondwaterstandsregels, zijn de uiterwaarden langs de Rijn en de Maas vooral geschikt voor droog grasland en hardhoutooibos. Op basis van de voorjaarsgrondwaterstanden (GVG) kan in vergraven uiterwaarden lokaal ook zachthoutooibos of nat grasland voorkomen. De oppervlaktes zijn echter zeer beperkt.
- Veranderingen in grondwaterstand door doorgaande rivierbodemerrosie hebben nauwelijks effect op de ecotooppotentie: de uiterwaarden zijn ook in de toekomst vooral geschikt voor hardhoutooibos en droog grasland (ze zijn nu al te droog voor veel natte ecotopen en dat wordt in de toekomst nog erger). Opgemerkt wordt dat de nu beschikbare regels onderling niet consistent zijn. Vervolgstudies zijn nodig om dit te verbeteren.

- Vergelijking van de gewenste ecotoopverdeling volgens de PAGW met de potentiële ecotoopverdeling berekend met HABITAT (uitgaande van eisen voor overstromingsduur) laat zien dat de doelen van de PAGW langs de Rijntakken niet worden gehaald, vooral omdat het landbouwareaal te groot is. Langs de Maas is het landbouwareaal eveneens te groot, maar overstromen de uiterwaarden ook onvoldoende vaak om hardhout- en zachthoutoibos te realiseren. Wanneer de grondwaterstanden als meest bepalend worden gezien, dan zijn zowel langs de Rijntakken als de Maas uiterwaardvergravingen nodig om de beoogde arealen natte ecotooptypen te behalen.
- Met behulp van de BRL is de doorstroming van bestaande nevengeulen onderzocht. Op veel IRM-trajecten stromen nevengeulen nu al onvoldoende vaak mee. Dit is onder meer het geval langs de Venloslenk-Maas, de Waalbochten en de Boven-IJssel. Over het algemeen wordt in de vrij-afstromende rivieren de doorstroming van nevengeulen bij het nulalternatief IRM in 2050 slechter. Dit komt door klimaatverandering, maar wordt verergerd door doorgaande rivierbodemerossie.

6 Effectbepaling zoetwaterbeschikbaarheid

6.1 Inleiding

De grote rivieren vormen tijdens droge zomers een belangrijke bron van zoetwater voor een groot deel van Nederland. In Noord-Nederland worden de zoetwaterbuffers Markermeer en IJsselmeer aangevuld door de IJssel. Van daaruit wordt water aangevoerd naar de peilbeheerste gebieden van Noord-Holland, Friesland, Groningen, Drenthe en Flevoland. Dit water is daar vooral nodig voor peilbeheer, doorspoeling en beregening. Ook is een minimum spuidebiet nodig om zoutindringing via de sluizen in de Afsluitdijk tegen te gaan. Bodemerosie op de Waal zorgt voor een verandering van de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn bij lage rivierafvoer, waardoor de afvoer door de IJssel afneemt. Klimaatverandering (scenario W_{dry}) zorgt voor een algehele afname van de hoeveelheid water die in de zomer via de Rijn en de Maas Nederland binnenkomt.

In West-Nederland zorgt de aanvoer vanuit de rivieren voor een tegendruk om zoutindringing vanuit de Noordzee te beperken. Tijdens langdurig lage afvoer zullen inlaten langs de Nieuwe Maas, Hollandsche IJssel en de Lek gesloten moeten worden. Voor de aanvoer naar West-Nederland is dan een alternatieve voorziening ingericht: de Klimaatbestendige Wateraanvoervoorziening West-Nederland (KWA). Het 'zoet houden van de Lek' is een maatregel in het Deltaplan 2021. Het houdt in dat de zoutconcentraties in de monding van de Lek gemonitord worden en als deze dreigen op te lopen kan met stuw Hagestein een groter debiet worden door gelaten. Dit zorgt voor de benodigde tegendruk om zoutverspreiding stroomopwaarts tegen te gaan. De verwachting is dat het bovenstroomse deel van de Lek hiermee voldoende zoet blijft. Bodemerosie op de Waal zorgt voor een veranderde afvoerverdeling over de Rijntakken, waardoor de Waalafvoer tijdens lage-afvoerperiodes toeneemt. Dit heeft mogelijk een klein positief effect op het tegengaan van de zoutindringing. Tegelijkertijd neemt de afvoer over de Nederrijn/Lek af, waardoor er meer water voor West-Nederland moet worden aangevoerd vanuit de Waal via het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK).

Tot slot zijn er talloze inlaatpunten vanuit de grote rivieren, voor regionale watervoorziening maar ook voor drinkwater en industrie. De waterstanden in de grote rivieren zijn daarin bepalend voor de inlaatcapaciteit, hoewel sommige grotere inlaten zijn voorzien van pompen. Ondanks dat kunnen te lage rivierwaterstanden ervoor zorgen dat de opvoerhoogte beperkend wordt voor de inlaatcapaciteit, zoals het geval is bij inlaat Eefde naar de Twentekanalen.

In dit hoofdstuk worden de effecten van veranderingen in rivierbodempligging, klimaatverandering en sociaal-economische ontwikkelingen op de zoetwaterbeschikbaarheid gekwantificeerd.

6.2 Methode

De volgende indicatoren zijn beschouwd per regio:

Noord-Nederland:

- Buffergebruik IJsselmeer
- Watertoevoer Twentekanalen
- Frequentieverdeling watertekort

West- en Midden-Nederland:

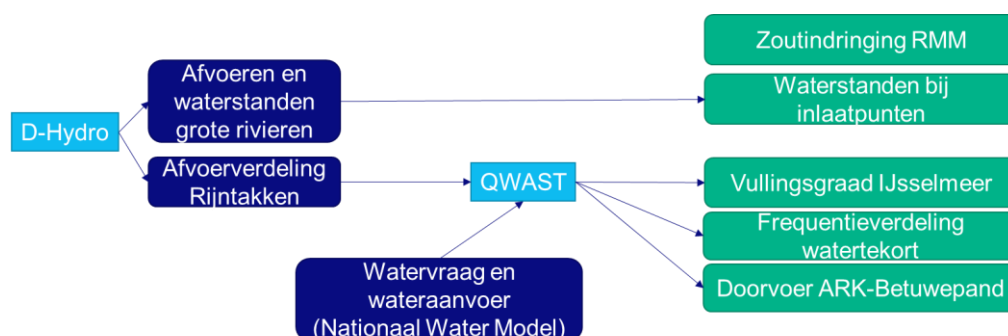
- Doorvoer ARK-Betuwepand
- Zoutindringing Rijn-Maasmonding
- Frequentieverdeling watertekort

Grote rivieren:

- Waterstanden bij inlaatpunten

De indicatoren zijn gekwantificeerd voor de huidige situatie (Ref), de situatie met een veranderde rivierbodempligging en de situatie volgens Deltascenario Stoom2050.

In het schema in Figuur 6.1 is weergegeven welke instrumenten zijn gebruikt om de indicatoren te berekenen. Met D-HYDRO is het effect van een veranderende rivierbodempligging op de rivierwaterstanden en de afvoerverdeling in 2D doorgerekend (zie Hoofdstuk 4). Op basis daarvan zijn QH-relaties afgeleid en is de afvoerverdeling op de Rijntakken bepaald. Die afvoerverdeling vormt invoer voor QWAST (Horváth en Mens, 2020), een instrument dat is ontwikkeld voor DPZW om een snelle beoordeling te kunnen maken van de effecten van maatregelpakketten op de zoetwaterbeschikbaarheid. In QWAST zitten verder de watervragen die eerder met het Nationaal WaterModel voor DPZW zijn berekend (Mens et al., 2021). De QH relaties uit Hoofdstuk 4 zijn gebruikt om bij bepaalde inlaatpunten langs Waal en IJssel de kans op overschrijding van drempelwaarden te bepalen.

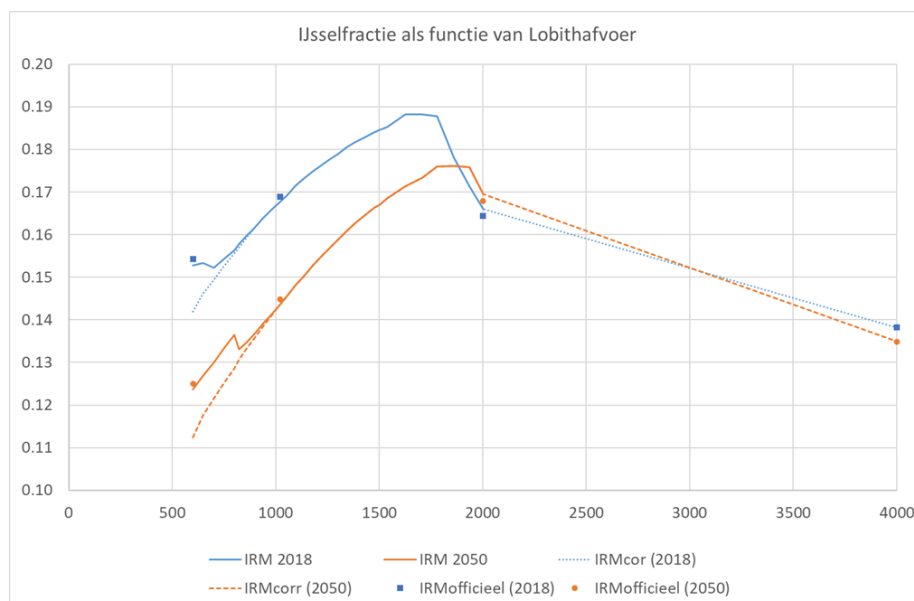


Figuur 6.1 Schematische weergave methode effectbepaling zoetwaterbeschikbaarheid

De belangrijkste aannames voor de QWAST-berekening worden hier voor een goed begrip nog een keer herhaald:

- Het Voorkeurspakket DPZW 2021 (Rijksoverheid, 2021) is uitgevoerd, dit betreft:
 - Doorvoer Krimpenerwaard: een aanvoerroute waarmee extra water vanuit de Lek naar West-Nederland kan worden aangevoerd,
 - Vergroot debiet Hagestein ten behoeve van het zoet houden van de Lek.
- De doorspoelvraag Afsluitdijk is ingesteld op 40 m³/s met een hoge prioriteit ¹⁰. Hiermee wordt aangenomen dat de voorgenen zoutbeperkende maatregelen bij Den Oever (Rijksoverheid, 2021) zijn uitgevoerd.
- Voor Stoom2050 is een extra variant 'hoog' gedefinieerd waarin wordt aangenomen dat maximaal wordt ingezet op het nathouden van veenweidegebieden. Dat veenweidegebieden moeten bijdragen aan het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen met 1 Mton is vastgelegd in het Klimaatakkoord van Parijs. De maatregelen zijn echter nog niet voldoende uitgewerkt om als 'voorgenomen beleid' mee te nemen in de berekening. Wel is bekend dat de veenweidestrategieën hoe dan ook zullen leiden tot een grotere watervraag voor regionaal peilbeheer in veengebieden door slootpeilopzet en infiltratiemaatregelen (zoals onderwaterdrainage, drukdrainage of greppelinfiltratie) (Hunink et al., 2022). In de variant 'hoog' doen we een conservatieve aanname voor de grotere watervraag voor peilbeheer, afgeleid uit eerdere berekeningen met het Nationaal WaterModel.
- De voorspelhorizon is ingesteld op 1 maand.
- De afvoerverdeling, afgeleid uit de semi-stationaire D-HYDRO berekeningen, is weergegeven in Figuur 6.2 ('IRMofficieel'). Hierop is nog een handmatige correctie uitgevoerd:
 - Bij zeer lage afvoeren wordt stuw Driel gestreken. De afvoer over de Nederrijn wordt dan lager dan 20 m³/s, omdat stuw Amerongen geen functie heeft (noch in werkelijkheid noch in het model) om de afvoerverdeling te reguleren, en in deze simulaties geen lateralen zijn meegenomen. Dat de Nederrijn-afvoer afneemt naar 0 m³/s wordt niet plausibel geacht.
 - Er is daarom een handmatige correctie gedaan: bij Nederrijn-afvoeren lager dan 20 m³/s wordt deze opgehoogd naar 20 m³/s. Dit gaat voor 1/3 ten koste van de IJsselaafvoer en voor 2/3 ten koste van de Waalafvoer. ('IRMcor' in de figuur).
 - Voor afvoeren tussen 2.000 en 4.000 m³/s is lineair geïnterpoleerd. Dit afvoerbereik is nodig als invoer voor QWAST, maar heeft weinig invloed op de watertekortberekening.

¹⁰ In QWAST is op dit moment ingesteld dat altijd 40 m³/s geleverd wordt om de sluizen in de Afsluitdijk 'door te spoelen', dus met een hoge prioriteit. In QWAST is de verdamping van de meren zelf echter toegekend aan een aantal modeltakken, waaronder de tak 'IJsselmeer_uit'. Een deel van die opgelegde 40 m³/s gaat daardoor verloren aan verdamping. In de vervolganalyse is het wenselijk om deze instelling aan te passen, zodat 40 m³/s overblijft voor doorspoeling, maar dan wel met een iets lagere prioriteit conform eerdere berekeningen met het Nationaal Water Model voor DPZW.



Figuur 6.2 Fractie van de afvoer bij Lobith die wordt afgevoerd via de IJssel. De jaartallen duiden op de bodemligging (situatie in 2018 of 2050). IRMofficieel refereert aan de D-Hydro berekeningen, die voor de toepassing met QWAST zijn gecorrigeerd om te voorkomen dat de Nederrijn-afvoer lager wordt dan 20 m³/s ('IRMcor').

Uit eerdere analyses voor het Deltaprogramma Zoetwater (Mens et al., 2020) is gebleken dat droogte en lage afvoeren op de Maas consequenties kunnen hebben voor zoetwatervoorziening, scheepvaart en natuur. Door lage Maasafvoeren kunnen bijvoorbeeld tekorten ontstaan in de aanvoer naar Noord-Brabant via inlaatpunten Panheel en Loozen. Dit heeft consequenties voor natuur en landbouw (tekorten voor peilbeheer en beregening). Door indikking leiden langdurig lage afvoeren op de Maas bovendien tot slechtere waterkwaliteit, met consequenties voor industrie en drinkwater langs de Maas. In de Grensmaas leiden lage afvoeren tot negatieve effecten op de natuur (te geringe *environmental flow*). In het Julianakanaal zijn lage afvoeren beperkend voor de scheepvaart, omdat er zuiniger geschut moet worden en de wachttijden daardoor oplopen (zie ook Hoofdstuk 7).

Droogte en lage afvoeren hebben op de Maas dus mogelijk grote maatschappelijke gevolgen. Bodemerosie en de mogelijke maatregelen die IRM gaat verkennen (ingrepen in rivierbodemplugging en vergroting van de afvoercapaciteit met rivierverruiming) veranderen dit beeld echter niet. Dit komt omdat de zoetwaterproblemen te maken hebben met de rivierafvoer die Nederland vanuit het stroomgebied bereikt en niet zozeer met de waterstanden. Bodemerosie op de Maas heeft geen invloed op de afvoeren. Ook de rivierwaterstanden veranderen overigens nauwelijks, omdat de Maas grotendeels gestuwd is – met uitzondering van de Grensmaas. De Maas is daarom in de verdere analyses buiten beschouwing gelaten.

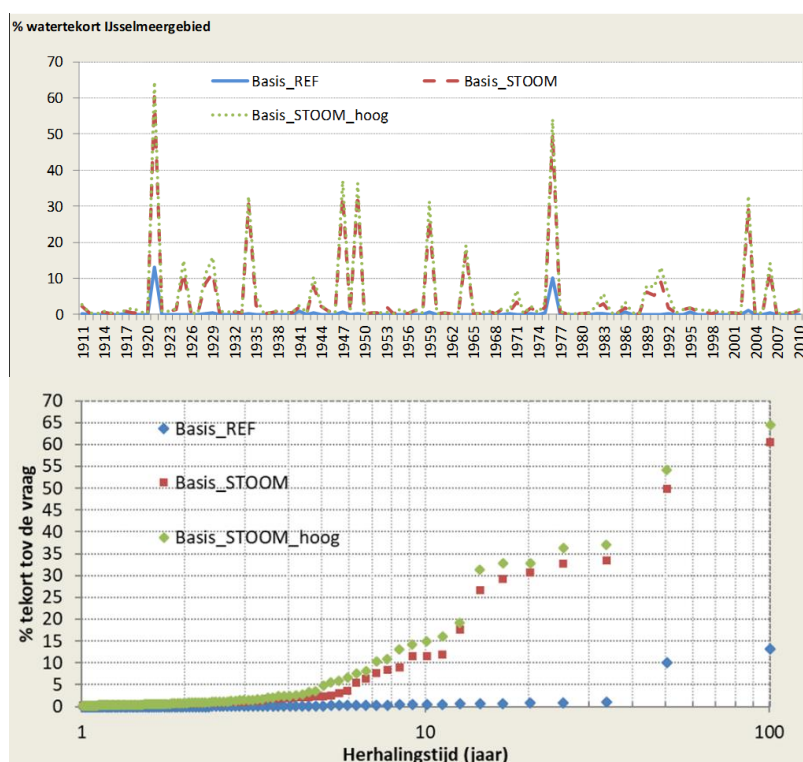
6.3 Resultaten

6.3.1 Noord-Nederland

In het huidige klimaat is de kans op watertekort ongeveer eens per 50 jaar. Deze schatting is gedaan op basis van een historische meetreeks van neerslag, verdamping en rivierafvoeren die zijn geprojecteerd op het huidige landgebruik en watersysteem (zie Mens et al., 2020).

In twee extreem droge jaren treden volgens de berekeningen watertekorten op (1921 en 1976 zie bovenste figuur in Figuur 6.3). De buffervoorraad van het IJsselmeer/Markermeer raakt dan nog net niet helemaal uitgeput en de tekorten blijven daardoor relatief beperkt.

In het Deltascenario Stoom2050 zal eens in de 8 à 10 jaar sprake zijn van flinke watertekorten, waarbij niet kan worden voldaan aan ongeveer 10% van de watervraag. In dit scenario is rekening gehouden met de veranderingen in rivierbodempligging. Vernatting van het veenweidegebied zorgt voor een verdere toename van dit probleem (scenario Stoom_hoog in Figuur 6.3); de tekorten worden in dat geval nog groter en de kans op tekorten neemt toe naar eens in de 5 à 6 jaar. Dit beeld is consistent met de Stresstest die voor DPZW is uitgevoerd in 2021 (Pouwels et al., 2021).

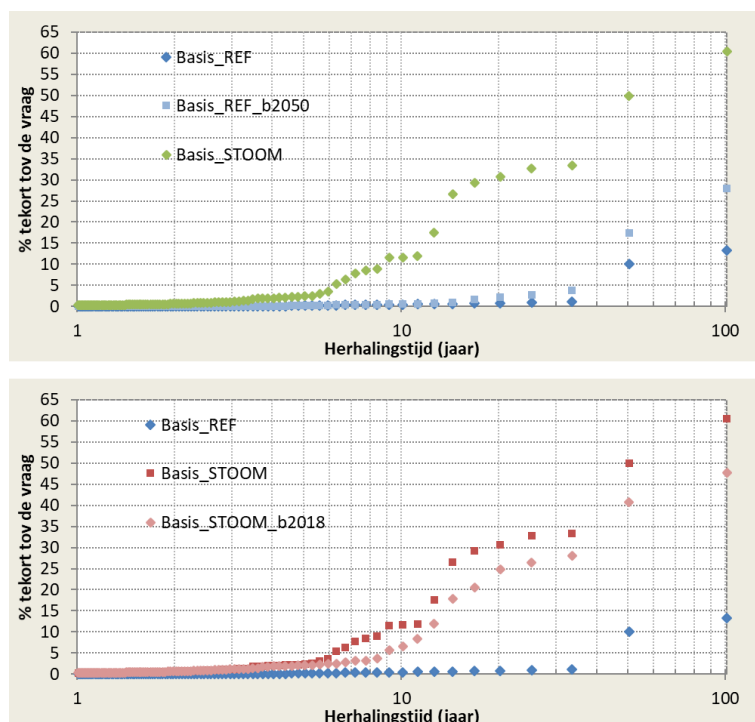


Figuur 6.3 Jaarlijkse berekende watertekorten in Noord-Nederland, nu en bij veranderend klimaat en economische groei in 2050. Boven: % watertekort Noord-Nederland per jaar. Onder: frequentieverdeling van het watertekort. Ref= huidig klimaat en rivierbodempligging. Stoom = veranderend klimaat en rivierbodempligging, Stoom_hoog = veranderend klimaat en rivierbodempligging met toename watervraag door nathouden van veenweidegebieden.

Effecten van rivierbodemerisatie versus klimaatverandering

Als het klimaat niet verandert, maar de bodemerisatie zet wel door, dan neemt het watertekort in droge jaren toe. In Stoom2050 neemt het watertekort in droge jaren toe en neemt ook de kans op watertekort toe door een combinatie van klimaatverandering en rivierbodemerisatie. Figuur 6.4 laat zien hoe de bijdrage van bodemerisatie en klimaatverandering zich verhouden. De bovenste figuur laat zien dat in de huidige situatie gemiddeld eens in de 50 jaar sprake is van 10% tekort ten opzichte van de watervraag (donkerblauwe ruiten). Door bodemerisatie wordt dit mogelijk eens in de 40 jaar. Echter, als gevolg van een combinatie van bodemerisatie en klimaatverandering zal eens in de 8 à 10 jaar sprake te zijn van een watertekort van 10% van de watervraag. Het effect van klimaatverandering is dus groter dan het effect van bodemerisatie.

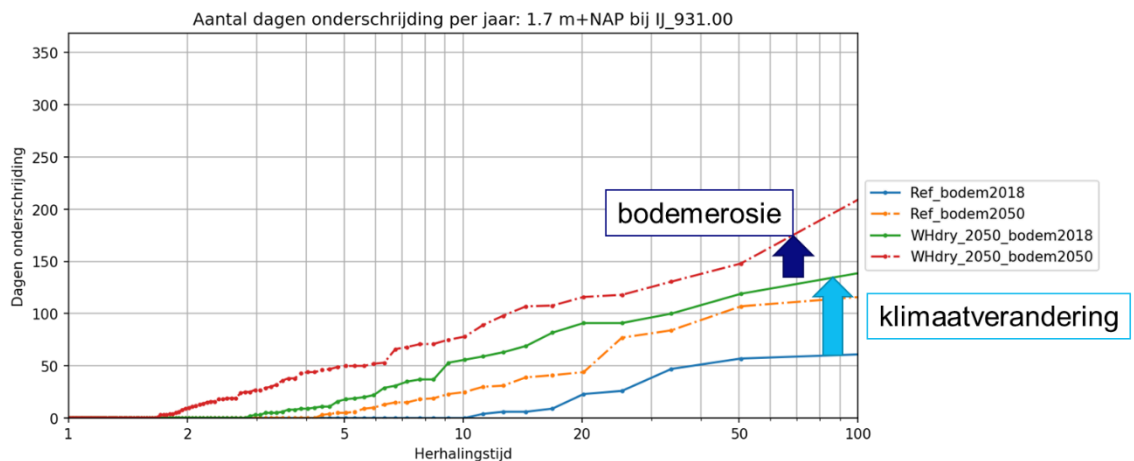
De onderste figuur in Figuur 6.4 geeft een vergelijkbaar beeld. Hier is te zien dat klimaatverandering en rivierbodemerrosie in 2050 gemiddeld eens in de 8 à 10 jaar resulteren in een watertekort van 10% van de watervraag (donkerrode blokjes) en dat dit zonder rivierbodemerrosie mogelijk eens in de 12 jaar zou kunnen zijn. De klimaatverandering heeft in het geval van scenario W_{Hdry} het grootste effect, maar rivierbodemerrosie vergroot het probleem.



Figuur 6.4 Watertekorten Noord-Nederland, bij de huidige rivierbodempligging, bij veranderende rivierbodempligging en bij veranderend klimaat. Ref = huidig klimaat en rivierbodempligging, Ref_b2050 = huidig klimaat in combinatie met rivierbodempligging 2050, Stoom = klimaat en rivierbodempligging 2050, Stoom_b2018 = klimaat in 2050 in combinatie met huidige rivierbodempligging.

Toevoer Twentekanal

Voor de aanvoer van water naar de Twentekanal is het belangrijk dat het kritieke waterpeil van 1.7 m +NAP bij Eefde niet wordt overschreden. Figuur 6.5 toont de kans op een overschrijding en de duur van de overschrijding in de huidige situatie en bij een veranderd klimaat en een veranderde rivierbodempligging, op basis van de D-Hydro berekeningen. Bij het huidige klimaat en de huidige rivierbodempligging is gemiddeld eens in de 50 jaar sprake van een dermate droge periode dat het kritieke waterpeil gedurende 50 dagen wordt overschreden (blauwe lijn). Door klimaatverandering zal de kans op een dergelijke situatie toenemen. Gemiddeld zal eens in de 9 jaar sprake zijn van overschrijding gedurende 50 dagen (groene lijn). Door veranderingen in rivierbodempligging neemt de frequentie nog verder toe tot eens in de 6 à 7 jaar. We merken op dat in D-Hydro geen rekening is gehouden met veranderende regionale onttrekkingen vanuit het hoofdwatersysteem. Hierdoor vallen de getoonde waterstanden mogelijk iets te laag uit.



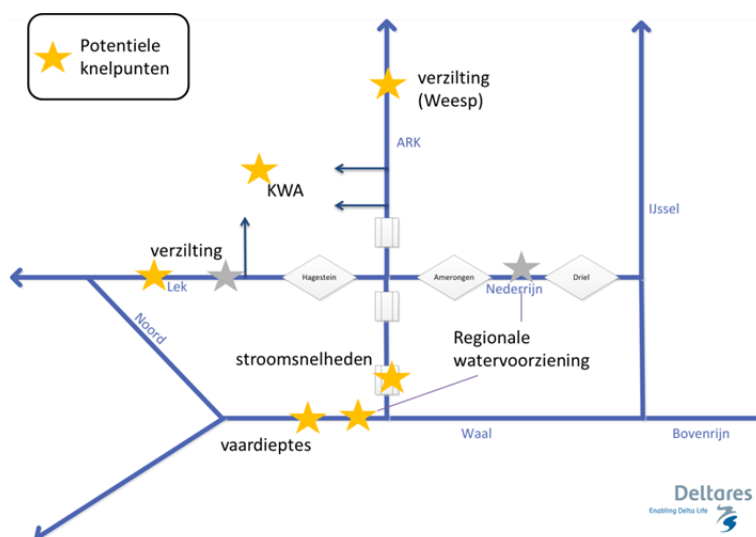
Figuur 6.5 Kans op en duur van overschrijding van het kritieke peil voor waterinlaat naar de Twentekanaal in de huidige situatie, en in 2050 bij veranderd klimaat en bij veranderde rivierbodempligging

Problemen met de wateraanvoer naar de Twentekanaal door lage waterstanden worden in de toekomst (veel) groter. Klimaatverandering heeft het grootste effect, maar het effect van rivierbodemerisatie heeft vrijwel dezelfde orde van grootte. Bij dezelfde herhalingstijd verdubbelt de overschrijdingsduur. Klimaatverandering en rivierbodemerisatie versterken elkaar.

6.3.2 West-Nederland

Het kruispunt van de Waal, Nederrijn-Lek en het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK)-Betuwepand is belangrijk voor de zoetwatervoorziening. Watervragers rond dit punt zijn drinkwaterinnamepunten langs de Lek en het ARK-Noordpand, de regionale watervoorziening vanuit het ARK-Betuwepand via de Klimaatbestendige Aanvoervoorziening West-Nederland, innamepunten langs de Nederrijn in het stuwpand Amerongen-Driel en in stuwpand Hagestein-Amerongen. Tijdens lage afvoeren staan het ARK-Betuwepand en pand Hagestein in open verbinding met de Waal doordat de Pr. Bernhardsluizen in die situatie open staan.

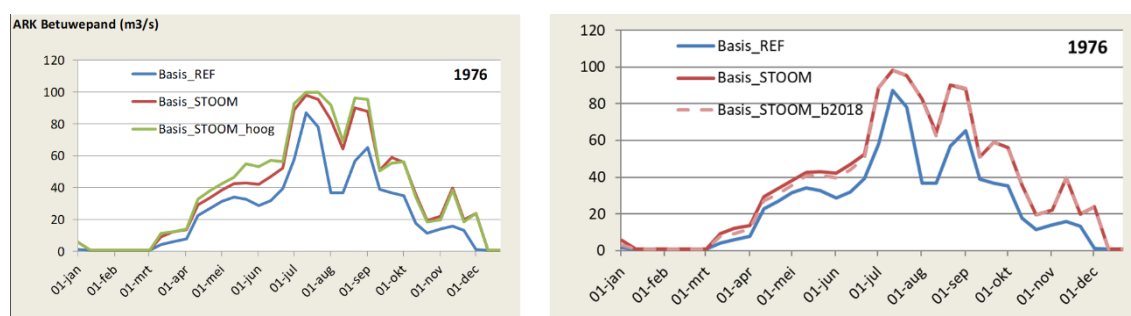
Om het risico op verzilting van de Lek tegen te gaan wordt tegenwoordig meer water doorgelaten via stuw Hagestein als de situatie daarom vraagt. Dit komt ook ten goede aan de nieuwe Krimpenerwaardroute, waarbij vanuit de Lek water naar West-Nederland (Krimpenerwaard en doorvoer Rijnland) wordt aangevoerd. Via de Pr. Irenesluizen wordt water vanuit de Waal naar het Amsterdam-Rijnkanaal gestuurd voor het tegengaan van zoutindringing vanuit het Noordzeekanaal, en om de Klimaatbestendige Wateraanvoer te voeden. Het grootste deel van de watervraag moet bij lage afvoeren aangevoerd worden vanuit de Waal. De focus van de analyse voor West-Nederland ligt daarom op de berekende afvoeren in het ARK-Betuwepand.



Figuur 6.6 Schematische weergave van het hoofdwatersysteem in het Centrale Rivierengebied en potentiële knelpunten in de zoetwatervoorziening (Mens et al., 2018)

ARK-Betuwapand

Figuur 6.7 toont de berekende aanvoer van water via het ARK-Betuwapand in een zeer droog jaar (1976). De blauwe lijn toont het debiet in de referentiesituatie. Te zien is dat het scenario Stoom2050 (rode lijn) zorgt voor grotere debieten om in de watervraag van West-Nederland te voorzien. Het verschil komt grotendeels door klimaatverandering. Door vernatting van de veenweidegebieden kan de watervraag en dus dit debiet nog iets verder toenemen (Stoom_hoog, groene lijn in linker figuur)¹¹. Rivierbodemerisatie zorgt voor een veranderende afvoerverdeling, met iets lagere afvoeren over de Nederrijn-Lek, waardoor meer water uit de Waal moet worden aangevoerd. Het effect hiervan is echter zeer klein. De lichtrode stippellijn in de rechterfiguur van Figuur 6.7 geeft de berekende debieten in 2050 als rivierbodemerisatie wordt tegengegaan (huidige rivierbodempligging handhaven) en er dus uitsluitend sprake is van klimaatverandering. Dit effect is verwaarloosbaar. Het effect van klimaatverandering en extra watervraag is dominant.



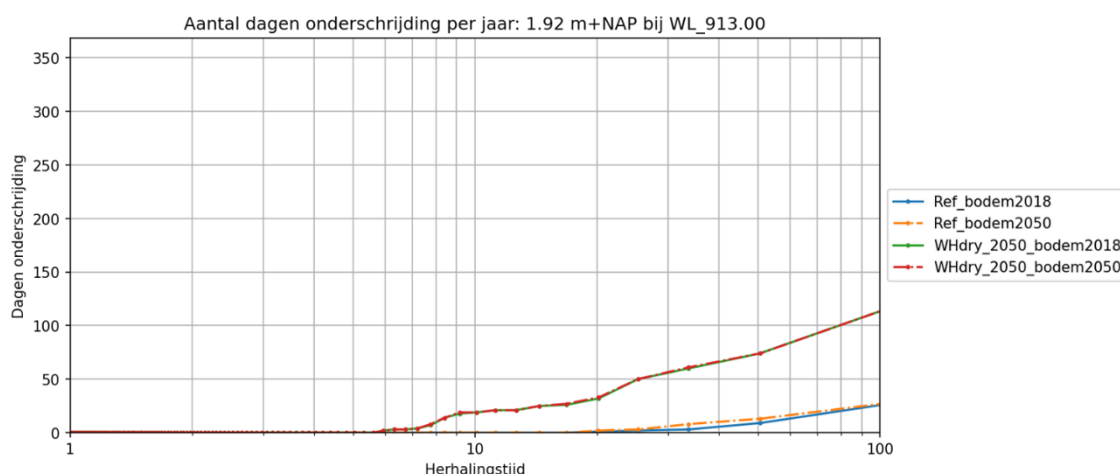
Figuur 6.7 Berekende aanvoer van water naar West-Nederland in een extreem droog jaar via het ARK-Betuwapand. Ref = huidige bodempligging en klimaat, Stoom = klimaat en bodempligging 2050, Stoom_hoog = klimaat en bodempligging 2050 met extra watervraag voor vernatting veenweidegebieden. Stoom_b2018 = klimaat 2050 in combinatie met huidige bodempligging

¹¹ In QWAST is een maximum debiet van 100 m³/s ingesteld voor het debiet door het ARK-Betuwapand. In de praktijk is niet bekend wat het maximum debiet kan zijn. Vooral veilige sluispassage voor scheepvaart (i.v.m. stroomsnelheden) is een aandachtspunt. Maar het maximum is voornamelijk nog niet bekend. RWS_ON bekijkt of een extra meetpunt kan worden ingesteld in het ARK-Betuwapand om de werkelijke debieten beter te monitoren.

Inlaatpunt Tiel (Waal)

Tijdens periodes met lage rivierafvoer dalen de waterstanden bij de regionale inlaten langs de grote rivieren. Als de waterstand te ver daalt, is het niet meer mogelijk om onder vrij verval water in te nemen bij de inlaten (het zogenaamd droogvallen van de inlaat). Bij sommige inlaten is een pomp geïnstalleerd. In deze analyse is gekeken naar de inlaat bij Tiel. Dit punt wordt naar verwachting het meest beïnvloed als gevolg van de extra onttrekking door het ARK-Betuwpand. Deze inlaat heeft een drempel van 1,92 m +NAP. Figuur 6.8 toont de kans op en duur van overschrijden van deze kritieke waarde, op basis van de D-Hydro berekeningen (zie Hoofdstuk 4). In het huidige klimaat wordt de waterstand gemiddeld eens in de 20 jaar lager dan de drempelwaarde. Doorgaande rivierbodemerossie rondom de splitsingspunten, waardoor de afvoer over de Waal iets groter wordt, verandert dit beeld nauwelijks.

Het effect van klimaatverandering en toenemende watervraag (rode en groene lijn) is groot. In eerdere analyses voor het Deltaprogramma Zoetwater is berekend dat klimaatverandering en toegenomen watervraag kunnen leiden tot verandering van de gemiddelde overschrijdingsduur van 5 naar 14 dagen per jaar (Mens et al., 2018). In die analyses werd specifiek gekeken naar het effect van een toegenomen watervraag in combinatie met klimaatverandering. In de analyses met D-Hydro is geen verandering in watervraag aangenomen, waardoor in Figuur 6.8 alleen het effect van klimaatverandering en rivierbodemerossie is af te lezen. Alleen al door afnemende afvoeren neemt de kans op waterstanden lager dan de drempelwaarde toe van eens in de 20 naar eens in de 6 jaar (met een overschrijdingsduur van minimaal 1 dag). De verandering van de bodemligging verandert dit beeld niet, ondanks de verschoven afvoerdeling. Als rekening wordt gehouden met de toegenomen watervraag door zowel droogte als veranderde waterverdeling (conform de voorgenomen maatregelen in het Deltaplan, Rijksoverheid 2021, zie hoofdstuk 6.1) dan nemen de frequentie en duur van overschrijding van het kritieke peil verder toe.

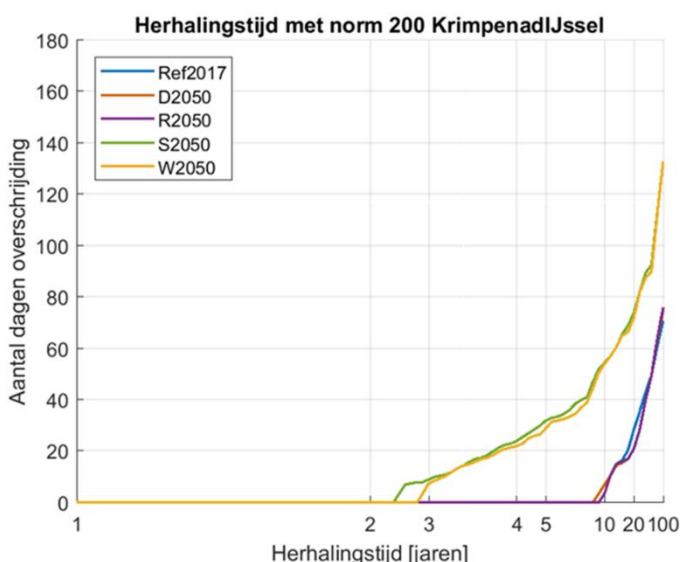


Figuur 6.8 Kans op en duur van overschrijding van het kritieke peil voor de regionale waterinlaat bij Tiel in de huidige situatie, bij veranderend klimaat (Ref versus W_{Hdry_2050}) en bij veranderende rivierbodemligging (2018 en 2050).

Externe verzilting: monding Hollandsche IJssel

Als gevolg van sterke klimaatverandering zal er vaker sprake zijn van langdurig lage afvoer, waardoor de monding van de Hollandsche IJssel en de monding van de Lek vaker kunnen verzilten. Bij overschrijding van de chloridenorm bij Krimpen aan den IJssel wordt de inlaat Gouda voor West-Nederland gesloten en treedt de Klimaatbestendige Wateraanvoervoorziening in werking.

Figuur 6.9 is overgenomen uit de knelpuntenanalyse Zoetwater voor DPZW (Mens et al., 2020). De chlorideconcentraties bij Krimpen aan de IJssel zijn in die studie berekend met het Sobek-1D-model voor het Noordelijk DeltaBekken (Sobek-NDB). Dit is een 1D hydrodynamisch model dat wordt gebruikt om zoutindringing in de Rijn-Maasmonding te simuleren. De figuur laat zien dat de kritieke grens van 200 mg/l ongeveer eens per 10 jaar wordt overschreden in het huidige klimaat. In Stoom2050 (S2050) wordt dit eens in de 2 à 3 jaar. De duur van verziltingsgebeurtenissen met een herhalingsstijd van 10 jaar neemt onder Stoom2050 flink toe; denk aan verzilting gedurende maanden in plaats van enkele weken.



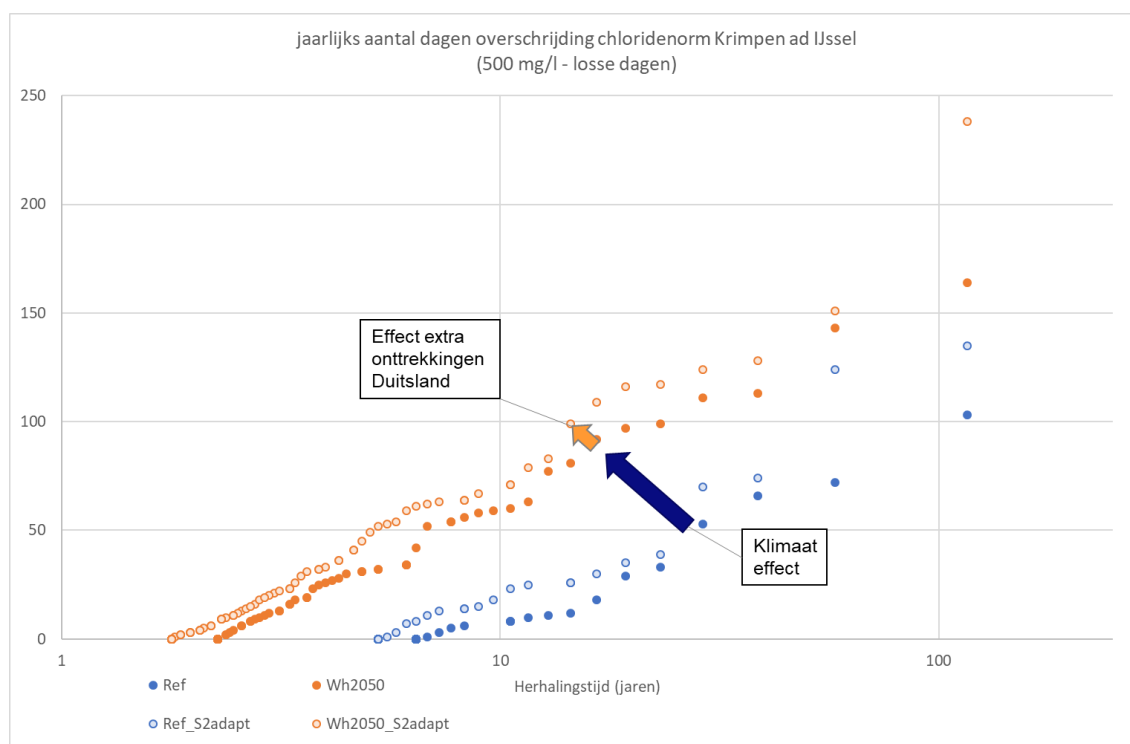
Figuur 6.9 Herhalingstijden van overschrijdingsduren van zoutconcentraties bij Krimpen aan den IJssel voor referentie en scenario's (S2050 = Stoom2050; de andere letters verwijzen naar de andere 3 Deltascenario's), berekend over het zomerhalfjaar voor een drempelwaarde van 200 mg/l en aaneengesloten overschrijdingsduur van minimaal 7 dagen (Mens et al., 2020)

In het kader van de effectbepaling IRM zijn geen herberekening gedaan met een verschoven afvoerverdeling als gevolg van rivierbodemerodie. Met een eenvoudige zoutrelatie (Mens et al., 2018b) is wel een schatting te maken. Een vergelijkbare analyse is gedaan in het kader van een studie naar het effect van grotere onttrekkingen in Duitsland (circa 100 m³/s afname van de Rijnafvoer bij Lobith bij lage afvoeren). De resultaten van die studie worden bij wijze van voorbeeld gegeven in Figuur 6.10. Het effect van bodemerodie is tegengesteld aan het effect van de onttrekking in Duitsland in deze figuur, omdat het effect van relatieve bodemerodie resulteert in een toename van de afvoer.

De figuur geeft de jaarlijkse herhalingsstijd (x-as) van verziltingsgebeurtenissen waarbij de drempelwaarde van 500 mg/l gedurende x dagen (y-as) wordt overschreden. Met een herhalingsstijd van 10 jaar is de duur van de verzilting nu een paar dagen, maar met klimaatverandering neemt dit met ongeveer 2 maanden toe (aflezend bij T=10 op de x-as geeft verziltingsduur van iets meer dan 60 dagen in het WH2050 scenario). Bij de aanname van extra onttrekkingen in Duitsland kan de verziltingsduur van T=10 jaar-gebeurtenissen verder toenemen met nog eens 10 dagen. Voor de berekening worden alleen het aantal dagen per jaar opgeteld, zonder rekening te houden met de vraag of het aaneengesloten dagen betreft. Dit leidt tot een overschatting van de aaneengesloten verziltingsduur.

Om hiervoor te corrigeren is de drempelwaarde relatief hoog gekozen. Voor de referentie komt de hier gepresenteerde frequentieverdeling goed overeen met modelberekeningen met Sobek-NDB ten behoeve van de Basisprognoses Zoetwater (Mens et al., 2020). Het effect van rivierbodemerrosie resulteert zoals gezegd in een beperkte toename van de afvoer over de Waal. Het effect is dus tegengesteld aan het effect van de onttrekking in Duitsland in deze figuur. Bovendien is het effect kleiner, in de orde van grootte van 25 m³/s meer over de Waal bij lage afvoeren.

Met andere woorden: door klimaatverandering nemen de herhalingstijden af (ofwel de kans op verzilting neemt toe). De verschuiving is aangegeven met de blauwe pijl in Figuur 6.10. Door de rivierbodemerrosie zal deze verschuiving iets kleiner zijn (de lijn verschuift over een afstand van ¼ deel van de oranje pijl terug naar beneden). De verwachting is daarom dat het effect van een veranderende rivierbodempligging niet of nauwelijks is terug te zien in een verziltingsgrafiek.



Figuur 6.10 Jaarlijks aantal dagen overschrijding chloridenorm Krimpen a/d IJssel bij veranderend klimaat en extra wateronttrekking in Duitsland (bron: Kusters et al., 2022)

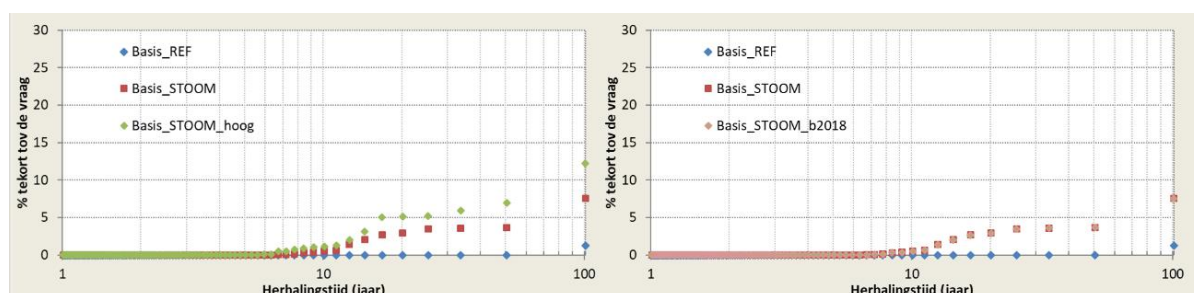
Watertekort West-Nederland

De West-Nederlandse beheergebieden van Rijnland, Delfland en Schieland zijn voor hun oppervlaktewateraanvoer grotendeels afhankelijk van rivierwater uit de Nederrijn/Lek en de Waal. De grootste watervragers zijn peilbeheer en doorspoeling. De Klimaatbestendige Wateraanvoer (KWA) zal vaker moeten worden ingezet als gevolg van de toename van externe verzilting. Omdat de KWA een beperkte capaciteit heeft, treden gemiddeld eens in de 15 jaar tekorten op in Stoom2050 (Mens et al., 2020).

Figuur 6.11 toont de frequentieverdeling van de met QWAST berekende watertekorten als percentage van de watervraag. Conform bovenstaande analyse ligt de kritieke grens van berekende watertekorten ongeveer bij 2,5%. In het scenario met vergrote watervraag voor het nathouden van veenweidegebieden (STOOM_hoog) is de capaciteit van de KWA vaker beperkend en worden de watertekorten groter.

In het rechterpaneel is de zien dat het beeld niet verandert onder de aanname van een onveranderde rivierbodempligging (STOOM_b2018). Dit komt waarschijnlijk omdat de periodes van externe verzilting weliswaar iets korter worden (immers, de netto afvoer door de Nieuwe Waterweg neemt iets toe), maar het effect is in de orde van dagen op een totale verziltingsgebeurtenis van weken tot maanden. Dit is niet terug te zien in de resultaten. NB. in de QWAST berekeningen is het effect op de duur van verzilting niet meegenomen. Wel is een andere afvoerverdeling over de Rijntakken aangenomen, conform de D-Hydro berekeningen.

Kortom, het effect van langdurig lage afvoeren en een grotere watervraag is veel groter dan het effect van ongelijke rivierbodemerisatie op de afvoerverdeling. Als er al een effect is, dan is het tegengesteld aan dat van klimaatverandering en vergrote watervraag en daarmee dus positief.



Figuur 6.11 Frequentieverdeling van het met QWAST berekende %watertekort in de referentie (Ref), een scenario voor 2050 met klimaatverandering en rivierbodemerisatie (STOOM), en een scenario met klimaatverandering, extra watervraag voor het nathouden van veenweidegebieden en rivierbodemerisatie (STOOM_hoog). Rechterpaneel: vergelijking tussen STOOM (met rivierbodemerisatie) en STOOM_b2018 met onveranderde rivierbodempligging.

6.3.3

Watertekorten en effect op gewasopbrengst en landbouwschade

QWAST is gebruikt om de effecten van watertekorten voor de Zoetwaterregio IJsselmeergebied (Noord-Nederland) op de gewasopbrengst te bepalen. Zo is een beeld verkregen van de landbouwschade in de huidige situatie en bij het nulalternatief IRM. Tabel 6.1 toont de gemiddelde watertekorten (gemiddeld over 100 jaar) en de verandering in het landbouwschade (=landbouwschade per jaar) voor heel Nederland. Tabel 6.2 toont watertekorten en landbouwschade voor een extreem droog jaar (1976). De tabellen tonen watertekorten, veranderingen in de gemiddelde landbouwopbrengst, beregeningskosten, en de netto landbouwschade (opbrengst – kosten) die zijn berekend voor heel Nederland. Hoewel de landbouwschade voor heel Nederland is berekend, worden de verschillen vooral veroorzaakt door veranderingen in watertekort in regio Noord, aangezien de rivierbodemerisatie via de afvoerverdeling met name de waterbeschikbaarheid voor deze regio beïnvloedt.

Tabel 6.1 Gemiddelde watertekorten (regio Noord) en landbouwschade per jaar (heel NL) voor vijf scenario's. Landbouwschade is opgebouwd uit een verandering van de opbrengst gecorrigeerd en de verandering in beregeningskosten. Beregeningskosten nemen af omdat er minder water beschikbaar is om te beregenen.

	Huidige situatie (Basis_REF)	Bodem2050 (Basis_REF_b2050)	Klimaat2050 (Basis_STO OM_b2018)	Nulalt. zonder nathouden veenweidegebieden (Basis_STO OM)	Nulalt. incl. nathouden veenweidegebieden (Basis_STO OM_hoog)
Gemiddeld watertekort per jaar in regio Noord (Mm ³ /zomerhalfjaar)	5,3	10,2	68,9	90,9	116,7
Verandering van de gemiddelde landbouwopbrengst per jaar (mln. €) ten opzichte van huidige situatie	0,0	-0,7	-13,8	-16,3	-17,8
Verandering van de gemiddelde beregeningskosten per jaar (mln. €), ten opzichte van huidige situatie	0,0	-0,2	-4,9	-5,9	-6,4
Verandering in netto landbouwschade per jaar (mln. €), ten opzichte van huidige situatie (=landbouwriscio)	0,0	0,5	8,9	10,4	11,4

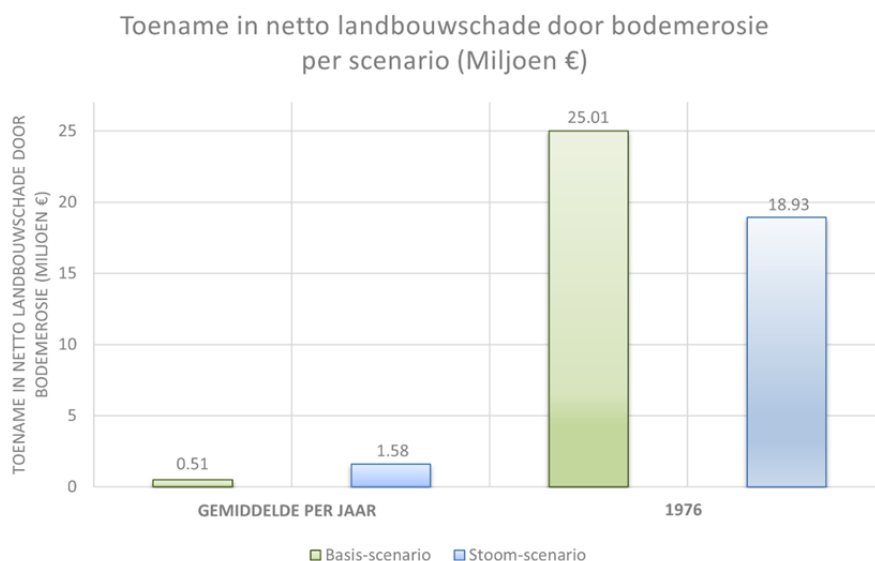
Doorgaande rivierbodemerisatie resulteert in het huidige klimaat in een kleine toename in netto landbouwriscio (in miljoen euro per jaar) als gevolg van de toename van watertekorten: circa een half miljoen euro per jaar (onderste rij in Tabel 6.1). In het STOOM scenario neemt het landbouwriscio door klimaatverandering toe met 8,9 miljoen euro per jaar. Verandert de bodem mee dan komt hier nog 1,58 miljoen euro per jaar bij (totaal 10,4 miljoen euro per jaar toename in Basis_STOOM). Dit betekent dat circa 18% van de verandering in het landbouwriscio is toe te schrijven aan bodemerisatie.

Een grotere watervraag voor het nathouden van de veenweidegebieden (rechter kolom in Tabel 6.1) leidt tot een verdere toename in het landbouwriscio van 1 miljoen euro per jaar.

Tabel 6.2 Watertekorten (regio Noord) en landbouwschade (heel NL) in een extreem droog jaar (1976) voor de vijf scenario's

	Huidige situatie (Basis_REF)	Bodem2050 (Basis_REF_b2050)	Klimaat2050 (Basis_STO OM_b2018)	Nulalt. zonder nathouden veenweidegebieden (Basis_STO OM)	Nulalt. incl. nathouden veenweidegebieden (Basis_STO OM_hoog)
Watertekorten in 1976 (Mm3/zomerhalfjaar)	174,0	299,2	1086,2	1327,4	1628,0
Verandering van de gemiddelde landbouwopbrengst in 1976 (mln. €), ten opzichte van huidige situatie	0,0	-32,3	-232,2	-261,0	-271,8
Verandering van de gemiddelde beregeningskosten in 1976 (mln. €), ten opzichte van huidige situatie	0,0	-7,3	-84,7	-94,5	-96,4
Verandering in netto landbouwschade in 1976 (mln. €), ten opzichte van huidige situatie	0,0	25,0	147,5	166,4	175,4

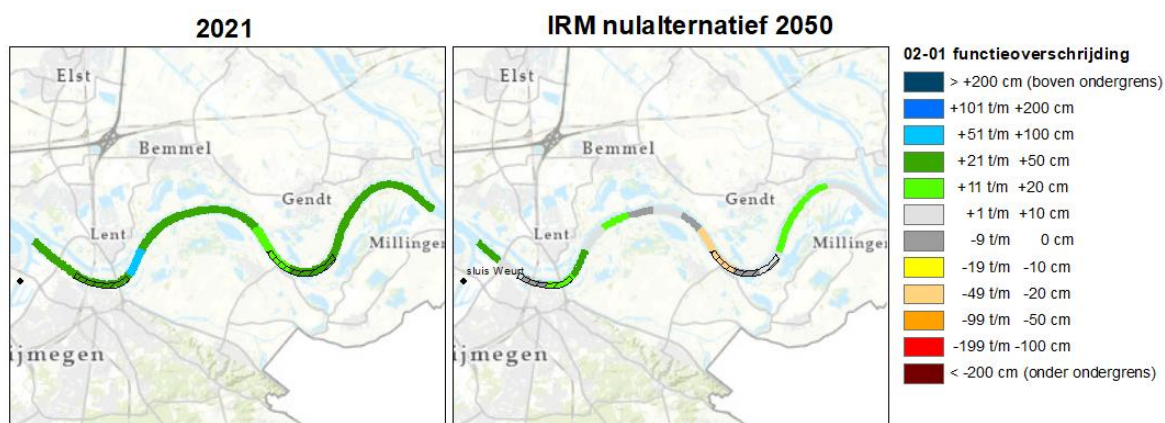
In Tabel 6.2 zijn de resultaten voor een extreem droogtejaar (1976) weergegeven. Figuur 6.12 toont het netto effect van bodemerosie. De doorgaande rivierbodemerosie resulteert in een toename in netto landbouwschade in een extreem droog jaar met circa 25 mln. euro (uitgaande van het huidige klimaat en de huidige watervraag), en circa 19 miljoen euro in STOOM2050 (verschil kolom 4 en 5). Dat het effect in STOOM2050 (veranderd klimaat en watervraag) kleiner is dan in het huidige klimaat, komt omdat de watertekorten in 1976 heel groot zijn, en er via de verdringingsreeks een groot deel van het zomerhalfjaar gekort wordt op de beregeningsvraag. Hierdoor is het effect van bodemerosie op beregening minder groot. Met andere woorden: in een extreem droogtejaar wordt al zo veel gekort op wateraanvoer voor beregening dat een nog verdere afname hiervan tot minder extra schade leidt. Een verdere afname in waterbeschikbaarheid door bodemerosie zal doorwerken in doorspoeltekorten (afname waterkwaliteit) en tekorten voor peilbeheer (uitzakkende slootpeilen en grondwaterstanden), maar dit vertaalt zich in het model niet door in landbouwschade. Het effect van bodemerosie op landbouwschade zal naar verwachting groter zijn in de iets frequentere droge jaren (hier niet weergegeven, maar wel verwerkt in de getallen in Tabel 6.1).



Figuur 6.12 Verandering in het droogterisico voor de landbouw als gevolg van bodemerrosie, in het huidige klimaat (groen) en in het STOOM scenario (blauw). Links het gemiddelde per jaar (=risico), rechts de verandering in landbouwschade in het extreem droge jaar 1976.

6.3.4 Aanvullende bevindingen BRL

In de BRL is een eis opgenomen voor de minimale benodigde rivierbodempligging van de Waal om er voor te zorgen dat de verschuiving in de afvoerverdeling tussen de Waal en IJssel beperkt blijft. De streefwaarde voor de afvoerverschuiving is in principe 0% en een 2% toename van de Waalafvoer t.o.v. de afvoer van Lobith wordt gezien als de absolute ondergrens. Deze maximale 2 % verschuiving is opgesteld aan de hand van het maximaal toegestane effect van de verschuiving in de afvoerverdeling op de vulling van het IJsselmeer (zie berekeningen van Hydrologic (2019 en 2020)). Figuur 6.13 laat zien hoeveel het zomerbed van de Boven-Waal mag zakken voordat niet meer kan worden voldaan aan deze eis. De linker figuur laat zien dat de Waalbodem nu nog voldoende hoog ligt (groene en blauwe tinten). Echter, in 2050 zal doorgaande rivierbodemerrosie op dit traject er voor zorgen dat de rivierbodem op dit traject op veel locaties nog maar net aan de eis voldoet (grijze tinten) of zelfs te ver is gezakt (oranje kleur). De BRL-analyse bevestigt dus het beeld dat veranderingen in rivierbodempligging in 2050 zullen leiden tot een mogelijk voor zoetwatervoorziening problematische verschuiving in de afvoerverdeling. Voortschrijdend inzicht over de kwetsbaarheid van het IJsselmeergebied als zoetwaterbuffer benadrukt echter de noodzaak van voldoende aanvoer via de IJssel, ook in de huidige situatie. Daarom zal er in een ander traject opnieuw naar de verschuiving van de afvoerverdeling in relatie tot zoetwaterbeschikbaarheid worden gekeken. Dit kan leiden tot een strengere eis voor deze functie in de BRL (en tot een toename van de gele en oranje tinten in Figuur 6.13).



Figuur 6.13 De ruimte tussen de aanwezige bodemhoogte en de minimaal benodigde bodemhoogte volgens de BRL om de afvoerdeling bij lage afvoeren te waarborgen. Links voor de huidige situatie en rechts voor het nulaalternatief IRM. Oranje en rode kleuren duiden op een te lage ligging (functieoverschrijding) waardoor de afvoerdeling te veel verschuift (meer dan 2% meer afvoer naar de Waal)

6.4 Conclusies

Voor het thema zoetwaterbeschikbaarheid zijn verschillende indicatoren beschouwd voor West-Nederland en Noord-Nederland. Door klimaatverandering nemen rivierafvoeren in de zomer af en neemt tegelijkertijd de watervraag (voor doorspoelen, peilbeheer, beregening) toe. In scenario Stoom2050 is in eerdere studies al een significante toename van (de kans op) een watertekort berekend.

Het effect van veranderingen in rivierbodempligging op watertekorten is voor West-Nederland beperkt, doordat de Waal relatief meer water gaat trekken. Door de afvoerverschuiving gaat er juist minder water naar de IJssel met significante gevolgen voor Noord-Nederland en de Twentekanal. Voor West-Nederland geldt dat rivierbodemerisatie zal zorgen voor een geringe toename van de afvoer over de Waal, waardoor periodes van externe verzilting eerder iets korter worden dan langer. Dit effect is echter zo klein dat deskundigen het effect op meer/minder verzilting verwaarloosbaar achten. Het effect op watertekorten is daardoor ook verwaarloosbaar. Het effect van klimaatverandering en een vergrote watervraag is voor West-Nederland dominant.

Voor Noord-Nederland is het effect van een veranderende afvoerdeling als gevolg van de rivierbodemerisatie wel zichtbaar in een grotere kans op en grotere ernst van de regionale watertekorten. Hoewel het effect van klimaatverandering en een vergrote watervraag groter is dan het effect van de veranderende afvoerdeling, versterken de processen elkaar. Klimaatverandering (scenario W_{Hdry}) en rivierbodemerisatie resulteren in 2050 gemiddeld eens in de 8 à 10 jaar in een watertekort van 10% van de watervraag, terwijl dit zonder rivierbodemerisatie eens in de 12 jaar is. De grotere watertekorten treffen deels de beregende landbouw in Noord-Nederland. In het STOOM scenario neemt het landbouwisico toe met 10-11 miljoen euro per jaar. Circa 18% hiervan is toe te schrijven aan de gevolgen van bodemerisatie.

Ook de toevoer naar de Twentekanal wordt significant beïnvloed door de rivierbodemerisatie. Problemen met de wateraanvoer naar de Twentekanal door lage waterstanden worden in de toekomst vooral groter door klimaatverandering, maar dit effect wordt versterkt als rivierbodemerisatie niet wordt tegengegaan. Bij een veranderd klimaat kan de onderschrijdingsduur van kritieke waterstanden bij inlaat Eefde verdubbelen als gevolg van doorgaande rivierbodemerisatie.

7 Effectbepaling bevaarbaarheid

7.1 Inleiding

Transport over water vormt een belangrijk aandeel in het totale transport in Nederland. De Rijntakken en de Maas zijn onderdeel van het hoofdvaarwegennetwerk (HVWN) van Nederland. De Waal en Boven-Rijn vormen bovendien een hoofdtransportas naar Duitsland.

De bevaarbaarheid van de rivieren is afhankelijk van natuurlijke omstandigheden. In het programma Klimaatbestendige Netwerken is recent een uitgebreide beoordeling van de impact door verschillende bedreigingen uitgevoerd. Het behouden van voldoende waterdiepte heeft hier de grootste invloed. De beschikbare waterdiepte bepaalt hoeveel lading een schip mee kan nemen.

Door klimaatverandering is de verwachting dat perioden van lage afvoer langer worden en de afvoer nog verder afneemt. Door rivierbodemerossie wordt de afvoerverdeling over de Rijntakken beïnvloed en vormen harde lagen naar verwachting een steeds grotere drempel voor de scheepvaart. In deze analyse wordt het effect van beide op de scheepvaart onderzocht – afzonderlijk en in combinatie.

Bevaarbaarheid van de Maas

De Maas is een gestuwde rivier, waardoor er ook bij lage rivierafvoer voldoende waterdiepte is voor de scheepvaart. Een lage rivierafvoer geeft wel beperkingen voor de sluisbediening, doordat er onvoldoende water beschikbaar is om de sluis te schutten, en ondertussen de waterstand op peil te houden. Dit risico speelt met name bij de sluisen Heel, Born en Maasbracht en is onderzocht in De Jong & Boschetti (2021). Mogelijke handelingsperspectieven van IRM (ingrepen in de rivierbodemplugging en vergroting van de afvoercapaciteit) hebben geen invloed op de waterbeschikbaarheid bij de sluisen. Daarom is de Maas niet meegenomen in het beoordelen van bevaarbaarheid.

Beperkingen in de doorvaarthoogte bij hoogwater

Ook hoogwater vormt een risico voor de bevaarbaarheid. Bij hoge waterstanden wordt de doorvaarthoogte bij bruggen beperkend, waardoor met name containerschepen het aantal containerlagen moeten verminderen. Uit onderzoek naar de beschikbare doorvaarthoogte en de toename van de risico's door klimaatverandering (Van der Wijk & De Jong, 2021) blijkt dat de duur van deze beperkingen toe zal nemen, maar nog steeds beperkt blijft. In de huidige normering zijn bovendien de beperkingen in Duitsland groter dan in Nederland (De Jong & Van der Wijk, 2021). Doorgaande rivierbodemerossie leidt tot een toename van de doorvaarthoogte. De toename is echter zeer beperkt en daarom niet nader beschouwd.

7.2 Methode

Voor het beoordelen van de bevaarbaarheid van de rivier bij laagwater, wordt hoofdzakelijk gebruik gemaakt van kennis uit het programma Klimaatbestendige Netwerken (KBN). Evenals in eerdere studies wordt eerst een oordeel gegeven over de fysieke toestand van het watersysteem (De Jong & Van der Mark, 2021) en daarna over de impact hiervan op de scheepvaart (De Jong, 2020). In de opzet van de berekeningen is in IRM wel gekozen voor een sneller instrumentarium. De uitgangspunten in dit instrumentarium zijn identiek aan de uitgangspunten van KBN.

7.2.1 Toestand van het watersysteem

Voor het beoordelen van de toestand van het watersysteem wordt gebruik gemaakt van de resultaten van de hydraulische berekeningen uit hoofdstuk 4. Op basis van deze resultaten worden de volgende relevante zaken berekend voor ieder punt langs de Rijntakken:

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

In dit hoofdstuk worden eerst de resultaten gegeven bij de Overeengekomen Lage Afvoer (OLA)¹² in het huidige klimaat: 1020 m³/s. Daarna wordt in gegaan 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 deze waterdiepte met de afvoer volgens de 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 CCR en TEN-T). Een volledig overzicht van deze eisen is opgenomen in bijlage 0. Voor de Rijntakken kan dit vereenvoudigd worden naar een minimale waterdiepte bij OLA van 2,8 m op de Boven-Rijn, Waal, en Pannerdensch Kanaal en 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 overschrijding van kritieke waterstandsniveaus en waterdiepte boven sluisdrempels berekend.

De kernindicatoren *veiligheid* en *constructieve stabiliteit* worden niet kwantitatief beoordeeld, maar kort kwalitatief beschouwd.

7.2.2 Impact van laagwater op de scheepvaart

De impact van de kleinere waterdiepten op de scheepvaart wordt veelal berekend door de toestand van de vaarweg te combineren met een transportscenario. Dit transportscenario is opgesteld met de historische IVS90-registraties van de scheepvaart en in scenario's van economische groei gecorrigeerd met groeifactoren. In de projecten DPZW (De Jong, 2020c) en KBN-HVWN (De Jong, 2020b) is deze berekening uitgevoerd met de software BIVAS. Doordat aangenomen kan worden dat de routekeuze op de hoofdtransportas weinig wordt beïnvloed door de waterdiepte, is deze berekening significant versneld in de tool QINCoM (De Jong, 2022). In bijlage E.1 is de configuratie van het model nader toegelicht. Een belangrijk uitgangspunt hierin is de grotere kielspeling bij vaste lagen ten opzichte van alluviale ondiepten.

¹² 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.

Met QINCoM worden de volgende effecten en reacties van de scheepvaart uitgerekend:

- De afname in de vracht die vervoerd kan worden bij gelijk blijvend aantal reizen.
- De toename in scheepvaartintensiteit op de vaarweg indien de vracht per dag gelijk blijft. Dit is een indicator voor het brandstofgebruik en emissies. Deze berekening gaat uit van geen modal shift.
- De toename in de vaarkosten door het hogere aantal reizen.
- De economische gevolgen van beperkingen aan de binnenvaart worden **niet** beschouwd. Uit economische studies naar de droogte van 2018 is gebleken dat de schade aan de industrie een veelvoud kan zijn van de toename in transportkosten (Ecorys 2018; Erasmus-UTP, 2020).

Omdat bij de presentatie van getallen per jaar (zoals de toename in het totale aantal reizen), de schade tijdens de droogte wordt uitgemiddeld met de dagen van het jaar dat er geen problemen zijn, zijn resultaten ook gepresenteerd als de getallen per dag bij condities met een onderschrijdingsduur van 20 dagen.

7.3 Resultaten

Uitgebreide figuren en tabellen zijn opgenomen in bijlage E.3 (toestand watersysteem) en in 0 (impact scheepvaart).

7.3.1 Toestand watersysteem

7.3.1.1 Waterdiepte bij 1.020 m³/s (de huidige OLA)

De waterdiepte is bepaald voor alle afvoeren en langs de hele rivier. In Figuur 7.1 is een selectie van de resultaten gegeven bij de bovenloop van alle Rijntakken, waar de waterdiepte het kleinst is. In onderstaande synthese wordt voor een aantal locaties de verandering in waterdiepte ten gevolge van rivierbodemerrosie beschreven.

Deelfiguur Boven-Rijn en Boven-Waal:

- Op de Boven-Rijn ontstaat een afname in de waterdiepte. Dit komt door de lagere waterstanden op de Waal die ook merkbaar zijn op de Boven-Rijn, terwijl de bodem op de Boven-Rijn stabiliseert. De diepte blijft hier echter voldoende en groter dan omliggende trajecten.
- Op de Boven-Waal is sprake van een toename in de waterdiepte, doordat de bodem meer daalt dan de waterstanden. Dit wordt veroorzaakt doordat de rivierbodemerrosie zorgt voor een aanpassing in de afvoerverdeling, waardoor de afvoer naar de Waal toeneemt.
- Bij de vaste lagen (Erlecom bij rkm 875, en Nijmegen bij rkm 884) dalen de waterstanden terwijl de bodem niet kan eroderen. De waterdiepte neemt op deze locaties af.
- In de resultaten verplaatst het knelpunt Nijmegen van de alluviale ondiepte benedenstrooms van Nijmegen (rkm 885.3) naar de vaste laag. Door de hogere afvoer op de Waal is de waterdiepte in bodem2050 groter dan in bodem2018. Dit verschil vervalt echter wanneer rekening wordt gehouden met een grotere benodigde kielspeling boven de vaste laag¹³.
- Verder benedenstrooms op de Waal (zie Bijlage E.3.1) is de waterdiepte groter door de opstuwende werking vanaf de monding. De waterdiepte neemt ook in dit traject toe ten gevolge van de hogere afvoer. Dit geldt ook voor de vaste laag bij St. Andries.

¹³ In QINCoM wordt voor vaste lagen uit gegaan van een minimaal benodigde kielspeling van 40 cm in plaats van 20 cm. Dit is conform de uitgangspunten van het project Klimaatbestendige Netwerken (KBN).

Deelfiguur Pannerdensch Kanaal en Nederrijn:

- Op het Pannerdensch Kanaal is er geen verandering in de waterdiepte. De daling in waterstanden is hier gelijk aan de rivierbodemerossie.
- Op de Nederrijn is bovenstrooms van stuw Driel een grote afname in de waterdiepte. Dit gestuwde riviertraject staat in verbinding met de IJssel, waardoor de waterstanden hier evenveel zakken als op de IJssel, terwijl de rivierbodemerossie volgens het scenario beperkt zal blijven.
- Verder benedenstrooms op de Nederrijn-Lek (zie Bijlage E.3.1) is de waterdiepte veel groter. In zowel stuwpand Amerongen als Hagestein neemt de waterdiepte maar beperkt af (orde centimeters) ten gevolge van de sedimentatie in beide panden. Dit geldt in mindere mate ook voor de Lek benedenstrooms van Hagestein.

Deelfiguur IJssel:

- Op de IJssel neemt de waterdiepte door de veranderingen in bodemligging af. Dit wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door de lagere afvoer naar de IJssel ten gevolge van de veranderende afvoerverdeling. Bij de bestaande ondieptes en engtes (versmallingen) neemt hierdoor de waterdiepte nog verder af.
- Pas benedenstrooms van Deventer (rkm 945, zie Bijlage E.3.1) neemt de waterdiepte op de IJssel toe door de opstuwende werking vanuit de monding. Ook hier is er nog een afname in waterdiepte ten gevolge van verandering in afvoerverdeling merkbaar, maar blijft de waterdiepte groter dan op het bovenstroomse traject.



Figuur 7.1 Langsdoorsnede van de waterdiepte bij een afvoer van 1.020 m³/s bij Lobith bij de huidige 2018 bodem (doorgetrokken lijn) en de bodem 2050 (stippellijn). Boven: Boven-Rijn en Boven-Waal; midden: Pannerdensch Kanaal en Nederrijn; onder: Boven-IJssel.

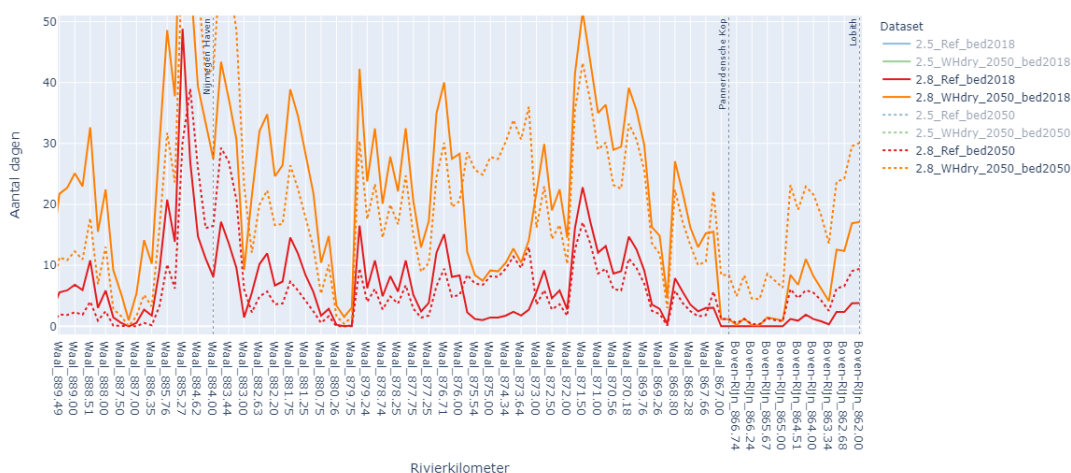
7.3.1.2 Beschikbaarheid van de gewenste waterdiepte

Voor de Waal is bij de OLA een vereiste waterdiepte van 2,8 m vastgelegd in richtlijnen. De OLA komt overeen met een afvoer die gemiddeld 20 ijsvrije dagen per jaar (soms versimpeld tot 5% van de tijd) wordt onderschreden. Voor de Boven-Rijn en Waal is het berekende aantal dagen dat de vereiste vaardiepte wordt onderschreden weergegeven in Figuur 7.2, voor andere trajecten wordt verwezen naar Bijlage E.3.1.

In deze figuur kan hetzelfde resultaat worden afgelezen als hiervoor: door rivierbodemerossie (de stippellijn) neemt de afvoer naar de Waal toe. Dit heeft een positief effect op de waterdiepte en daarmee op het aantal dagen dat aan vereiste vaardiepte kan worden voldaan. Alleen bij de vaste lagen neemt het aantal dagen waarbij niet aan de vereiste vaardiepte kan worden voldaan toe. Daarnaast is in deze figuur ook het effect van klimaatverandering (de oranje lijn) weergegeven. Hieruit blijkt dat de impact van klimaatverandering bij het scenario W_{Hdry} veel groter is dan van rivierbodemerossie.

Het aantal dagen dat rond Nijmegen de 2,8 m waterdiepte niet wordt bereikt neemt door klimaatverandering toe van 49 dagen naar 85 dagen (of naar 73 dagen wanneer sprake is van doorgaande rivierbodemerossie).

Tot slot wordt opgemerkt dat in de huidige situatie op twee punten niet wordt voldaan aan de scheepvaartseisen (rode doorgetrokken lijn in Figuur 7.2). De vereiste waterdiepte van 2,8 m wordt op dit moment meer dan 20 dagen overschreden bij km 871 (een alluviale ondiepte bovenstrooms van de bodemkribben bij Erlecom) en bij km 885 (alluviale ondiepte in binnenbocht benedenstrooms van vaste laag Nijmegen). Door doorgaande rivierbodemerossie (rode stippellijn) zal dit eerste knelpunt komen te vervallen, maar komt er een knelpunt bij rond km 883 (vaste laag bij Nijmegen). Echter, door klimaatverandering gaat het niet meer over enkele knelpunten, maar zal over zeer lange trajecten de vereiste beschikbaarheid van de waterdiepte niet gehaald worden: de oranje stippellijn (nulalternatief IRM) ligt bijna overal boven de grens van 20 dagen. Bij de oranje stippellijn is ook duidelijk te zien dat waterdiepte boven de bodemkribben bij Erlecom (km 873) een probleem gaat worden.



Figuur 7.2 Langsdoorsnede van de Boven-Rijn en Boven-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, de oranje lijnen op veranderd klimaat. Het effect van rivierbodemerossie is aan gegeven met een stippellijn.

Tabel 7.1 geeft een overzicht van percentage van de vaarweg waar niet voldaan wordt aan de minimaal vereiste waterdiepte. Omdat gewerkt is met een representatieve bodemligging voor de verschillende zichtjaren, moeten de percentages vooral als een indicatie worden gezien. Zo blijkt uit de tabel dat op dit moment op de Boven-Waal over een lengte van 5% van het totale traject niet wordt voldaan aan de vereiste waterdiepte. Door klimaatverandering neemt dit toe tot bijna 50%. Hoewel de exacte percentages wat kunnen verschillen, kan wel worden geconcludeerd dat dit een forse verslechtering is.

Bij doorgaande bodemerosie zal op ongeveer 40% van de Boven-Waal niet aan de vereiste waterdiepte worden voldaan: een verbetering. Op de Boven-IJssel voldoet nu ook ongeveer 5% niet aan de gestelde eis. Door klimaatverandering neemt dit toe tot meer dan 50%. Door rivierbodemerosie en verschuiving van de afvoerverdeling kan dit zelfs ongeveer 85% worden.

Tabel 7.1 Percentage van de vaarweg waar niet voldaan wordt aan de minimaal vereiste waterdiepte

Traject	Vereiste waterdiepte (m)	Bodemligging (zichtjaar), klimaatscenario en rivierafvoer die gemiddeld 20 dagen per jaar wordt onderschreden					
		Bodemligging 2018			Bodemligging 2050		
		huidig klimaat	Whdry 2050	GL 2050	huidig klimaat	Whdry 2050	GL 2050
		1020 m³/s	866 m³/s	1124 m³/s	1020 m³/s	866 m³/s	1124 m³/s
Boven-Rijn	2.8	0	0	0	0	11	0
Boven-Waal	2.8	5	49	1	8	39	1
Midden-Waal	2.8	1	18	0	0	4	0
Beneden-Waal	3.4	0	1	0	0	0	0
Boven-Merwede	4.4	0	0	0	0	0	0
Pannerdensch Kanaal	2.8	0	5	0	0	9	0
Boven-Nederrijn	2.8	45	65	37	60	85	50
Midden-Nederrijn	3.7	28	28	27	27	34	27
Beneden-Nederrijn	3.6	8	32	5	16	38	15
Lek	3.5	0	0	0	0	0	0
Boven-IJssel	2.5	6	55	0	24	84	3
Midden-IJssel	2.5	3	40	1	18	73	3
Sallandse IJssel	2.6	0	8	0	3	23	0
Beneden-IJssel	3.2	4	6	2	7	8	5

7.3.1.3 Bereikbaarheid van havens, kades en sluizen

Als onderdeel van de effectbeoordeling wordt gekeken naar de bereikbaarheid van havens kades en sluizen. Om dit te kwantificeren wordt gekeken hoe vaak de waterdiepte boven de sluisdrempel onvoldoende is¹⁴. Op basis van data van vaarweginformatie¹⁵ en de richtlijnen vaarwegen (Koedijk, 2020) is voor 6 sluizen berekend hoe hoog de waterdiepte zou moeten zijn. Dit is vergeleken met de waterdiepte bij de huidige OLA en er is berekend hoe vaak dit wordt onderschreden in de scenario's van rivierbodem- en klimaatverandering. Resultaten zijn gegeven in Tabel 7.2.

Uit deze studie blijkt dat bij sluis Weurt en bij Deventer de waterdiepte vaak onvoldoende is, en dat deze periode door klimaatverandering en door rivierbodemerosie aanzienlijk zal toenemen. Het effect van klimaatverandering is groter dan het effect van rivierbodemerosie.

¹⁴ Hierbij is aangenomen dat de waterdiepte in de voorhavens voldoende is.

¹⁵ Vaarweginformatie.nl: <https://vaarweginformatie.nl/>

Tabel 7.2 Bereikbaarheid havens, kades en sluizen, uitgedrukt in de benodigde waterdiepte en het aantal dagen dat dit wordt onderschreden in scenario's van rivierbodemosie en klimaatverandering.

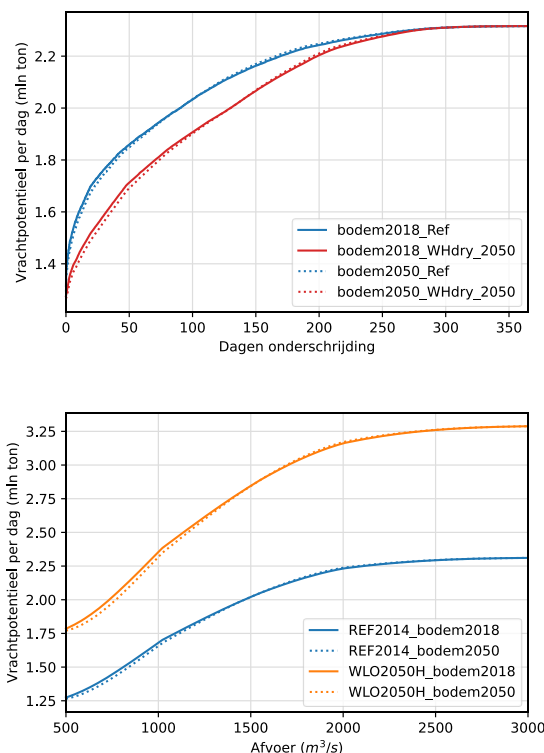
Bodemscenario	Bodemhoogte drempel (m+NAP)	Diepgang (m)	Kielspeling (m)	Waterdiepte (m) bij 1.020 m³/s Lobith		Aantal dagen overschrijding van gewenste waterdiepte (2.8 m / 2.5 m)			
				Bodem 2018	Bodem 2050	Bodem 2018	Bodem 2050	Bodem 2018	Bodem 2050
Klimaatscenario				-	-	Ref	Ref	W _{Hdry} 2050	W _{Hdry} 2050
Sluis Weurt (westsluis)	1,5	2,8	0,7	3,6	3,4	16,5	26,5	42,4	57,0
Prins Bernhardsluis Tiel	-2,4	2,8	1,0	5,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sluit St Andries	-3,0	2,8	0,7	4,6	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0
Sluis Eefde	-2,3	2,5	0,7	4,7	4,4	0,0	0,0	0,0	2,0
Prins Bernhardsluis Deventer	-1,6	2,5	0,7	3,0	2,8	34,2	51,4	66,9	87,6
Spooldersluis Zwolle	-4,5	2,5	0,7	4,4	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0

7.3.2 Impact scheepvaart

7.3.2.1 Afname in vrachtpotentieel

Door een afname in de vaardiepte kan minder vracht meegenomen worden. In Figuur 7.3 is het vrachtpotentieel¹⁶ gegeven voor het huidige scenario (blauw) en de verandering door rivierbodemosie (stippellijn), economische groei (oranje) en klimaatverandering (rood). Uit deze figuur blijkt dat het effect van rivierbodemosie beperkt is (de doorgetrokken lijnen en de stippellijnen liggen dicht op elkaar). Het effect van klimaatverandering is veel groter (de rode en de blauwe lijn in de linker figuur liggen veel verder uit elkaar dan de stippellijnen). Het effect van economische groei is nog groter (dit blijkt uit het verschil tussen de blauwe en de oranje lijn in de rechter figuur).

¹⁶ Het vrachtpotentieel is de vracht die door de gehele vloot (uit de IVS database) vervoerd kan worden als elk schip maximaal beladen wordt. In werkelijkheid wordt er minder vracht meegenomen door allerlei redenen, dit begrip geeft de maximaal vervoerde lading weer met de bestaande vloot. Het geeft niet de maximale potentie van de vaarweg weer omdat er met meer schepen in potentie meer vervoerd kan worden.



Figuur 7.3 Vracht die gemiddeld vervoerd wordt per dag als ieder schip met de maximaal mogelijke beladingsgraad en diepgang vaart. Links: als functie van het aantal dagen onderschrijding (links de lage afvoeren), en de verandering door rivierbodemosie en klimaatverandering. Rechts: als functie van de afvoer, en de verandering door rivierbodemosie en economische groei.

In Tabel 7.3 zijn deze resultaten per jaar en per dag met lage rivierafvoer gegeven, alsook voor enkel de reizen op de Waal en IJssel. In een jaar zonder droogte kan in heel Nederland potentieel 845.4 mln. ton aan goederen worden getransporteerd. Dit is het vrachtpotentieel per dag bij afvoeren boven de 2500 m³/s (2.32 miljoen ton) vermenigvuldigd met 365 dagen. Uit de analyse kunnen we concluderen dat in een jaar met gemiddeld voorkomende lage rivierafvoeren (referentie) het vrachtpotentieel afneemt met 8% tot 777 mln. ton. Het effect van de doorgaande rivierbodemosie is relatief klein (minder dan 0 procentpunt, afgerond nog steeds 777 mln. ton) ten opzichte van het effect van klimaatverandering (3 procentpunt, ofwel afname tot 752 mln. ton).

Door economische groei wordt meer vervoerd over het water, dit wordt gerealiseerd met een grotere vloot. Hierdoor neemt het totale vrachtpotentieel toe, waardoor ook de schade door droogte (afname vervoerspotentieel) ten gevolge van rivierbodemosie en lage rivierafvoer toe neemt. Op een droge dag is de afname in vrachtpotentieel veel groter (26%), en is hierdoor ook de verdere afname ten gevolge van rivierbodemosie (1 procentpunt) en klimaatverandering (8 procentpunt) beter merkbaar.

In de huidige situatie wordt niet continu met de maximale beladingsgraad gevaren. Schepen zullen ook niet beladen over de rivier varen om van een los- naar een laadlocatie te komen of vice versa. Daarnaast is niet altijd de volledige aflaadcapaciteit aan vracht beschikbaar. In de huidige IVS-database is de gemiddelde vracht per dag 0,9 mln. ton, terwijl bij maximale beladingsgraad (en dus zonder leegvaart) dit toe zou kunnen nemen tot 2,3 mln. ton. In het scenario met economische groei betreft dit 1,3 mln. ton per dag in het scenario, met een potentieel van 3,3 mln. ton per dag.

Tabel 7.3 Vrachtpotentieel (per jaar en per droge dag) en de verandering ten opzichte van een situatie zonder dieptebeperkingen door droogte. Een droge dag is gedefinieerd als de laagwatersituatie die gemiddeld 20 dagen per jaar wordt onderschreden. Gegeven voor heel Nederland, en voor de passages langs Waal (Nijmegen) en de IJssel (Velp).

		Vrachtpotentieel [10 ⁶ ton] per jaar	Af- name	Vrachtpotentieel [10 ⁶ ton] op droge dag*	Af- name
Heel NL	Zonder droogte	845,4		2,32	
	Referentie	777,0	-8%	1,70	-26%
	Klimaatverandering	751,7	-11%	1,52	-34%
	Bodemerosie	776,5	-8%	1,68	-27%
Waal	Zonder droogte	319,9		0,88	
	Referentie	259,0	-19%	0,35	-61%
	Klimaatverandering	237,7	-26%	0,20	-77%
	Bodemerosie	257,8	-19%	0,32	-64%
IJssel	Zonder droogte	27,6		0,08	
	Referentie	24,3	-12%	0,04	-45%
	Klimaatverandering	22,7	-18%	0,03	-66%
	Bodemerosie	24,1	-13%	0,04	-52%

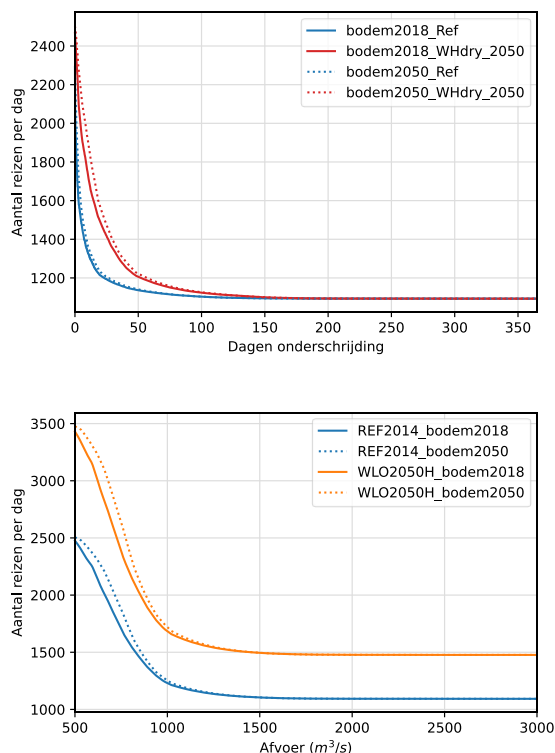
7.3.2.2 Scheepvaartintensiteit op de vaarweg

Als alternatieve berekening is berekend hoeveel het aantal reizen toe zou nemen als de vervoerde vracht gelijk gehouden wordt. In deze berekening wordt er vanuit gegaan dat bij bijvoorbeeld de halvering van de beladingsgraad twee keer zoveel reizen gemaakt moeten worden. Bij een lagere afvoer neemt het aantal reizen daardoor toe. Deze resultaten zijn op vergelijkbare manier als voorgaande paragraaf weergegeven in Figuur 7.4 en in Tabel 7.4.

De consequenties zijn relatief laag omdat veel reizen niet over de rivieren gaan en daardoor geen last hebben van de natuurlijke variabiliteit. Voor heel NL neemt het aantal reizen maar met +2% toe als de vervoerde vracht gelijk wordt gehouden, en dit kan toenemen door rivierbodemosie (1 procentpunt) of door klimaatverandering (4 procentpunt).

De gevolgen voor de scheepvaart op de Waal zijn echter groter, en worden nog het best gegeven door de toename van het aantal reizen per dag. Het aantal reizen neemt toe met 38% als de vervoerde vracht gelijk gehouden wordt, en neemt nog verder toe ten gevolge van rivierbodemosie (6 procentpunt) en klimaatverandering (84 procentpunt). Dit zou resulteren in grote drukte op de Waal.

De toename van het aantal trips over de IJssel is lager ten opzichte van de Waal (+12%), vermoedelijk omdat de schepen hier nu ook al met een kleinere diepgang varen (ook i.v.m. bestemmingen langs ondiepere kanalen), maar de gevolgen van rivierbodemosie zijn groter (5 procentpunt) doordat ook de verschuivende afvoerverdeling nadelige gevolgen heeft. Ook de klimaatverandering heeft grote gevolgen (34 procentpunt).



Figuur 7.4 Aantal reizen per dag als het vrachttransport over water gelijk blijft. Links: als functie van het aantal dagen onderschrijding (links de lage afvoeren), en de verandering door rivierbodemerisatie en klimaatverandering. Rechts: als functie van de afvoer, en de verandering door rivierbodemerisatie en economische groei.

Tabel 7.4 Aantal reizen (-) per jaar en per droge dag* en de verandering ten opzichte van een situatie zonder ondiepte door droogte. Gegeven voor heel Nederland, en voor de passages langs Waal (Nijmegen) en de IJssel (Velp).

		Aantal reizen per jaar	Toe- name	Aantal reizen op droge dag*	Toe- name
Heel NL	Zonder droogte	398.897		1093	
	Referentie	408.838	+2%	1213	+11%
	Klimaatverandering	423.984	+6%	1486	+36%
	Bodemerisatie	410.457	+3%	1229	+13%
Waal	Zonder droogte	103.930		285	
	Referentie	112.861	+9%	393	+38%
	Klimaatverandering	125.896	+21%	633	+122%
	Bodemerisatie	114.394	+10%	411	+44%
IJssel	Zonder droogte	19110		52	
	Referentie	19692	+3%	58	+12%
	Klimaatverandering	21031	+10%	76	+46%
	Bodemerisatie	20051	+5%	61	+17%

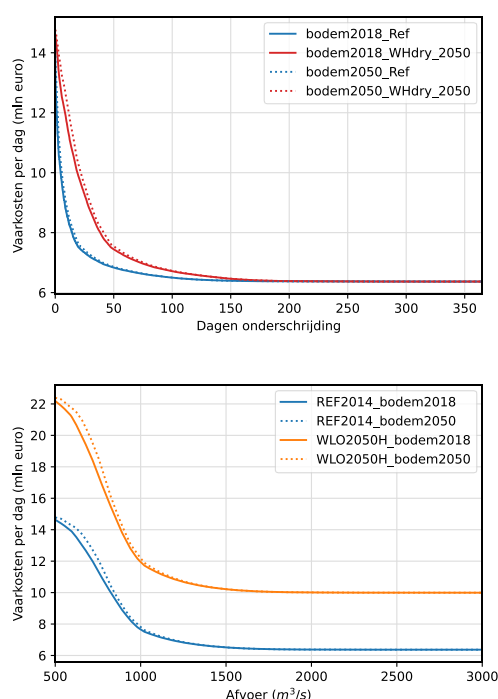
* Een droge dag is gedefinieerd als de laagwatersituatie die gemiddeld 20 dagen per jaar wordt overschreden

7.3.2.3 Toename vaarkosten

Als bij een constant transport over water het aantal reizen toe neemt, dan nemen ook de vaarkosten die hiermee gepaard gaan toe. Dit zegt nog niets over de totale schade maar gaat alleen in op de kosten om de goederen te vervoeren. Deze resultaten zijn op vergelijkbare manier als voorgaande paragrafen weergegeven in Figuur 7.5 en in Tabel 7.5.

Ten gevolge van droogte zijn de vaarkosten per jaar 93 mln. euro (+4%) hoger dan in een jaar zonder droogte. Deze hogere kosten worden vooral gemaakt op de Waal en tijdens de droogste dagen van het jaar, waar de transportkosten toenemen van 3,35 naar 4,42 mln. euro per dag (+32%). Ook de toename ten gevolge van rivierbodemerisatie (3 procentpunt) en klimaatverandering (65 procentpunt) zijn in de resultaten per dag op de Waal het sterkst merkbaar. Op de IJssel is de bijdrage van rivierbodemerisatie (relatief) groter, maar zijn de gevolgen door klimaatverandering overheersend.

Opgemerkt wordt dat de hier gegeven reacties gelden voor alle schepen die Nederland (of deeltraject Waal of IJssel) passeren. Voor een deel van de scheepvaart is de maatgevende ondiepte echter in het buitenland. Niet de gehele toename in de vaarkosten is daardoor toe te wijzen aan ondiepten op de Nederlandse vaarwegen.



Figuur 7.5 Transportkosten per dag als het vrachttransport over water gelijk blijft. Links: als functie van het aantal dagen overschrijding (links de lage afvoeren), en de verandering door rivierbodemerisatie en klimaatverandering. Rechts: als functie van de afvoer, en de verandering door rivierbodemerisatie en economische groei.

Tabel 7.5 Vaarkosten (mln. euro) per jaar en per droge dag* en de verandering ten opzichte van een situatie zonder ondiepte door droogte. Gegeven voor heel Nederland, en voor de passages langs Waal (Nijmegen) en de IJssel (Velp).

		Vaarkosten [10 ⁶ euro] per jaar	Toe- name	Vaarkosten [10 ⁶ euro] op droge dag*	Toe- name
Heel NL	Zonder droogte	2325		6,37	
	Referentie	2418	+4%	7,50	+18%
	Klimaatverandering	2538	+9%	9,85	+55%
	Bodemerosie	2427	+4%	7,61	+19%
Waal	Zonder droogte	1225		3,35	
	Referentie	1313	+7%	4,42	+32%
	Klimaatverandering	1423	+16%	6,61	+97%
	Bodemerosie	1321	+8%	4,53	+35%
IJssel	Zonder droogte	93		0,25	
	Referentie	96	+4%	0,29	+15%
	Klimaatverandering	102	+10%	0,38	+51%
	Bodemerosie	97	+5%	0,30	+19%

In de bovenstaande analyse wordt telkens enkel gekeken naar de vaarkosten in een gemiddeld jaar. In de perceptie zijn het vaak de recentere drogere jaren die uitmaken hoe gedacht wordt over de bevaarbaarheid van het systeem. Om ook voor een droog jaar te beoordelen wat de consequenties zijn, zijn in Tabel 7.6 de totale toename in vaarkosten van de Waal gegeven voor droge jaren met een terugkeertijd van 2, 10 en 100 jaar.

Tabel 7.6 Vaarkosten (mln. euro) per jaar voor een jaar zonder droogte, en voor een droogte met een terugkeertijd van 2, 10 en 100 jaar. Gegeven voor heel Nederland, en voor de passages langs Waal (Nijmegen) en de IJssel (Velp).

		Vaarkosten zonder droogte [10 ⁶ euro]	Toename bij T2-droogte [10 ⁶ euro]	Toename bij T10-droogte [10 ⁶ euro]	Toename bij T100- droogte [10 ⁶ euro]
Heel NL	Referentie	2325	41	229	831
	Klimaatverandering		124	530	1389
	Bodemerosie		43	251	926
	Klimaatverandering & bodemerosie		135	589	1496
	Klimaatverandering & bodemerosie & economische groei	3648	205	886	2232
Waal	Referentie	1225	39	215	771
	Klimaatverandering		117	491	1265
	Bodemerosie		42	238	863
	Klimaatverandering & bodemerosie		128	548	1371
	Klimaatverandering & bodemerosie & economische groei	2026	197	838	2088
IJssel	Referentie	93	1	8	38
	Klimaatverandering		4	25	84
	Bodemerosie		1	11	53
	Klimaatverandering & bodemerosie		5	35	103
	Klimaatverandering & bodemerosie & economische groei	108	6	40	118

7.3.3 Nautische veiligheid

De nautische veiligheid wordt kwalitatief beschouwd op basis van de hierboven gepresenteerde resultaten. Een criterium waar naar gekeken kan worden bij het beoordelen van de nautische veiligheid is de verhouding tussen de capaciteit van de vaarweg en de intensiteit van de scheepvaart. Dit geeft aan hoe druk het is op de vaarweg, en een drukker vaarweg heeft een grotere kans op ongevallen.

Ten gevolge van de klimaatverandering neemt de periode met lage rivierafvoer toe. In deze periode is de bevaarbare breedte kleiner waardoor de capaciteit van de vaarweg ook minder is. Een aanzet om deze capaciteit te kwantificeren is gegeven in Verschuren (2020).

Op de IJssel wordt bij de krappe bochten (engten) ook eenrichtingsverkeer ingesteld. De duur van de perioden dat dergelijke nautische verkeersmaatregelen nodig zijn zal toenemen ten gevolge van de klimaatverandering en wordt versterkt door de verandering in afvoerverdeling door de rivierbodemosie.

Door economische groei neemt de intensiteit op de vaarweg toe (zie paragraaf 7.3.2.2). In het huidige scenario (WLO2050H) is deze groei ongeveer 50%. Dit zou zorgen voor een grote afname in de nautische veiligheid. Door klimaatverandering en rivierbodemerrosie neemt de intensiteit nog verder toe. Relatief gezien is het effect van economische groei het grootst en van rivierbodemerrosie het kleinst.

De analyse naar de beschikbare waterdiepte (paragraaf 7.3.1.2), geeft vermoedelijk een goede benadering van de locaties waar ook nautische veiligheid een groter risico wordt.

7.3.4 Constructieve stabiliteit

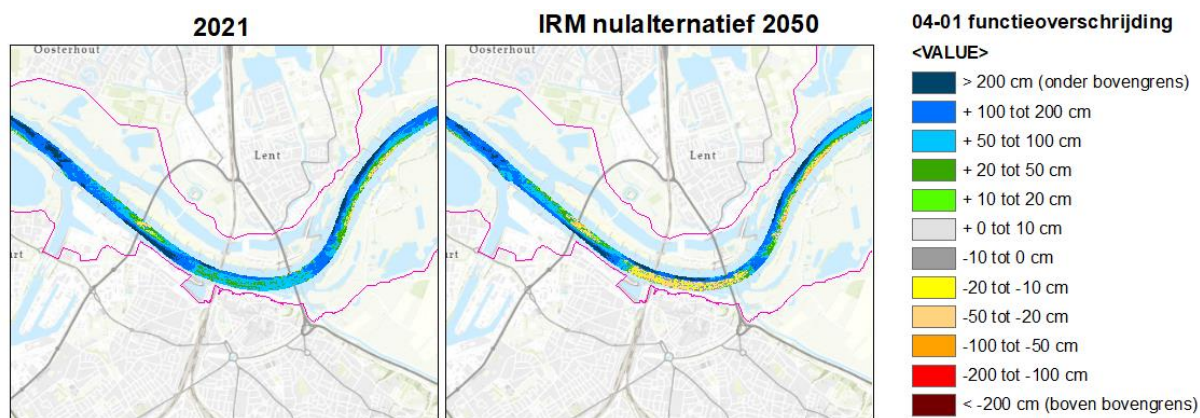
De constructieve stabiliteit van kades is niet op een generieke manier te beoordelen doordat het constructief ontwerp meegenomen moet worden in de beoordeling van iedere individuele kade. Wel kan een inschatting gemaakt worden van de trajecten waar de risico's toenemen doordat de gronddruk afneemt (bodemerrosie) of de waterdruk minder of vaker minder wordt (klimaatverandering).

De afname in gronddruk kan afgelezen worden uit Figuur 4.7. Deze is het grootst langs de Boven-Waal (tot -0.5 m) en het Pannerdensch Kanaal (-0.3 m). Op deze trajecten neemt mogelijk de constructieve stabiliteit af.

De afname in waterdruk kan ingeschat worden uit de berekeningen van de onderschrijdingsduur. Deze resultaten zijn het best af te lezen uit Figuur C.19 (bijlage C.5.2). De gebieden waar grotendeels van het jaar de waterdruk afneemt met -0.5 m en meer, zijn: Boven-Waal, Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn bovenstrooms van stuw Driel en de Boven-IJssel. Op deze trajecten neemt mogelijk de constructieve stabiliteit af.

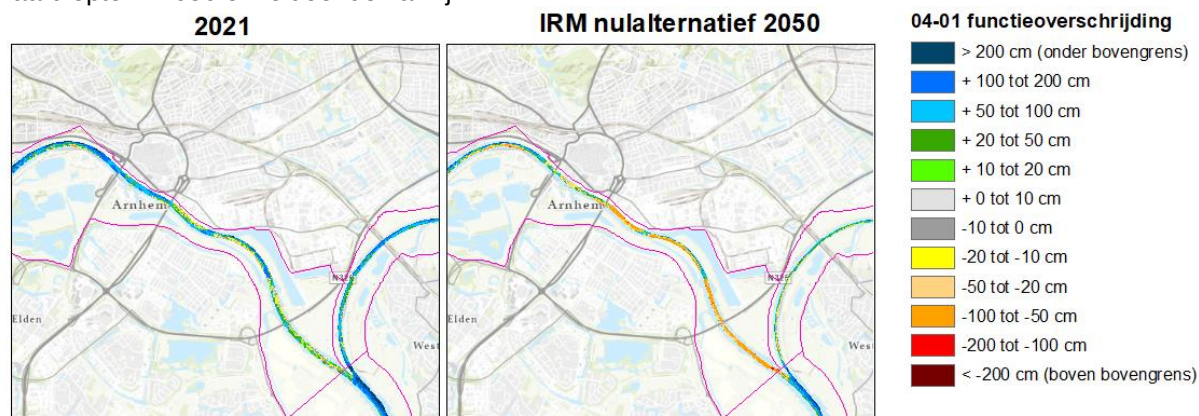
7.3.5 Aanvullende bevindingen BRL

Bovenstaande analyses laten zien dat het belangrijkste knelpunt op de Waal nu gevormd wordt door een alluviale ondiepte benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen, maar dat dit punt bij het nulalternatief van IRM in 2050 zal verschuiven naar de vaste laag zelf. De analyses die zijn uitgevoerd met de BRL bevestigen dit beeld. Figuur 7.6 toont in welke mate de waterdieptes rond Nijmegen aan de gestelde eisen voldoen. Blauwe kleuren geven aan dat de diepte voldoende is. Gele, oranje en rode kleuren duiden op beperkingen in de vaardiepte. De linker figuur toont de huidige situatie. Hieruit blijkt dat de ondieptes zich nu vooral voordoen in de binnenbochten boven- en benedenstrooms van de vaste laag. In 2050 verandert dit beeld. De vaste laag vormt dan zelf een grootschalig knelpunt.



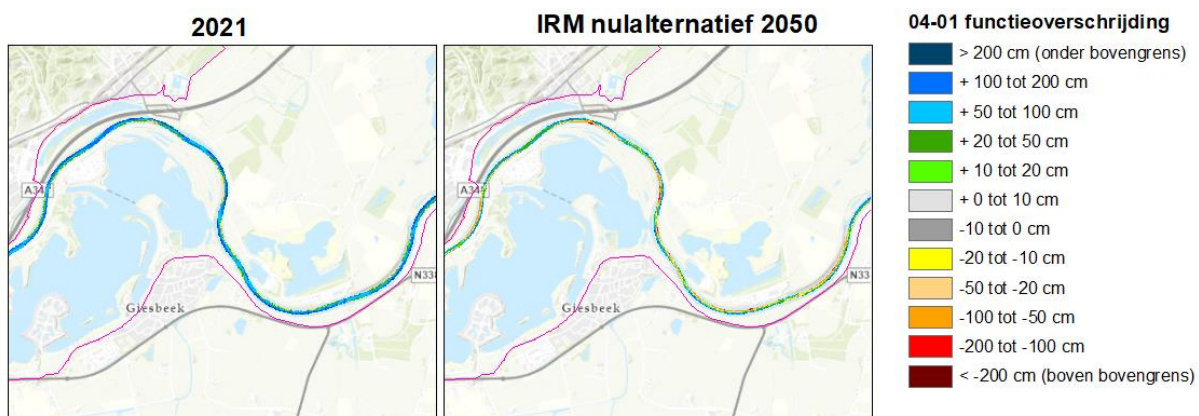
Figuur 7.6 Vaardieptebeperkingen nabij Nijmegen zoals bepaald met de BRL

De eerdere analyses in dit rapport duiden ook op een beperking van de vaardiepte bovenstrooms van stuw Driel. Ook dit knelpunt wordt bevestigd op basis van de BRL-analyses. Figuur 7.7 laat zien dat de vaardiepte in de huidige situatie kritiek is en dat de vaardiepte in 2050 onvoldoende zal zijn.



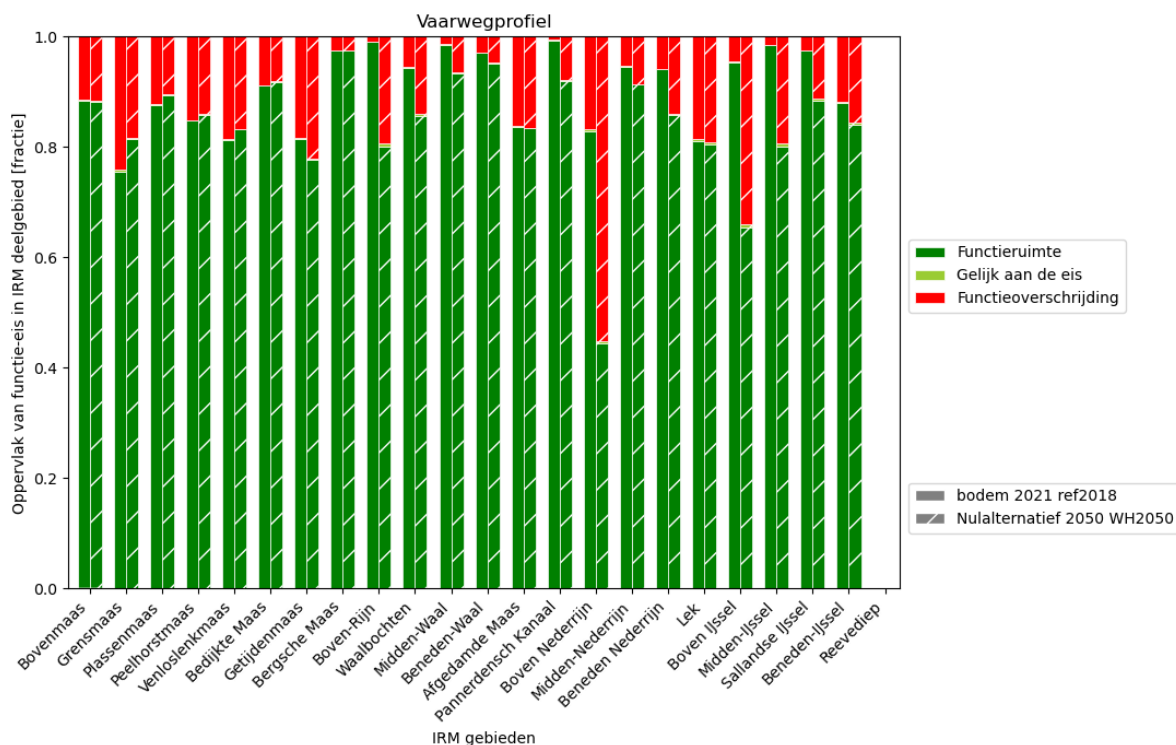
Figuur 7.7 Vaardieptebeperkingen stuw Driel bij Arnhem

Langs de IJssel is met name de breedte van de vaargeul een probleem. Door ondieptes in de binnenbochten zal de vaardiepte op de IJssel in 2050 over grote trajecten niet aan de gestelde eisen voldoen (zie Figuur 7.8).



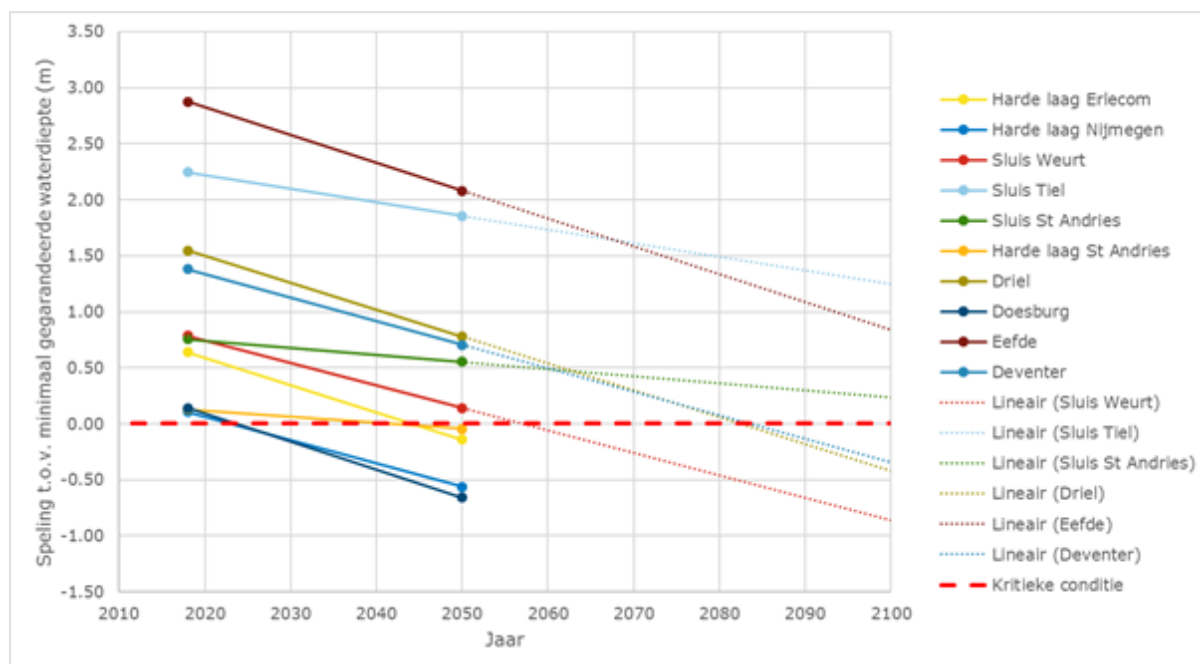
Figuur 7.8 Vaardieptebeperkingen Boven-IJssel

Een samenvattend overzicht wordt gegeven in Figuur 7.9. Deze figuur toont per IRM traject het deel dat niet aan de gestelde vaardiepte voldoet. De oranje kleur geeft aan dat de BRL niet voor alle trajecten over de benodigde data beschikt. De groene balkjes tonen aan op welk deel van de IRM trajecten aan de vereiste vaardiepte wordt voldaan. De rode balken geven aan waar dat niet het geval is. Uit de figuur blijkt dat met name op de Bovenrijn, de Boven-Nederrijn, de Boven- en de Midden-IJssel de trajecten met beperkingen in de vaardiepte toe zullen nemen. Dit komt door klimaatverandering, maar op de IJssel en de Nederrijn ook door de doorgaande rivierbodemerossie. Op de Maas verandert weinig vanwege het gestuwde karakter van deze rivier.



Figuur 7.9 Aandeel van ieder IIR traject dat niet aan de gestelde eisen voor de vaardiepte voldoet

De BRL kijkt ook naar de waterdiepte boven vaste lagen en sluisdrempels. Figuur 7.10 toont in welke mate de waterdiepte nu en in de toekomst aan de gestelde eisen voldoet. Op dit moment is de waterdiepte boven alle sluisdrempels en vaste lagen voldoende (alle punten liggen in 2020 boven de nullijn). Door klimaatverandering en veranderingen in rivierbodempligging verslechtert de situatie. In 2050 zijn problemen te verwachten bij de harde laag bij Erlecom, Nijmegen en Sint Andries, maar ook bij sluis Doesburg.



Figuur 7.10 Waterdiepte boven harde lagen en sluisdrempels

7.4 Conclusies

Ten gevolge van rivierbodemerrosie en klimaatverandering gaat de bevaarbaarheid van de rivieren achteruit. In deze studie is de toestand van de rivier geanalyseerd en is de impact op de scheepvaart berekend. De toestand van het watersysteem geeft de beste inzichten waar ondieptes zitten, bij het bepalen van de impact voor de scheepvaart is gekeken of en in welke mate deze ondieptes problemen opleveren.

De conclusies van de verkenning zijn:

- Door rivierbodemerrosie op de Boven-Waal zal de afvoer naar de Waal toenemen. De waterdiepte op de Waal neemt hierdoor toe. Het grootste knelpunt verplaatst zich door de erosie echter van een alluviale ondiepte in een binnenbocht benedenstrooms van Nijmegen naar de vaste laag van Nijmegen. Indien bij een vaste laag rekening gehouden moet worden met meer kielspeling, neemt de beschikbare diepgang voor de schepen, ondanks de hogere afvoer, toch af.
- Door de rivierbodemerrosie en de verschuiving in de afvoerverdeling bij lage afvoeren, wordt de waterdiepte op de gehele IJssel kleiner (0,2 m). In het met de IJssel in open verbinding staande stuwpand Driel op de Neder-Rijn neemt de waterdiepte eveneens af (0,3 m). De bereikbaarheid van beide trajecten neemt hierdoor sterk af. De toename in transportkosten is daardoor groot.
- Het aantal reizen over de Waal is een orde groter dan dat over de overige riviertakken. Hierdoor is het effect van droogte hier verreweg het grootst. Veel reizen worden niet alleen beïnvloed door ondiepten in Nederland, maar ook door ondiepten stroomopwaarts op de Duitse Rijn (m.n. Kaub). Hierdoor zal voor een deel van de reizen een verandering in Nederland geen invloed hebben op de scheepvaart omdat het absolute knelpunt zich nog bovenstrooms in Duitsland bevindt.
- Internationale afspraken stellen dat de waterdiepte op de Rijn gemiddeld 20 dagen per jaar kleiner mag zijn dan 2,8 m. Uit de berekeningen volgt dat dit nu al niet kan worden gehaald (49 dagen per jaar), en dat dit door klimaatverandering (scenario W_{Hdry}) toeneemt tot 85 dagen. Het aantal locaties waar niet aan deze eis kan worden voldaan neemt ook fors toe.
- Op basis van de toegepaste scenario's wordt geconcludeerd dat het effect van klimaatverandering vele malen groter is dan het effect van rivierbodemerrosie. Zo neemt op de Waal het aantal dagen waarop de waterdiepte onvoldoende is toe van 49 naar 85 dagen per jaar. Door rivierbodemerrosie en de daarmee gepaarde gaande verschuiving in de afvoerverdeling wordt dit beperkt tot 73 dagen per jaar.
- Door klimaatverandering nemen de vaarkosten per jaar gemiddeld toe met 120 mln. euro (6%). Veranderingen in rivierbodempligging resulteren in een toename van 9 mln. euro (minder dan 1%).

8 Effectbepaling waterveiligheid

8.1 Inleiding

In het beschouwde IRM-studiegebied ligt ruim 1100 km aan primaire waterkeringen langs de Rijnakken en de Maas. Al generaties lang zijn miljoenen mensen voor hun veiligheid afhankelijk van een goed functionerend keringensysteem langs de grote rivieren. Het Nederlandse rivierengebied is constant onderhevig aan natuurlijke- en antropogene veranderingen die directe gevolgen hebben voor de waterveiligheid.

Door klimaatverandering wordt verwacht dat de extremen in de rivierafvoeren zullen toenemen. Meer extreme (en onverwachte) afvoergolven zullen door Nederland richting de Noordzee stromen, resulterend in grotere belastingen op het waterkeringensysteem. Om de kans op overstromingen te verkleinen zijn de afgelopen jaren al tal van projecten uitgevoerd om de rivieren meer ruimte te geven. Ook zijn in 2017 nieuwe hoogwaterbeschermingsnormen vastgesteld. In 2050 moeten alle waterkeringen aan deze nieuwe normen voldoen.

In dit hoofdstuk wordt gekeken hoe groot de dijkversterkingsopgave is om in 2050 aan de nieuwe waterveiligheidsnormen te voldoen. Ook worden de versterkingskosten geraamd. Hierbij wordt uitgegaan van de verwachte klimaatverandering (scenario W+) en de verwachte verandering in rivierbodempligging. De berekeningen zijn uitgevoerd met OKADER. Als invoer worden de resultaten van de hydraulische analyse gebruikt, zoals beschreven in hoofdstuk 4.

8.2 Methode

De resultaten van de hydraulische berekeningen liggen ten grondslag aan de effectbepaling waterveiligheid. Deze uitgangspunten en randvoorwaarden staan beschreven in hoofdstuk 4 en bijlage C. Voor specifiek de effectbepaling Waterveiligheid wordt gebruik gemaakt van het rekenmodel OKADER (versie 2021.1) (HKV, 2021)¹⁷. Met het rekenmodel OKADER kan bij een gegeven hydraulisch belastingscenario per dijkvak het *verloop van de dijkversterkingsopgave in de tijd* bepaald worden. Hierbij worden mogelijke dijkversterkingsmaatregelen verondersteld passend in de omgeving en worden de bijbehorende kosten geraamd (gebaseerd op de geïntegreerde KOSWAT investeringskostendatabase).

Binnen OKADER wordt voor verschillende peiljaren de hydraulische belasting (waterstandsstatistiek aan de teen van de dijk) opgegeven om daarmee een veranderend regime in de tijd te simuleren. Door de waterkeringen in een traject in een jaarlijkse cyclus te toetsen aan de norm, wordt bepaald wanneer ieder dijkvak versterkt dient te worden en hoe groot dan de versterkingsopgave is in termen van kruinverhoging, en hoeveel breder de dijkbasis moet worden ten aanzien van macrostabiliteit en piping, zodanig dat de dijk voor de komende 50 jaar weer aan de norm voldoet.

Alle uitgangspunten zijn terug te vinden in Asselman et al. (2022). Hieronder worden de belangrijkste uitgangspunten nogmaals kort belicht:

¹⁷ In het script is een aanpassing gedaan om te kunnen rekenen met in de tijd afnemende waterstanden ten gevolge van een geleidelijk eroderende rivierbodempligging. Dit kan momenteel nog niet via de rekeninstellingen en user interface aangestuurd worden, hiertoe wordt t.z.t. een nieuwe versie van OKADER uitgegeven. Deze aanpassing is toegevoegd aan de uitgangspunten in Asselman et al. (2022).

OKADER

- Voor waterveiligheid wordt er gewerkt met de hydraulische berekeningen vanaf (middel)hoge afvoeren: Rijn $\geq 6.000 \text{ m}^3/\text{s}$; Maas $\geq 1.300 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit zijn de afvoeren die worden beschouwd in het beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI).
- Voor klimaatverandering wordt uitgegaan van het KNMI'06 W+ scenario, dat met behulp van GRADE is omgezet in Rijn- en Maas-afvoerstatistiek. Dit sluit aan bij de lopende waterveiligheidsprojecten en -programma's, waaronder het HWBP. Om de belastingen op de dijken te bepalen wordt voor de Rijntakken hard afgetopt op $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit zal voor hogere afvoeren resulteren in een kans van voorkomen van bijna nul. Dat wil zeggen dat de Rijnafvoer die Nederland bereikt nooit hoger is dan $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$.
- De OKADER vakindeling is gebaseerd op de vakindeling VNK, met vaklengtes in de orde van 1 km.
- Dijkvakken worden iedere tijdstap (jaar) getoetst aan de normen (ondergrens) die wettelijk vastgesteld zijn per normtraject, conform de OI2014v4 rekenregels. Na versterking voldoet een dijktraject per definitie aan de norm.
- Dijken worden standaard ontworpen voor een levensduur van 50 jaar.
- Sterkte-eigenschappen van de keringen zijn vastgelegd in *fragility curves* (overloop/overslag, macrostabiliteit en piping) conform BOI2023 (HKV 2021).
- Er wordt rekening gehouden met bodemdaling (onder de kering) conform Deltaprogramma Rivieren en Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden¹⁸.
- Er wordt voor de planning van de eerste versterkingsronde uitgegaan van de huidige programmering van het HWBP.
- Voor de IJssel-Vechtdelta zijn geen nieuwe hydraulische databases beschikbaar. Hiervoor is uitgegaan van eerdere OKADER-resultaten versie 2021.1 (HKV, 2021). In deze versie van OKADER zijn de hydraulische belastingen in de IJssel-Vechtdelta probabilistisch bepaald op basis van de ontwerpmodus in Hydra-NL (v2.7). Hierbij is de WBI database voor de IJssel-Vechtdelta gehanteerd. Zie HKV (2021) voor meer details.

KOSWAT

- Raming dijkversterkingskosten tot 2050.
- Netto contante waarde minus restwaarde bepaald volgens de SSK systematiek, met prijspeil 2021 en discontovoet 1.6%.

De kostendatabases van OKADER gaan uit van prijspeil 2013, maar de rekenresultaten zijn geïndexeerd naar het jaar 2021 aan de hand van CBS indexreeksen. Toekomstige kosten zijn contant gemaakt en teruggerekend naar het jaar 2025 aan de hand van de geldende discontovoet van 1,6%. In de kostenramingen is uitgegaan van het gebruik van innovatieve versterkingsmaatregelen tegen piping, zoals een Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG) of een Grofzandbarrière (GZB). In de praktijk blijkt dat dit een realistischer raming van de kosten oplevert t.o.v. traditionele versterking met (lange) bermen en kwelschermen. Deze keuzes zijn vastgelegd in Kroekenstoel (2019).

De versterkingskosten per IRM-traject worden bepaald door de versterkingsopgave te combineren met de trajectlengte. Daarnaast speelt de beschikbare ruimte voor versterking ook een belangrijke rol bij het bepalen van de versterkingskosten. Met beperkte ruimte moet vaker voor constructies worden gekozen en zijn de kosten hoger.

¹⁸ Hier wordt de bodemdaling in het binnendijkse gebied bedoeld en niet de bodemerrosie in het zomerbed van de rivier.

Het nulalternatief IRM beschrijft de situatie in het zichtjaar 2050. Omdat bij het versterken van een dijk wordt uitgegaan van een levensduur van 50 jaar, moet rekening worden gehouden met de hydraulische belastingen na 2050. Er zijn echter voor IRM geen nieuwe hydraulische resultaten (relaties tussen afvoer en lokale waterstand) voor de periode 2050-2100 beschikbaar. Aangenomen is dat de waterstanden bij een gegeven afvoer na 2050 gelijk blijven aan de waterstanden berekend bij het nulalternatief IRM, maar dat de overschrijdingskansen van rivierafvoeren verandert volgens het KNMI'06 W+ scenario dat doorkijkt tot 2100.

De versterkingsopgave zal bepaald worden door een combinatie van rivierbodem- en klimaatverandering. Om te achterhalen wat het aandeel van veranderingen in het zomerbed en klimaatverandering is op de totale versterkingsopgave zijn drie verschillende sommen gedraaid (Tabel 8.1).

Tabel 8.1 Uitgevoerde OKADER berekeningen

Som	2018	2050	2100	Toelichting
1.	Klimaat 2018 Bodem 2018			Versterkingen nodig om op orde te komen (nu aan de norm te voldoen zonder rekening te houden met klimaatverandering en rivierbodemerrosie; de kering zal na versterking niet lang meer aan de norm voldoen)
2.	Klimaat 2018 Bodem 2018	Klimaat 2050 Bodem 2018		Idem, maar rekening houdend met klimaatverandering
3.	Klimaat 2018 Bodem 2018	Klimaat 2050 Bodem 2050		Idem, rekening houdend met verandering in klimaat en rivierbodempligging (IRM nulalternatief).

8.3 Resultaten

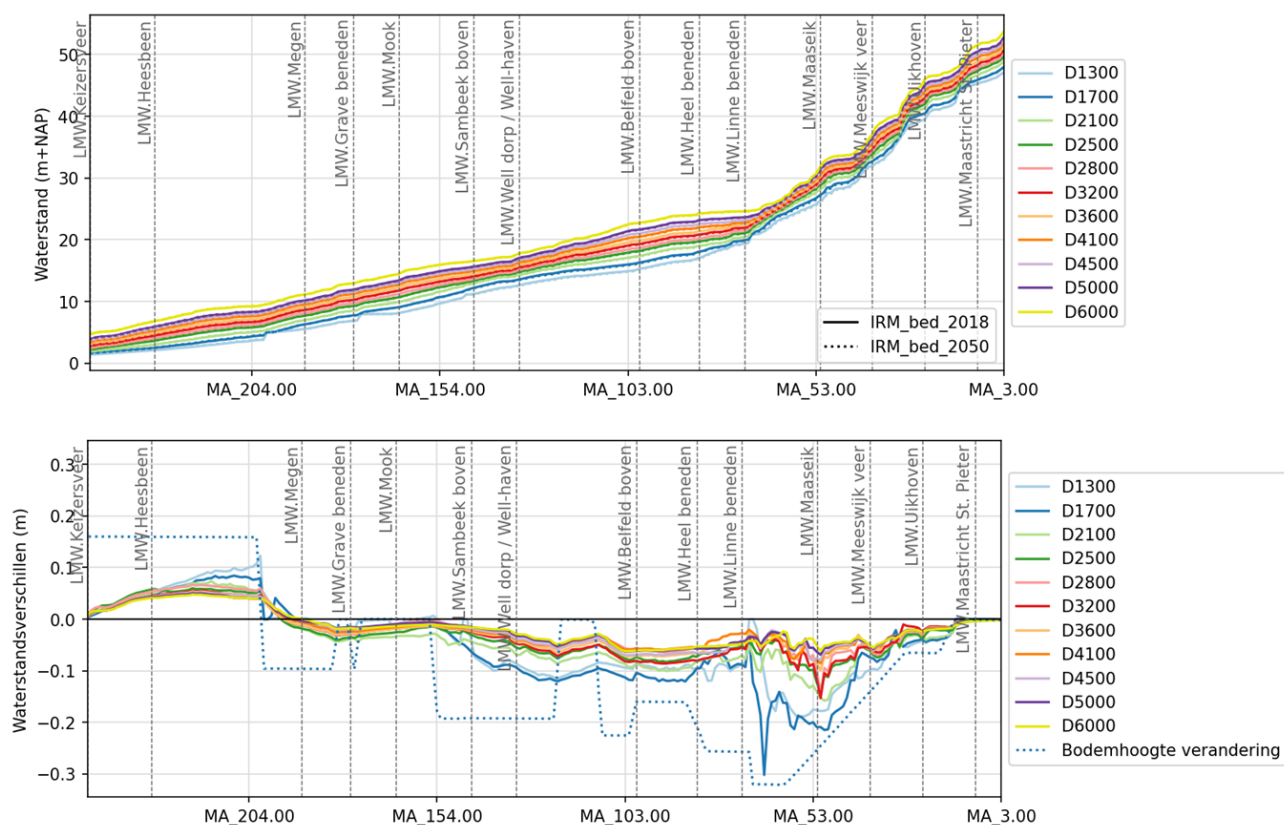
8.3.1 Waterstanden en afvoerverdeling

De dijkversterkingsopgave wordt bepaald door de waterstanden bij een gegeven afvoer en de kans van voorkomen van deze afvoer. Waterstanden kunnen veranderen door veranderingen in rivierbodempligging. Voor de Rijntakken heeft de afvoerverdeling daar nog een extra invloed op. De effecten van deze veranderingen op de waterstanden zijn in hoofdstuk 4 en bijlage C in detail besproken. Daarom worden hieronder alleen de belangrijkste bevindingen opgesomd relevant voor de effectbepaling waterveiligheid.

8.3.1.1 Maas

De waterstandsveranderingen voor de Maas als gevolg van een veranderende bodempligging zijn voor een reeks afvoeren te zien in Figuur 8.1:

- Waar het zomerbed dieper komt te liggen worden de waterstanden lager. Waar het zomerbed hoger komt te liggen (Bergsche Maas) worden de waterstanden hoger. De waterstandseffecten zijn kleiner dan de absolute bodemverandering.
- De waterstandsveranderingen zijn beperkt. Deze liggen tussen +0,1 en -0,2 m. De grootste verandering is zichtbaar in de Grensmaas. Daar zijn de rivierbodemveranderingen ook het grootst.
- De waterstandsverschillen zijn kleiner naarmate de afvoer groter wordt. Bij afvoeren die belangrijk zijn voor de dijkversterkingsopgave is de verandering in waterstand maximaal ongeveer 0,1 m.



Figuur 8.1 Waterstanden (m+NAP) op de Maas bij bodem 2018 en 2050 en waterstandsverschillen tussen bodem 2018 en bodem 2050. De figuur geeft alleen (middel)hoge afvoeren weer.

8.3.1.2 Rijntakken

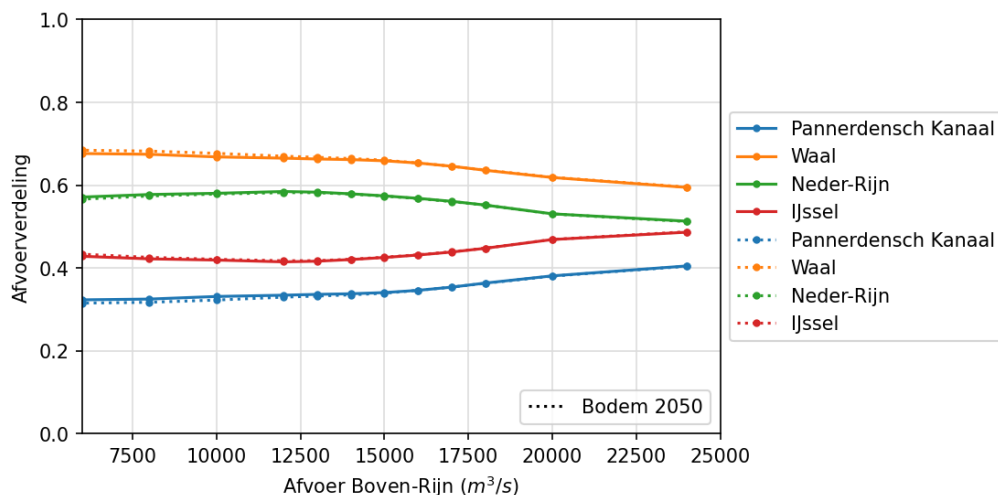
Afvoerverdeling

Op de Rijntakken worden de waterstanden bepaald door de rivierbodempligging en de afvoerverdeling. De afvoerverdeling kan worden beïnvloed met de regelwerken op de Pannerdensche Kop en de IJsselkop. Voor de afvoeren die relevant zijn voor waterveiligheid ($\geq 6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith) is de verandering van de afvoerverdeling als gevolg van doorgaande rivierbodemerisatie echter minimaal, en wordt kleiner naarmate de afvoer toeneemt (Figuur 8.2). Hierbij wordt opgemerkt dat de instelling van de regelwerken wel iets moet worden aangepast wanneer sprake is van doorgaande rivierbodemerisatie. Dit betreft vooral regelwerk Pannerden, dat iets verder open moet komen te staan om aan de door het beleid vastgestelde verdeling te voldoen (zie Tabel 4.1).

In Tabel 8.2 is er speciaal aandacht voor de verandering in hoogwaterafvoer richting de IJssel als gevolg van de veranderende rivierbodempligging. De verandering is zeer klein en neemt af naarmate de rivierafvoer hoger wordt. Dat komt doordat de afvoerverdeling bij middelhoge en hoge afvoeren vooral door de geometrie van het winterbed en de regelwerken worden bepaald.

Omdat de waterstanden bij een gegeven afvoer te Lobith in dit gebied ook nauwelijks veranderen is besloten dat voor de IJssel-Vechtdelta (IJVD) uitgegaan kan worden van eerdere IJVD resultaten uit OKADER (HKV, 2021).

Wanneer de afvoerverdeling sterker zou veranderen, dan zou de waterstandsstatistiek voor dit gebied opnieuw moeten worden afgeleid. Immers, omdat in dit gebied niet alleen de rivierafvoer maar ook de stormopzet van belang zijn, zou dit betekenen dat een nieuwe hydra-database zou moeten worden afgeleid. Omdat de afvoerverdeling niet wijzigt en de kans op een bepaalde IJsselafoer dus ook gelijk blijft, was dat nu niet nodig.



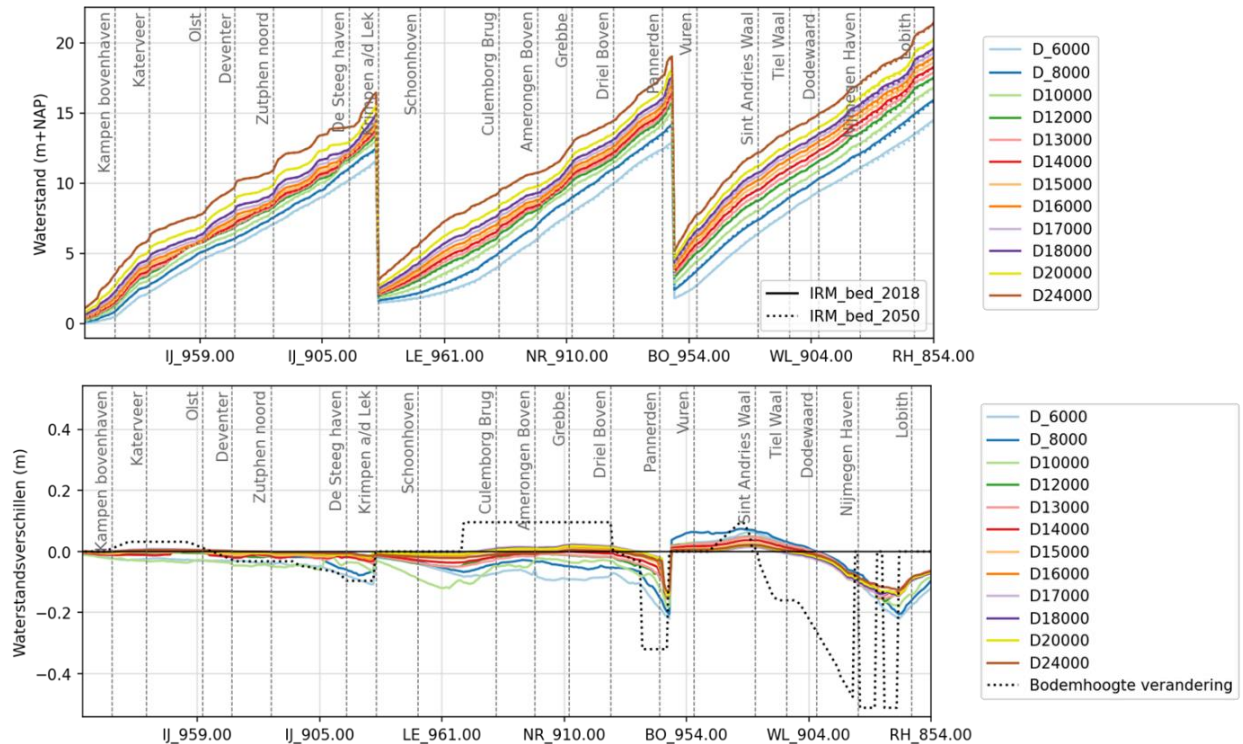
Figuur 8.2 Afvoerverdeling voor afvoeren $\geq 6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ waarbij de regelwerken zijn ingesteld op de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling behorend bij een afvoer van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith (BVA '17.000 m^3/s Lek Ontzien'). Getoond wordt de verdeling bij ieder splitsingspunt. De afvoer over de Waal en het Pannerdensch kanaal tellen op tot 1 en datzelfde geldt voor de afvoer over de IJssel en de Neder-Rijn.

Tabel 8.2 Verandering afvoer naar de IJssel door rivierbodemverandering 2018-2050.

Afvoer Boven-Rijn (m^3/s)	Afvoer IJssel 2018 (m^3/s)	Afvoer IJssel 2050 (m^3/s)	Verschil (m^3/s) [2050 – 2018]	Verschil (%)
6000	828	813	-16	-1,9 %
8000	1078	1064	-14	-1,3 %
10000	1387	1353	-34	-2,5 %
12000	1666	1653	-13	-0,8 %
13000	1823	1807	-17	-0,9 %
14000	1991	1979	-12	-0,6 %
15000	2175	2169	-7	-0,3 %
16000	2387	2382	-5	-0,2 %
17000	2641	2645	3	+0,1 %
18000	2933	2931	-3	-0,1 %
20000	3576	3574	-3	-0,1%
24000	4728	4730	-2	0,0 %

Waterstanden

- Net als op de Maas zijn de waterstandseffecten kleiner dan de bodemveranderingen.
- De waterstandsverandering als gevolg van rivierbodemerrosie zijn beperkt. Deze liggen tussen +0.1 en -0.2 m.
- Het effect van veranderde rivierbodempligging op de waterstanden wordt kleiner naarmate de afvoer groter wordt.



Figuur 8.3 Waterstanden (m+NAP) op de Rijntakken bij bodem 2018 en 2050 en waterstandsverschillen door overgang bodem 2018 naar 2050. Figuur geeft alleen hoge afvoeren weer.

8.3.2 Versterkingsopgave

De versterkingsopgave voor het in IRM beschouwde gebied bestaat uit kruinverhogings-, macrostabiliteits- en pipingopgaven. Voor de totale opgave wordt voor het nulalternatief IRM uitgegaan van de beschreven som 3 (Tabel 8.1). Daarbij is rekening gehouden met veranderingen in rivierbodempligging en klimaatverandering. Ook wordt de versterkingsopgave van IJVD in deze paragraaf besproken. De resultaten hiervan zijn afkomstig uit een eerdere OKADER-simulatie (HKV, 2021).

8.3.2.1 Hoogteopgave

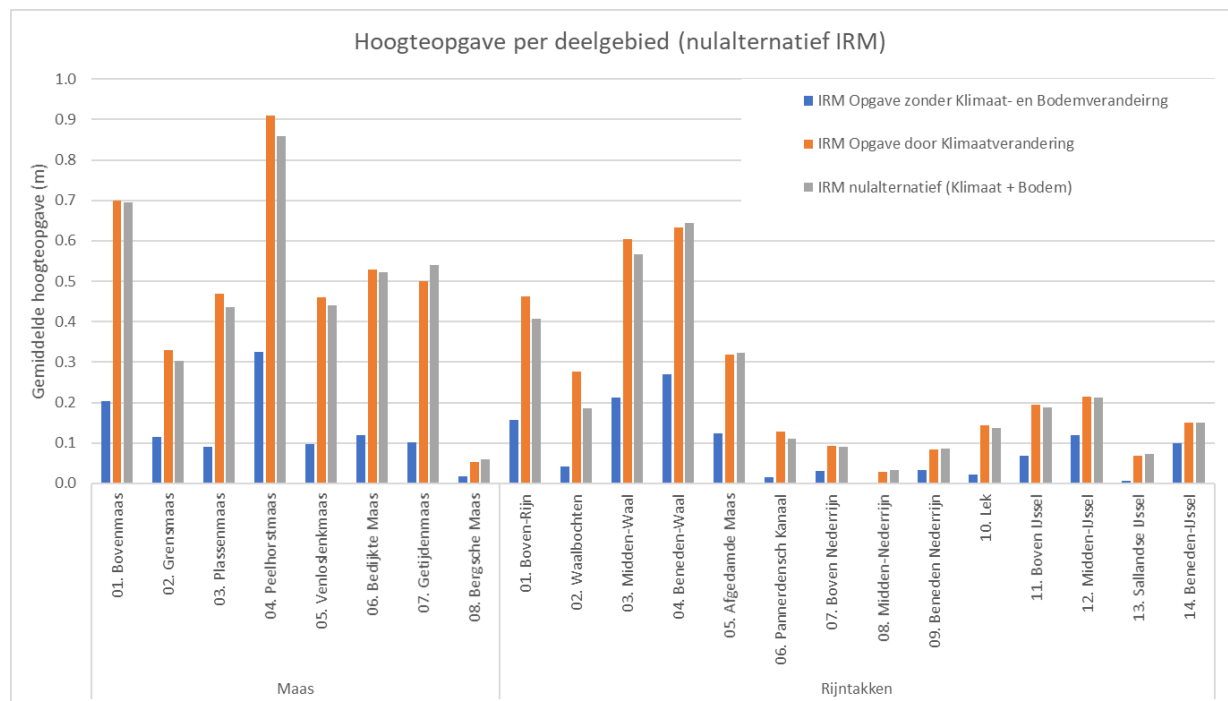
Figuur 8.4 en Figuur 8.5 geven de gemiddelde hoogteopgave per IRM deelgebied weer. De voor IRM relevante opgave is weergegeven in grijs "IRM nulalternatief (Klimaat + Bodem)" en tevens op kaart gevisualiseerd in Figuur 8.6.

De hoogteopgave varieert sterk per IRM deelgebied. De hoogteopgave wordt grotendeels bepaald door de in 2050 hogere waterstand (gevolg van klimaatverandering) aan de teen van de dijk. Hieronder zijn voor de Maas en Rijntakken de opgaven samengevat.

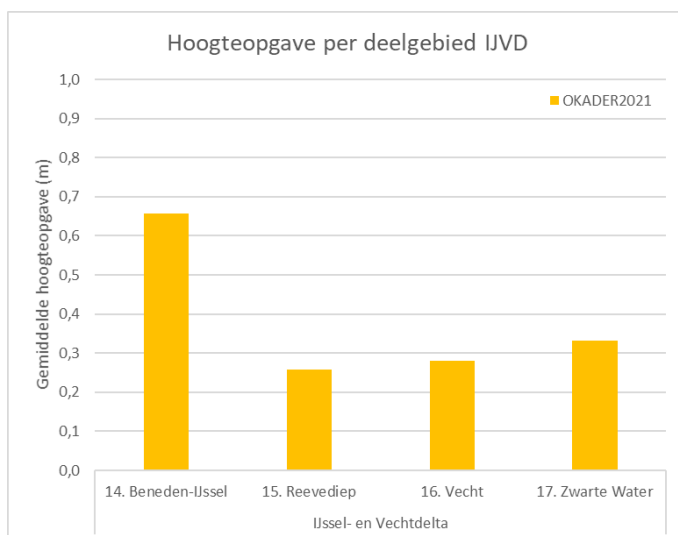
Maas: Op de Maas varieert de hoogteopgave tussen de +0,3 m op de Grensmaas en +0,9 m op de Peelhorstmaas. Op de Bergsche Maas is de hoogteopgave het kleinst met +0,06 m.

Rijntakken: Tussen de verschillende Rijntakken is een fors verschil te zien. De grootste kruinverhogingsopgave wordt berekend voor de Waal. Hier is voor de Midden- en Beneden-Waal een opgave tussen de +0,55m en +0,65m bepaald. Langs het Pannerdensch kanaal en de Nederrijn-Lek blijft de opgave beperkt tussen de +0,05 en +0,15 m als gevolg van het beleid 'Lek ontzien'. Op de IJssel ligt de hoogteopgave tussen de +0,07 en +0,2 m. De trajecten behorend tot de IJVD hebben een versterkingsopgave tussen de +0,25 en +0,65 m. De grootste opgave voor de IJVD ligt op de Beneden-IJssel (Figuur 8.5).

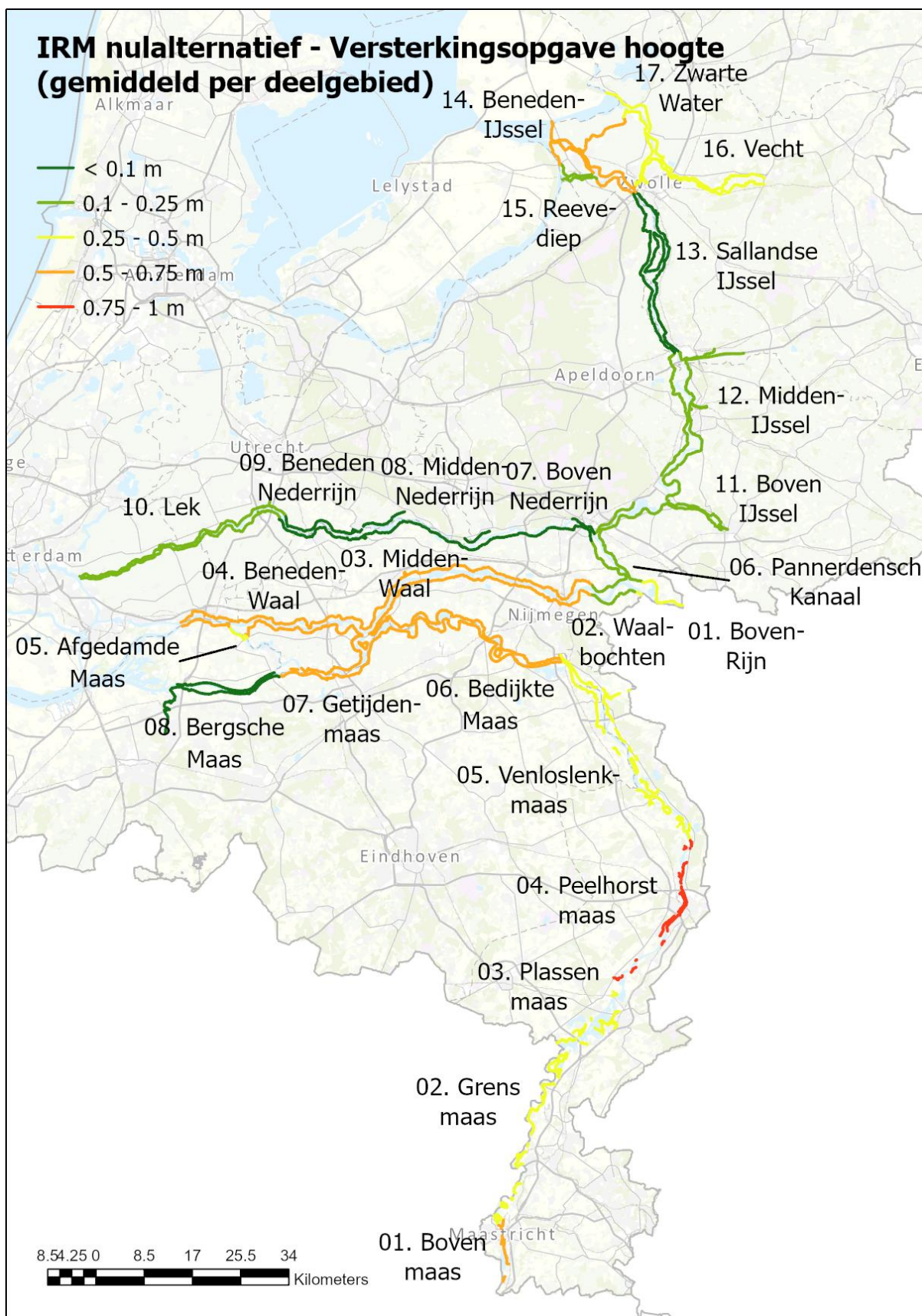
De hoogteopgave wordt vooral veroorzaakt door klimaatverandering. Zonder klimaatverandering en veranderingen in rivierbodempligging zou de hoogteopgave beperkt zijn tot minder dan 0,3 m (blauwe staafjes in Figuur 8.4). Als gevolg van klimaatverandering neemt de opgave toe tot maximaal 0,9 m (oranje balkjes). De invloed van bodemhoogteveranderingen is relatief klein. De verandering in hoogteopgave door veranderingen in rivierbodempligging bedraagt maximaal 0,1 m (verschil oranje en grijze balkjes).



Figuur 8.4 Gemiddelde hoogteopgave per deelgebied. De opgaves zijn uitgesplitst in een situatie zonder rivierbodemerisatie en zonder klimaatverandering (blauw), met alleen klimaatverandering (oranje) en met klimaatverandering en rivierbodemerisatie (=IRM nulalternatief) (grijs) voor de situatie 2050.



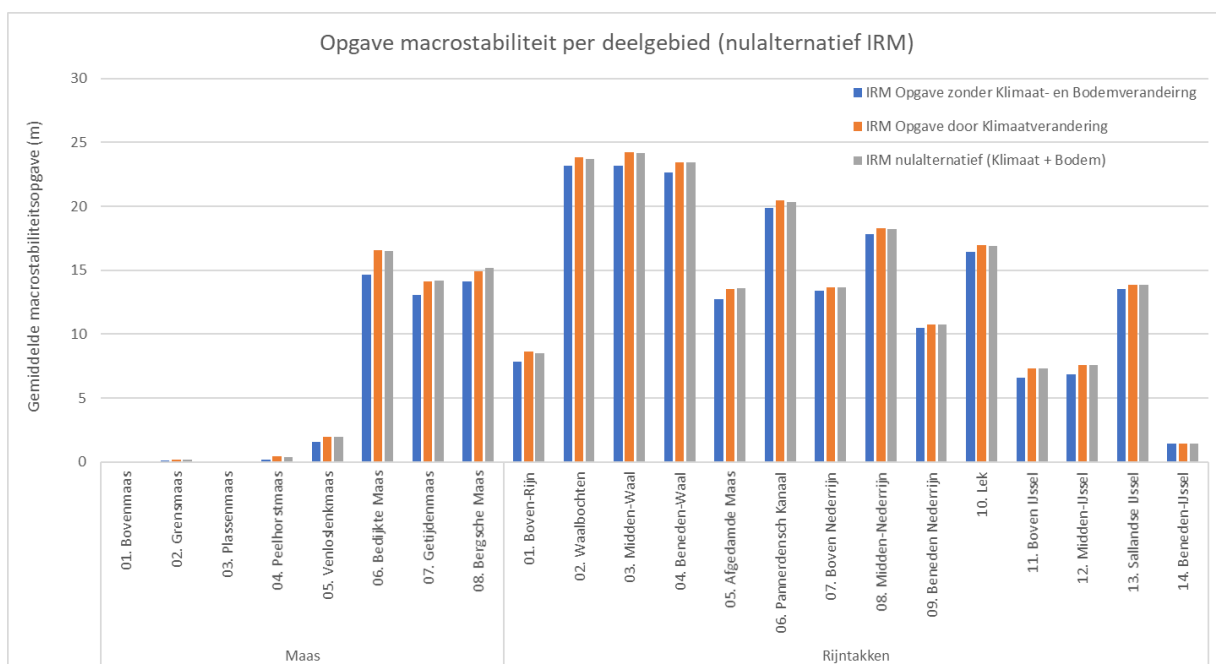
Figuur 8.5 Gemiddelde hoogteopgave om in 2050 aan de nieuwe beschermingsnormen te voldoen, voor deelgebieden binnen de IJssel- en Vechtdelta. In deze berekeningen zijn de belastingen probabilistisch bepaald, waarbij niet alleen de rivierafvoer, maar ook het IJsselmeerpeil en opwaaiing als stochasten zijn mee genomen. Resultaten zijn overgenomen uit eerdere berekeningen van HKV (2021).



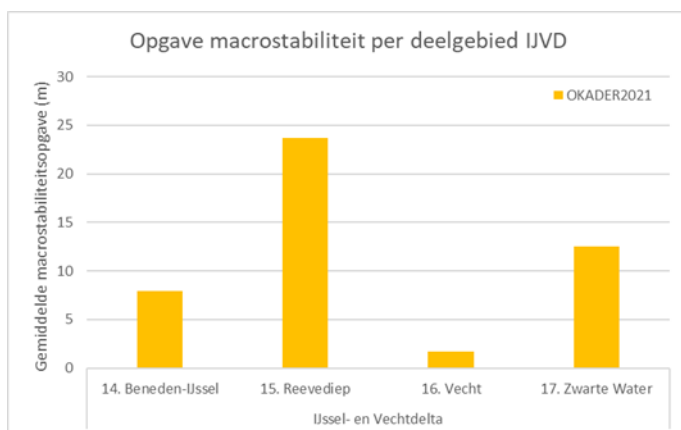
Figuur 8.6 Gemiddelde hoogteopgave in 2050 per IRM traject voor het nulalternatief.

8.3.2.2 Macrostabiliteit- en Pipingopgave

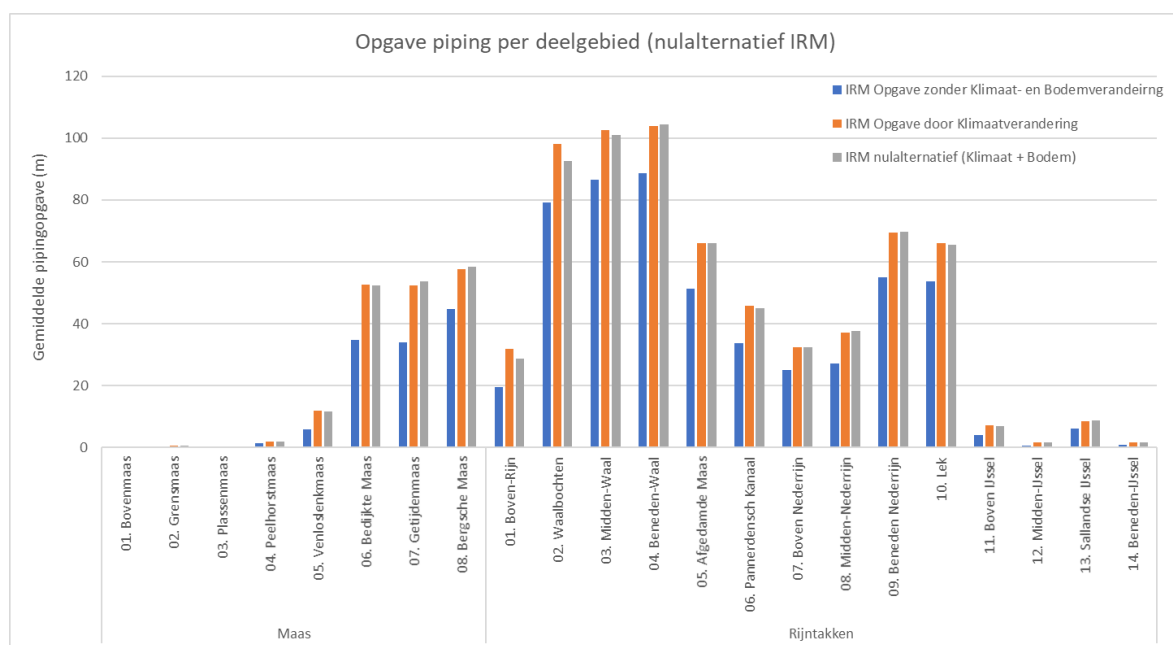
In tegenstelling tot de hoogteopgave zijn de opgaven voor macrostabiliteit en piping veel minder afhankelijk van de waterstand. De grootste opgave voor zowel macrostabiliteit als piping is berekend voor de dijken langs de Waal en het Pannerdensch kanaal. Dit komt onder meer doordat de waterstanden op de deze takken erg hoog zijn ten opzichte van het binnendijks gelegen gebied. Langs de IJssel zijn deze verschillen veel kleiner. De opgave langs de bovenloop van de Maas is zeer klein. Dit komt doordat de dijken hier weinig stabiliteitsgevoelig zijn en doordat de ondergrond bestaat uit grindafzettingen. Die spoelen minder makkelijk weg dan de fijnere zanden benedenstrooms. Voor macrostabiliteit geldt dat de versterkingsopgave maar beperkt beïnvloed wordt door veranderingen in rivierwaterstand. Dit blijkt ook uit het feit dat de balkjes in onderstaande figuur weinig van lengte verschillen. De pipingopgave wordt iets meer beïnvloed door veranderingen in waterstand dan de macrostabiliteitsopgave (als gevolg van klimaatverandering).



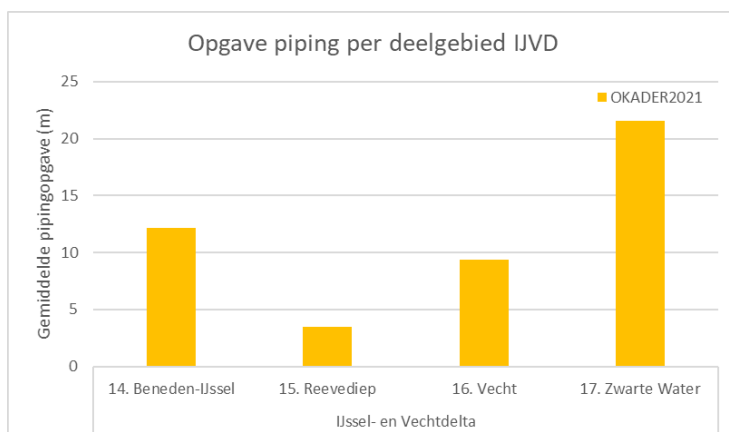
Figuur 8.7 Gemiddelde opgave macrostabiliteit per deelgebied. De opgaves zijn uitgesplitst in een situatie zonder rivierbodemerisatie en zonder klimaatverandering (blauw), met alleen klimaatverandering (oranje) en met klimaatverandering en rivierbodemerisatie (=IRM nulalternatief) (grijs) voor de situatie 2050.



Figuur 8.8 Gemiddelde opgave macrostabiliteit per deelgebied uit IJVD. In deze berekeningen zijn de belastingen probabilistisch bepaald, waarbij niet alleen de rivierafvoer, maar ook het IJsselmeerpeil en opwaaiing als stochasten zijn mee genomen. Resultaten zijn overgenomen uit eerdere berekeningen van HKV (2021).



Figuur 8.9 Gemiddelde opgave voor piping per deelgebied. De opgaves zijn uitgesplitst in een situatie zonder rivierbodemosie en zonder klimaatverandering (blauw), met alleen klimaatverandering (oranje) en met klimaatverandering en rivierbodemosie (=IRM nulalternatief) (grijs) voor de situatie 2050.



Figuur 8.10 Gemiddelde opgave piping per deelgebied uit IJVD. . In deze berekeningen zijn de belastingen probabilistisch bepaald, waarbij niet alleen de rivierafvoer, maar ook het IJsselmeerpeil en opwaaiing als stochasten zijn mee genomen. Resultaten zijn overgenomen uit eerdere berekeningen van HKV (2021).. Let op andere Y-as schaal vergeleken met Figuur 8.9.

8.3.3

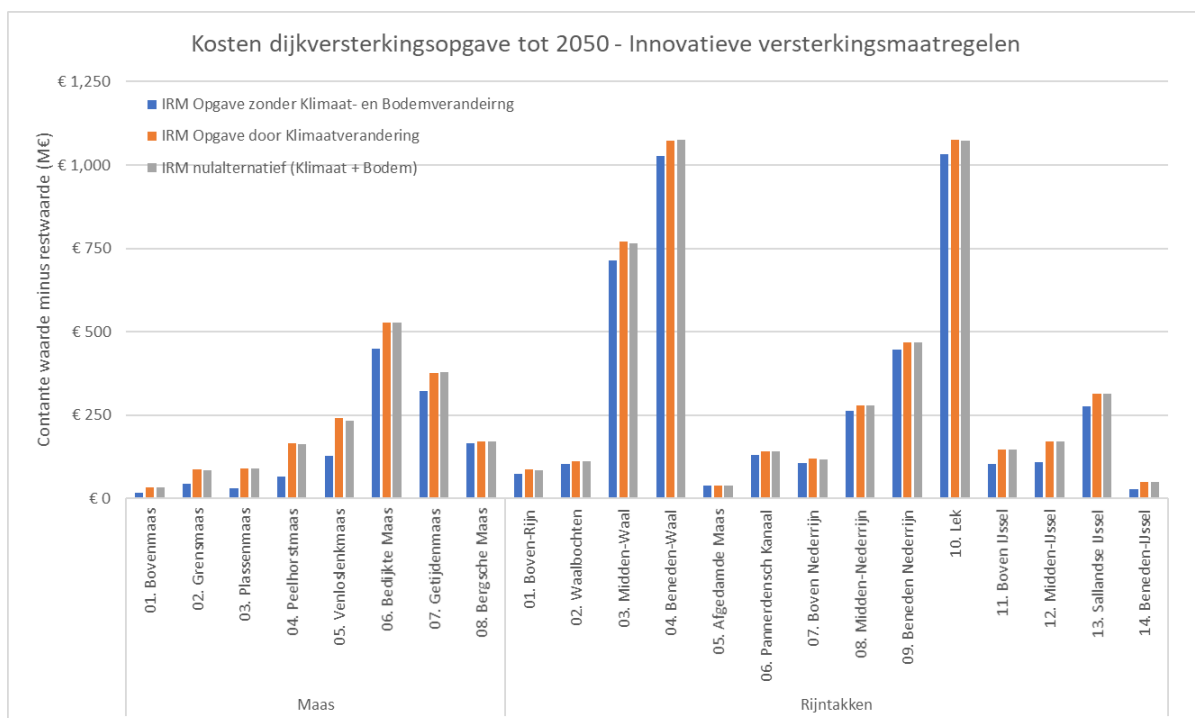
Kosten dijkversterking

In Figuur 8.11 zijn de totale geraamde versterkingskosten per IRM traject gepresenteerd tot 2050. In Tabel 8.3 worden de totaal geraamde kosten voor de Maas en Rijntakken weergegeven voor de drie berekeningen. In Tabel 8.4 wordt er in meer detail ingegaan op het de dijkversterkingskosten en wordt een overzicht gegeven van de totale versterkingskosten in relatie tot de gemiddelde opgave per faalmechanisme per IRM-traject tot 2050. De totale geraamde versterkingskosten voor het nulalternatief komen uit op 7,1 miljard euro waarvan 1,7 miljard voor de Maas en 5,4 miljard voor de Rijntakken inclusief de IJVD (Tabel 8.3).

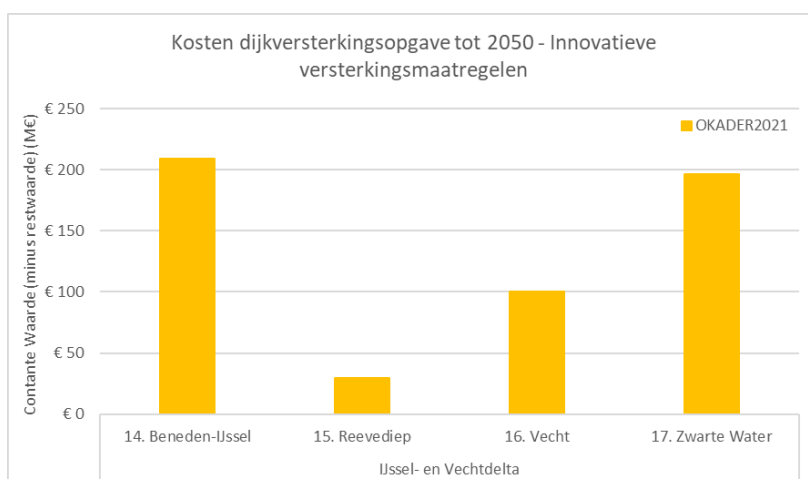
Tabel 8.3 Versterkingskosten (M€) voor de Maas en Rijntakken over de drie doorgerekende sommen

Opgave	Maas (M€)	Rijntakken (M€)	Totaal (M€)
Zonder verandering in klimaat- en rivierbodempligging	1231	4992	6223
Met klimaatverandering (zonder bodemverandering)	1692	5384	7076
IRM nulalternatief (klimaat- en bodemverandering)	1683	5376	7059

Ongeveer 88% van de kosten worden veroorzaakt door de opgave die voortvloeit uit de strengere normen en de nieuwe rekenregels voor piping en macrostabiliteit. 12% van de kosten hangen samen met klimaatverandering en bodempligging. Veranderingen in rivierbodempligging leiden tot een besparing op de kosten van dijkversterking (minder dan 1%). Eenvoudiger verwoord: wanneer een dijk toch versterkt moet worden, en zeker wanneer daarbij gekozen wordt voor een constructieve maatregel, dan maakt het in de kosten niet zo veel uit of de dijk nog iets hoger moet worden gemaakt om rekening te houden met klimaatverandering of verandering in rivierbodempligging.



Figuur 8.11 Kosten dijkversterking tot 2050 wanneer gebruikt gemaakt wordt van innovatieve versterkingsmaatregelen.



Figuur 8.12 Kosten dijkversterking IRM trajecten behorend bij IJVD tot 2050. De resultaten zijn overgenomen uit eerdere berekeningen (OKADER2021). Let op andere Y-as schaal vergeleken met Figuur 8.11.

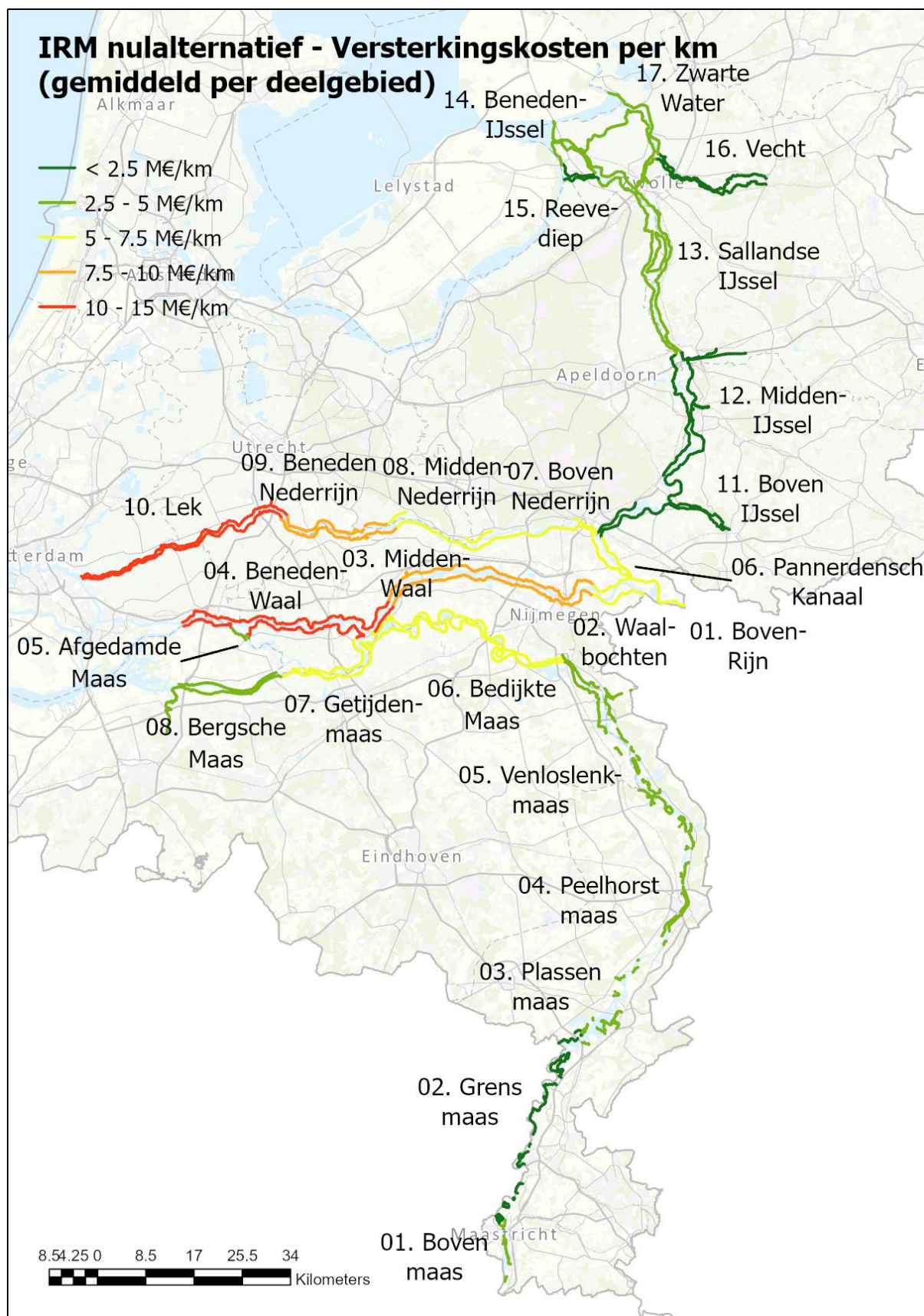
Tabel 8.4 Overzicht versterkingskosten tot 2050 en gemiddelde versterkingsopgave per faalmechanisme per IRM traject excl. IJssel- en Vechtdelta (IRM-nulalternatief).

	Versterkingskosten (M€)	Hoogteopgave (m)	Macrostabieleit (m)	Piping (m)
Maas	1680			
Bovenmaas	30	0,7	0	0
Grensmaas	80	0,3	0	1

	Versterkingskosten (M€)	Hoogteopgave (m)	Macrostabieliteit (m)	Piping (m)
Plassenmaas	90	0,4	0	0
Peelhorstmaas	160	0,9	0	2
Venloslenkmaas	230	0,4	2	12
Bedijkte Maas	530	0,5	16	52
Getijdenmaas	380	0,5	14	54
Bergsche Maas	170	0,1	15	58
Rijn	5380			
Boven-Rijn	80	0,4	9	29
Waalbochten	110	0,2	24	93
Midden-Waal	770	0,6	24	>100
Beneden-Waal	1080	0,6	23	>100
Afgedamde Maas	40	0,3	14	66
Pannerdensch Kanaal	140	0,1	20	45
Boven-Nederrijn	120	0,1	14	32
Midden-Nederrijn	280	0	18	38
Beneden-Nederrijn	470	0,1	11	70
Lek	1070	0,1	17	66
Boven IJssel	150	0,2	7	7
Midden-IJssel	170	0,2	8	2
Sallandse IJssel	310	0,1	14	9
Beneden-IJssel	50	0,2	1	2
Beneden-IJssel (resterend IJVD**)	210	0,7	8	12
Reevediep	30	0,3	24	3
Vecht	100	0,3	2	9
Zwarte Water	200	0,3	13	22
Totaal IRM nulalternatief	7060			

** Beneden-IJssel benedenstrooms van lijn Zalk-Westenholte is ontleend aan berekeningen IJVD

In Figuur 8.13 zijn de gemiddelde kosten per kilometer per IRM-traject weergegeven. Het algemene beeld is dat de versterkingskosten per kilometer dijk toenemen in benedenstroomse richting. Deze toename wordt toegeschreven aan de combinatie van een relatief grote versterkingsopgave en het gebrek aan ruimte, waardoor vaker gebruik moet worden gemaakt van constructies.



Figuur 8.13 Versterkingskosten per kilometer gemiddeld per IRM deelgebied

8.3.4

Effect klimaatverandering en verandering in rivierbodempligging

In Figuur 8.4, Figuur 8.7, Figuur 8.9 en Figuur 8.11 is het effect van klimaat- en bodemverandering apart in beeld gebracht. Voor alle drie de versterkingsopgaven is het effect van klimaatverandering veel groter dan het effect van de bodemverandering. Het verschil met het referentiescenario (IRM referentie 2018 waarbij geen rekening is gehouden met klimaatverandering en veranderingen in rivierbodempligging) en het nulalternatief is voor de macrostabiliteit- en pipingopgave kleiner dan voor de hoogteopgave. Dit komt doordat de macrostabiliteit- en pipingopgave in veel mindere mate beïnvloed worden door de waterstand.

Klimaatverandering betekent dat de kans op extreme afvoeren zal toenemen. Dit zorgt voor hogere waterstanden die vaker voorkomen, wat weer resulteert in hogere belasting op de dijk. Klimaatverandering zorgt er bovendien voor dat de kering eerder wordt afgekeurd waarna de versterking uitgevoerd dient te worden.

De verandering in rivierbodempligging zorgt in met name de boven- en middenloop van de Rijnakken en Maas voor lagere waterstanden (Figuur 8.1 en Figuur 8.3), wat resulteert in lagere belastingen. In de benedenloop, waar netto sedimentatie plaatsvindt, worden de waterstanden juist hoger. Dit is in Figuur 8.4 goed terug te zien in de grotere hoogteopgave van de Getijden- en Bergsche Maas en op de Rijnakken op de Beneden-Waal, Lek en Sallandse IJssel. Erosie van het zomerbed beperkt de versterkingsopgave op veel trajecten enigszins. Zolang de rivierbodemerossie geen negatieve invloed heeft op de stabiliteit van de kering, heeft de rivierbodemerossie een gunstig effect voor de hoogwaterbescherming. Tabel 8.5 geeft een overzicht van de verschillen in versterkingskosten en van de verschillen in versterkingsopgaven per faalmechanisme wanneer behalve met klimaatverandering ook rekening wordt gehouden met veranderingen in rivierbodempligging. Op de Maas nemen de totale kosten met 8,7 mln. euro af. Op de Rijnakken bedraagt de totale kostenbesparing als gevolg van doorgaande erosie in het zomerbed 7,8 mln. euro. Aangezien de totale versterkingskosten voor de keringen langs de Maas uitkomen op 1,7 miljard euro en langs de Rijn op 4,8 miljard euro, is de kostenbesparing door de verandering in rivierbodempligging minder dan 1%.

Tabel 8.5 De effecten van bodemverandering op de dijkversterkingskosten en versterkingsopgave t.o.v. situatie met alleen klimaatverandering (2050). Een negatieve opgave betekent een kleinere versterkingsopgave als gevolg van bodemverandering. De absolute kosten en versterkingsopgave zijn weergegeven in Tabel 8.4.

	Kostenbesparing rivierbodemerisatie		Hoogteopgave ¹⁹		Macrostabiliteit ¹⁹		Piping ¹⁹	
	M€	%	m	%	m	%	m	%
Maas	-8,7	-0,5%						
Bovenmaas	-0,1	-0,3%	0,00	-0,5%	0,00	0,0%	0,00	-1,1%
Grensmaas	-3,5	-4,2%	-0,03	-8,6%	-0,01	-7,3%	-0,03	-4,6%
Plassenmaas	-0,6	-0,6%	-0,03	-7,3%	0,00	-4,9%	0,00	0,0%
Peelhorstmaas	-1,2	-0,7%	-0,05	-5,8%	-0,03	-7,7%	-0,05	-3,0%
Venloslenkmaas	-6,7	-2,8%	-0,02	-4,9%	-0,01	-0,4%	-0,13	-1,2%
Bedijkte Maas	-0,8	-0,1%	-0,01	-1,4%	-0,05	-0,3%	-0,20	-0,4%
Getijdenmaas	3,5	0,9%	0,04	7,3%	0,08	0,5%	1,40	2,6%
Bergsche Maas	0,7	0,4%	0,00	8,4%	0,26	1,7%	0,59	1,0%
Rijn	-7,8	-0,2%						
Boven-Rijn	-2,0	-2,4%	-0,05	-13,4%	-0,13	-1,5%	-3,06	-10,6%
Waalbochten	0,3	0,2%	-0,09	-48,5%	-0,16	-0,7%	-5,65	-6,1%
Midden-Waal	-4,7	-0,6%	-0,04	-6,9%	-0,06	-0,2%	-1,58	-1,6%
Beneden-Waal	0,8	0,1%	0,01	1,5%	0,01	0,1%	0,37	0,4%
Afgedamde Maas	0,0	0,1%	0,00	0,8%	0,03	0,2%	0,10	0,1%
Pannerdensch Kanaal	-0,9	-0,6%	-0,02	-14,8%	-0,13	-0,6%	-0,89	-2,0%
Boven Nederrijn	-0,3	-0,2%	0,00	-0,9%	-0,02	-0,1%	0,05	0,1%
Midden-Nederrijn	0,8	0,3%	0,00	9,8%	-0,02	-0,1%	0,38	1,0%
Beneden Nederrijn	0,9	0,2%	0,00	1,9%	-0,02	-0,1%	0,28	0,4%
Lek	-1,8	-0,2%	-0,01	-4,7%	-0,04	-0,3%	-0,33	-0,5%
Boven IJssel	-0,7	-0,5%	-0,01	-3,6%	-0,02	-0,2%	-0,09	-1,3%
Midden-IJssel	-0,2	-0,1%	0,00	-0,9%	-0,03	-0,4%	-0,01	-0,5%
Sallandse IJssel	-0,2	-0,1%	0,00	5,0%	-0,03	-0,2%	0,16	1,9%
Beneden-IJssel	0,0	-0,1%	0,00	-0,6%	0,00	0,0%	-0,01	-0,6%
Totaal IRM nulalternatief	-16,5	-0,3%						

¹⁹ Percentage voor versterkingsopgave op de Maas kunnen een vertekend beeld geven omdat voor veel versterkingsopgave de absolute opgave nagenoeg 0 is (Tabel 8.4). Tevens zijn de faalmechanisme macrostabiliteit en piping weinig gevoelig voor kleine waterstandsdalingen.

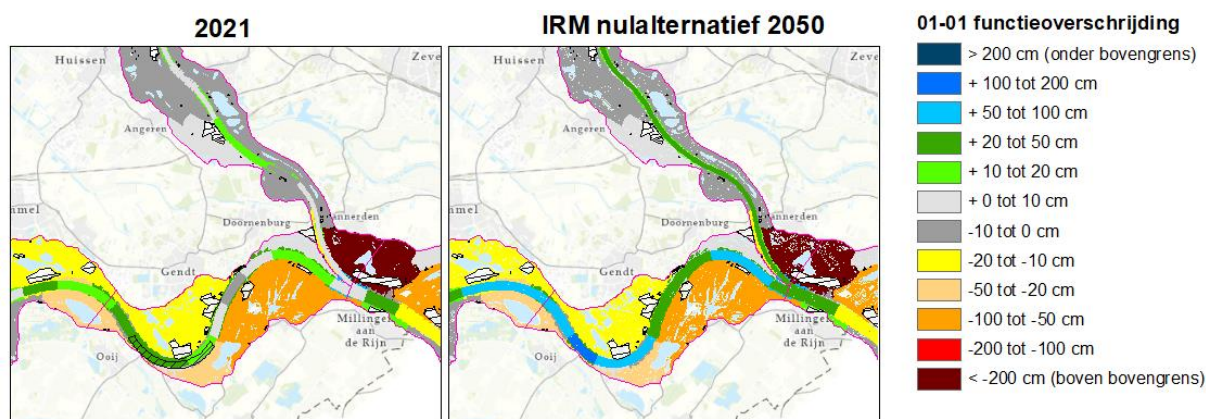
8.3.5

Aanvullende bevindingen BRL

In de BRL wordt gekeken of de rivierbodempligging (zomerbed en winterbed) lager is dan de bodempligging die is aangenomen bij het berekenen van de hydraulische belastingen voor WBI2017²⁰. Wanneer de bodem hoger ligt kan dit leiden tot hogere waterstanden dan de waterstanden waarop de dijken getoetst of ontworpen worden, waardoor de veiligheid in het geding komt. De bodempligging in 2021 en bij het nulalternatief IRM in 2050 worden dus vergeleken met de WBI2017 bodempligging.

Figuur 8.14 toont in de linker figuur de vergelijking met de huidige rivierbodempligging voor de trajecten nabij de Pannerdensch Kop. In het zomerbed is vooral sprake van grijze en groene tinten. Dit betekent dat de bodempligging ongeveer gelijk is of iets lager ligt dan de bodem die gebruikt is in de modellen voor WBI2017. In de uiterwaarden komen echter ook gele en oranje tinten voor. Dat duidt er op dat de bodempligging daar nu hoger is dan is aangenomen in WBI2017. Bij de Gendtse waard (ten zuiden van Gendt) is het verschil beperkt tot 1 à 2 decimeter, maar bij Kijfwaard (de bruine vlek in Figuur 8.14 ten noordoosten van de Pannerdensch Kop) bedraagt het gemiddelde verschil meer dan 2 m. Dit komt waarschijnlijk doordat in het WBI model is aangenomen dat hier rivierverruiming plaatsvindt, terwijl deze ingreep nog niet is uitgevoerd (er worden plassen gegraven met een diepte van ongeveer 20 m).

Bij het nulalternatief IRM neemt de ruimte in het zomerbed toe als gevolg van doorgaande rivierbodemerodie. Op locaties waar sprake is van aanzanding neemt de beschikbare ruimte juist af. Bij de BRL is bij het nulalternatief geen rekening gehouden met veranderingen in het winterbed. Daarom kleuren de Millingerwaard en de Kijfwaard nog steeds oranje en bruin.



Figuur 8.14 De ruimte tussen de aanwezige bodempligging en de WBI2017 bodempligging (die gebruikt is om de hydraulische belastingen op de dijken te berekenen). Links voor de huidige situatie (bodempligging 2021) en rechts voor de bodempligging volgens het IRM nulalternatief in 2050. Negatieve waarden geven aan dat de bodem hoger ligt dan de WBI2017 bodempligging.

De BRL kijkt ook naar de stabiliteit van keringen. Het grondmassief dat binnen de keurzone en beschermingszone van de waterschappen of Rijkswaterstaat nodig is voor de stabiliteit van de waterkering moet stabiel blijven. Dit betekent dat voor bijvoorbeeld de aanleg van nieuwe nevengeulen rekening gehouden moet worden met extra versterkingen zodat de nevengeulen niet tot instabiliteit van de keringen leiden.

²⁰ Deze bodempligging is aangehouden omdat de productiesommen voor WBI2023 nog moeten worden uitgevoerd.

2021

IRM nulalternatief 2050

01-02 functieoverschrijding

Dark Blue	> +200 cm (boven ondergrens)
Blue	+101 t/m +200 cm
Light Blue	+51 t/m +100 cm
Green	+21 t/m +50 cm
Light Green	+11 t/m +20 cm
White	+1 t/m +10 cm
Grey	-9 t/m 0 cm
Yellow	-19 t/m -10 cm
Orange	-49 t/m -20 cm
Dark Orange	-99 t/m -50 cm
Red	-199 t/m -100 cm
Dark Red	< -200 cm (onder ondergrens)

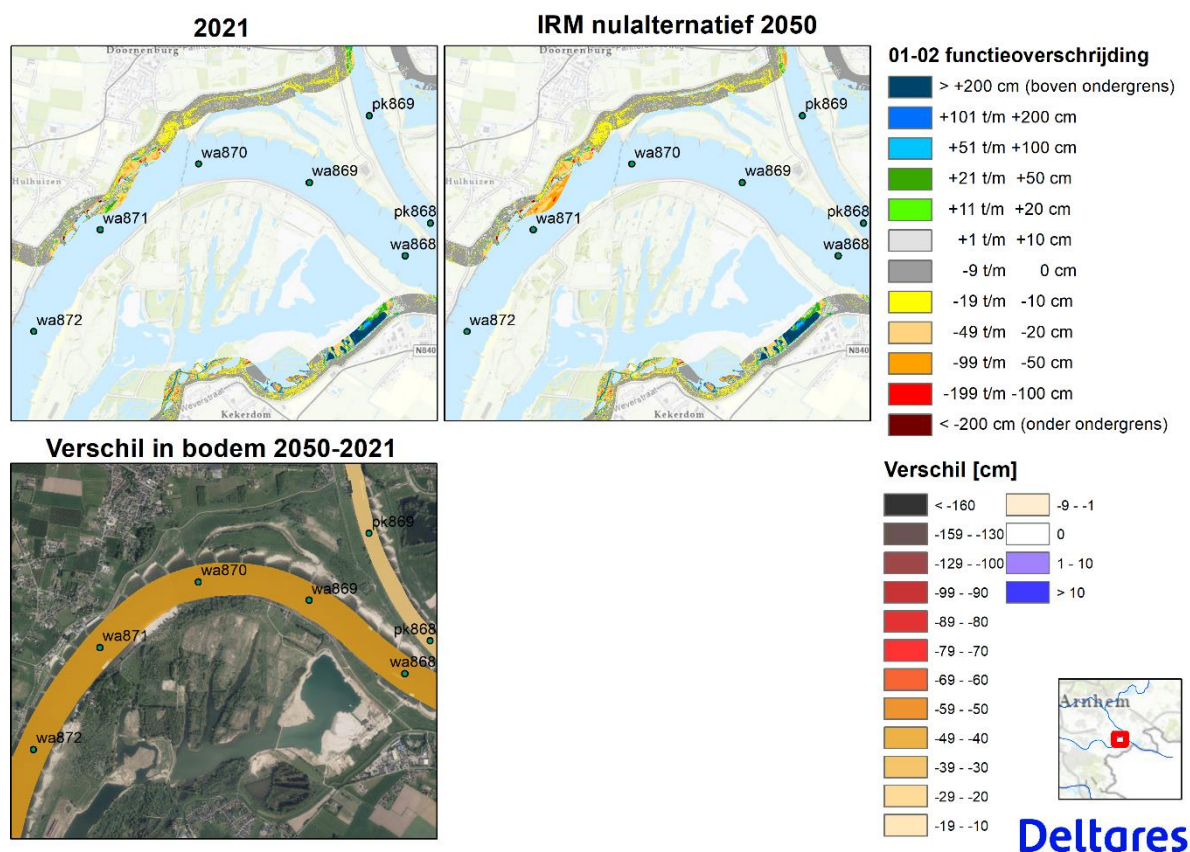
Verskil in bodem 2050-2021

Verskil [cm]

Dark Red	< -160	Light Yellow	-9 - -1
Red	-159 - -130	White	0
Dark Red	-129 - -100	Purple	1 - 10
Red	-99 - -90	Blue	> 10
Dark Red	-89 - -80		
Red	-79 - -70		
Dark Red	-69 - -60		
Red	-59 - -50		
Dark Red	-49 - -40		
Red	-39 - -30		
Dark Red	-29 - -20		
Red	-19 - -10		

Deltares

123 van 227



Figuur 8.16 De ruimte tussen de actuele bodem van 2021 (links) en de bodemligging volgens het IRM nulalternatief in 2050 (rechts) en de ondergrens zoals opgesteld voor de stabiliteit van de primaire keringen. Positieve waarden (groen en blauw) duiden op ruimte terwijl de oranje en rode kleuren duiden op een te lage ligging (functieoverschrijding) waardoor de stabiliteit van de kering mogelijk in gevaar is.

8.4 Conclusies

In de huidige effectbepaling is gekeken naar de dijkversterkingen die nodig zijn om in 2050 aan de beschermingsnormen te voldoen. Daarbij is gekeken naar het effect van de veranderingen in rivierbodempligging en klimaatverandering afzonderlijk en in combinatie. De belangrijkste conclusies zijn als volgt:

- De dijkversterkingsopgave voor het nulalternatief IRM wordt grotendeels bepaald door het op orde komen voor de nieuwe normering in combinatie met klimaatverandering. De verandering in rivierbodempligging speelt slechts een heel kleine rol.
- De verandering in rivierbodempligging leidt tot iets lagere kosten voor dijkversterking door de verlaagde waterstanden, waardoor de dijken iets minder hoog hoeven te worden. Het effect op de macrostabiliteit- en pipingopgave is minimaal omdat deze twee opgave niet/nauwelijks afhankelijk zijn van de waterstand. De kostenbesparing als gevolg van de doorgaande rivierbodemosie is echter minder dan 1% op de totale kosten voor hoogwaterbescherming in het IRM-gebied.

9 Discussie

Deze discussie bestaat uit twee delen. Het eerste deel gaat in op de gevoeligheid van de resultaten voor de veronderstelde veranderingen in klimaat, socio-economische ontwikkelingen en rivierbodempligging. Het tweede deel van de discussie gaat in op mogelijke effecten die een verandering in rivierbodempligging kan hebben, maar die niet tot uiting komen in de verkende functies. Denk hierbij aan de kans dat kabels en leidingen bloot komen te liggen, of de kans dat kunstwerken instabiel worden.

9.1 Gevoeligheidsanalyse rond klimaatscenario's

9.1.1 Inleiding

Bij de effectbepaling van het nulalternatief IRM is voor klimaatverandering, demografische en economische ontwikkelingen uitgegaan van het Deltascenario Stoom. Dit scenario combineert relatief snelle klimaatverandering met sterke economische groei. In deze paragraaf geven we aan wat de effecten zouden zijn in een andere scenario.

Het Deltaprogramma werkt met vier scenario's: Druk, Stoom, Rust en Warm (zie Tabel 9.1 voor de karakteristieken). Het scenario Stoom is het meest extreme scenario. Het gaat uit van snelle klimaatverandering en sterke economische groei. Het scenario Rust is het meest gematigde scenario. Dit scenario combineert langzame klimaatverandering met een bescheiden economische groei en een daling van het aantal inwoners.

Tabel 9.1 Kengetallen klimaat en veranderingen afvoerregimes Rijn en Maas per scenario voor de zichtjaren 2050 en 2085. Kengetallen sociaal-economische ontwikkelingen voor 2050. Voor 2050 zijn enkele vergelijkende getallen van de Deltascenario's van 2013 weergegeven. Bron: Wolters et al. (2018)

KLIMAAT		Zichtjaar 2050 Deltascenario's 2017 (KNMI14)						Zichtjaar 2085 Deltascenario's 2017 (KNMI14)						Ter vergelijking: Zichtjaar 2050 Deltascenario's 2013 (KNMI06)			
scenario	REF'17	DRUK	STOOM	RUST	WARM	DRUK-Parijs		DRUK	STOOM	RUST	WARM			DRUK	STOOM	RUST	WARM
onderliggend KNMI-scenario		GL	WH	GL	WH	GL		GL	WH	GL	WH			G	W+	G	W+
temperatuurstijging °C	0	1	2	1	2	1		1,5	3,5	1,5	3,5			1	2	1	2
zeespiegelstijging cm	0	15	40	15	40	15		25	80	25	80			15	35	15	35
jaarseerslagsom mm	851	+4%	+5%	+4%	+5%	+4%		+5%	+7%	+5%	+7%			+4%	+14%	+4%	+14%
gem. neerslag winter mm	211	+3%	+17%	+3%	+17%	+3%		+5%	+30%	+5%	+30%						
gem. neerslag lente mm	173	+5%	+9%	+5%	+9%	+5%		+8%	+12%	+8%	+12%						
gem. neerslag zomer mm	224	+1%	-13%	+1%	-13%	+1%		+1%	-23%	+1%	-23%			+3%	-19%	+3%	-19%
gem. neerslag herfst mm	245	+7%	+8%	+7%	+8%	+7%		+8%	+12%	+8%	+12%						
jaarsom pot. verdamping mm	559	+3%	+7%	+3%	+7%	+3%		+3%	+10%	+3%	+10%						
pot.verdamping zomer mm	266	+4%	+11%	+4%	+11%	+4%		+4%	+15%	+4%	+15%			+3%	+15%	+3%	+15%
herhalingstijd van een Rijnafvoer van jaar 14400 m3/s *	1250	200	200	200	200	200		200	100	200	100			ca 1000	ca 400	ca 1000	ca 400
verandering gemiddelde jaarlijkse % laagste 7-daagse Rijnafvoer *	0	+5%	-20%	+5%	-20%	+5%		+5%	-30%	+5%	-30%			+5%	-20%	+5%	-20%
herhalingstijd van een Maasafvoer jaar van 3900 m3/s **	1250	300	300	300	300	300		300	100	300	100			ca 1000	ca 400	ca 1000	ca 400
verandering gemiddelde jaarlijkse % laagste 7-daagse Maasafvoer **	0	+5%	-45%	+5%	-45%	+5%		+3%	-60%	+3%	-60%			+3%	-30%	+3%	-30%
SOCIAAL-ECONOMIE																	
scenario	REF'17	DRUK	STOOM	RUST	WARM	Parijs		voor 2085/2100 geen WLO-scenario's beschikbaar						DRUK	STOOM	RUST	WARM
onderliggend WLO-scenario		WLO-H	WLO-H	WLO-L	WLO-L	WLO-H											
aantal inwoners miljoen	17	19	19	16	16	19								20	20	15	15
omvang BBP miljard €	600	1320	1320	940	940	1320								1600	1600	900	900
economische groei %/j		2	2	1	1	2								2,5	2,5	1	1
stedelijk gebied % opp	18	20	21	18	18	20								23	25	21	21
natuur en recreatie % opp	23	26	25	24	24	27								22	20	20	19
landbouw % opp	60	54	54	58	57	53								51	51	56	56

9.1.2 Rivierafvoer, afvoerverdeling en waterstanden

Bij het nulalternatief is gebruik gemaakt van het Deltascenario Stoom. Voor klimaatverandering gaat dit scenario uit van het scenario $W+/W_{Hdry}$. Figuur 9.1 laat de effecten van dit klimaatscenario zien op de gemiddelde rivierafvoeren (maandgemiddelden). Figuur 9.2 laat zien hoe de overschrijdingskans van verschillende afvoerniveau's op de Rijn en de Maas veranderen. Beide figuren tonen de resultaten voor het extremere scenario W_{Hdry} en voor het gematigdere scenario G_L . Het volgende valt op:

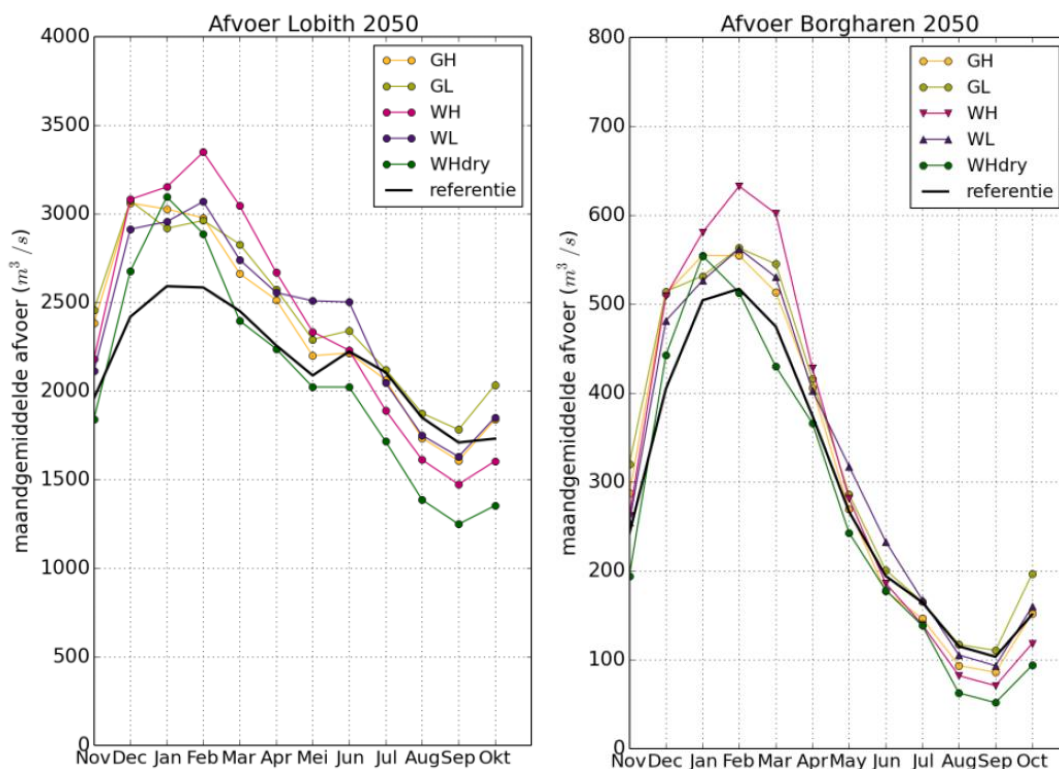
- De gemiddelde afvoer in de winter wordt bij alle scenario's hoger, maar de kans op zeer hoge maandgemiddelde afvoeren is bij W_{Hdry} iets kleiner dan bij het gematigde klimaatscenario G_L , zie ook Figuur 9.2²¹.
- De voorjaarsafvoer (en daarmee de voorjaarswaterstanden) veranderen bij het scenario W_{Hdry} nauwelijks, bij het G_L -scenario is met name op de Rijn een toename te zien.
- Aan het einde van de zomer neemt de afvoer bij het W_{Hdry} scenario sterk af. Bij het G_L -scenario is geen afname, of zelfs een zeer beperkte toename, te zien.

Het klimaatscenario heeft geen invloed heeft op de berekende afvoerverdeling en waterstanden.

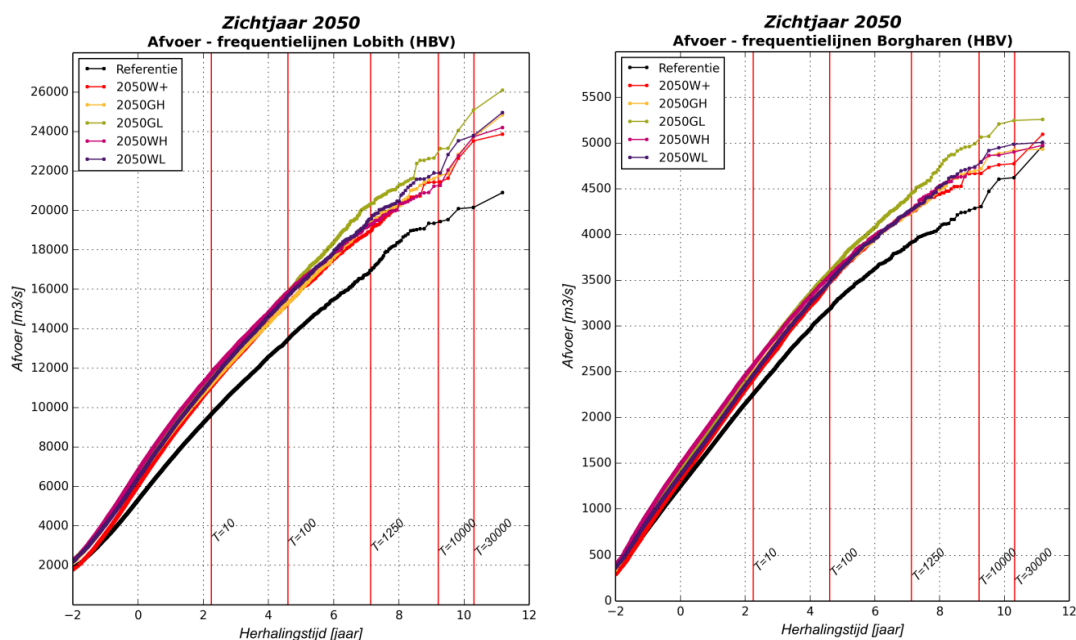
In dit hoofdstuk beschrijven we (op basis van expert kennis en eerder uitgevoerde studies) hoe de effecten van het nulalternatief IRM er uit zouden kunnen zien wanneer gebruik zou worden gemaakt van het scenario G_L in plaats van W_{Hdry} ²².

²¹ Bij de KNMI'06 scenario's die voor de functie waterveiligheid worden gebruikt, is het beeld omgekeerd: bij het $W+$ scenario neemt de kans op hoogwater meer toe dan bij het G -scenario, zie ook het rechter deel in Tabel 9.1.

²² Voor de Rijntakken wordt gewerkt aan een uitgebreidere gevoeligheidsanalyse, waarbij ook het effect van een andere bodemligging wordt doorgerekend. De resultaten zullen in het najaar van 2022 worden gerapporteerd in Asselman et al. (in voorber.).



Figuur 9.1 Afvoerregime van de Rijn (links) en de Maas (rechts) in de KNMI'14 scenario's in vergelijking met het huidige afvoerregime (in zwart). Bron: Klijn et al. (2015)



Figuur 9.2 Ontwikkeling van de relatie tussen overschrijdingsfrequentie en mogelijke afvoer op de Rijn te Lobith (links) en de Maas te Borgharen (rechts). Bron: Klijn et al. (2015)

Huidige situatie

Op basis van overstromingsduren is bij de effectbepaling natuur geconcludeerd dat de uiterwaarden langs de Rijntakken geschikt zijn voor zachthout- en hardhoutooibos en, afhankelijk van het beheer, ook voor nat en droog grasland. De uiterwaarden langs de Maas liggen veelal te hoog, waardoor ze nauwelijks overstromen. Hier zal dus vooral sprake zijn van 'natuur langs de rivier', maar niet van riviernatuur.

Op basis van de nu beschikbare grondwaterstandsregels, zijn de uiterwaarden langs de Rijn en de Maas echter vooral geschikt voor de droge ecotooptypen (droog grasland en hardhoutooibos). Op basis van de voorjaarsgrondwaterstanden (GVG) kan in vergraven uiterwaarden lokaal ook zachthoutooibos of nat grasland voorkomen. De oppervlaktes zijn echter zeer beperkt.

Met betrekking tot de doorstroming van nevengeulen is geconcludeerd dat nevengeulen op veel ORM-trajecten nu al onvoldoende vaak mee stromen. Dit is onder meer het geval langs de Venloslenk-Maas, de Waalbochten en de Boven-IJssel.

Klimaatscenario W_{Hdry}

Het scenario W_{Hdry} resulteert in een beperkte toename van de overstromingsduur (de kans op hoogwater neemt toe, zie ook Tabel 9.1 en Figuur 9.2). Omdat doorgaande rivierbodemerisatie resulteert in een beperkte afname van de overstromingsduur, is de netto verandering in overstromingsduur in de uiterwaarden langs Rijntakken en Maas beperkt. Daarmee is het effect op de natuur eveneens beperkt.

Veranderingen in grondwaterstand door doorgaande rivierbodemerisatie hebben nauwelijks effect op de ecotooppotentie: op basis van de beschikbare grondwaterrekenregels zijn de uiterwaarden nu en bij het scenario W_{Hdry} vooral geschikt voor hardhoutooibos en droog grasland (ze zijn nu al te droog voor veel natte ecotopen en dat wordt in de toekomst nog erger).

In de vrij-afstromende rivieren wordt de doorstroming van nevengeulen bij het nulalternatief ORM in 2050 slechter. Dit komt door klimaatverandering (vaker en langduriger laagwater), maar wordt verergerd door doorgaande rivierbodemerisatie (nog verdere daling van de waterstanden).

Klimaatscenario G_L

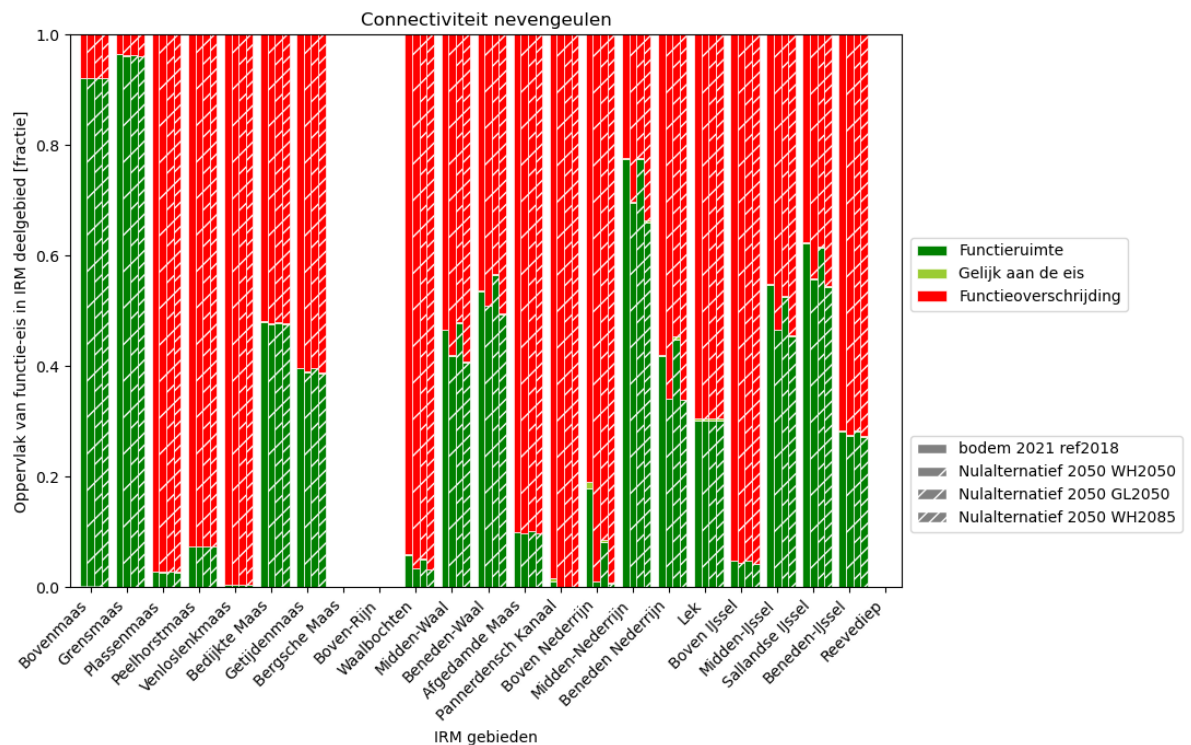
Bij de KNMI'14 scenario's is de verandering in overstromingsduur bij het klimaatscenario G_L nog iets groter dan bij het scenario W_{Hdry} ²³. Ofwel: wanneer voor natuur gebruik zou worden gemaakt van het gematigdere klimaatscenario, dan zou dat kunnen resulteren in een beperkte toename van de overstromingsduur en daarmee tot een beperkte toename van het areaal zachthoutooibos.

De kans op laagwater is bij het G_L -scenario veel kleiner dan bij scenario W_{Hdry} . De laagste 7-daagse afvoer neemt bij het scenario W_{Hdry} af met 20% op de Rijn en zelfs met 45% op de Maas. Bij scenario G_L neemt de laagste 7-daagse afvoer op beide rivieren juist met 5% toe. Dit heeft vooral effect op de lage grondwaterstanden aan het einde van de zomer en alleen langs ongestuwde riviertrajecten.

²³ Wanneer we voor de functie natuur gebruik zouden hebben gemaakt van de KNMI'06 scenario's (zoals we dat hebben gedaan voor de functie waterveiligheid), dan zou het verschil in overstromingsduur tussen Stoom en Rust veel groter zijn geweest. Zie het rechterdeel in Tabel 9.1.

Deze zullen bij het scenario G_L minder ver uitzakken. Voor de natuur zijn echter vooral de voorjaarsgrondwaterstanden van belang. Bij klimaatscenario G_L zijn de voorjaarsafvoeren en -rivierwaterstanden hoger dan bij klimaatscenario W_{Hdry} . Dit zou betekenen dat de voorjaarsgrondwaterstanden bij het scenario G_L omhoog gaan. Dit kan het effect van de doorgaande rivierbodemerose compenseren. Op trajecten waar geen rivierbodemerose plaatsvindt gaan de grondwaterstanden zelfs omhoog. Dit is gunstig voor de nattere ecotopen. Echter, volgens de gebruikte grondwatermodellen en de beschikbare grondwaterstandsregels zal een veel grotere stijging van het grondwater nodig zijn om de grondwaterstanden in het optimale bereik te krijgen voor de nattere ecotooptypen. Met andere woorden: de verwachting is dat de uiterwaarden ook bij het scenario G_L vooral geschikt zijn voor de drogere ecotooptypen (hardhoutoibos en droog grasland).

Met betrekking tot de doorstroming van bestaande nevengeulen wordt opgemerkt dat de negatieve effecten van rivierbodemerose iets worden gecompenseerd door een toename van de laagste afvoeren. De verslechtering van de doorstroming zal bij scenario G_L dus minder groot zijn dan bij scenario W_{Hdry} . Dit blijkt ook uit Figuur 9.3. Wanneer we bijvoorbeeld kijken naar de doorstroming van nevengeulen langs de Midden-IJssel dan valt op dat bij doorgaande bodemerose in combinatie met het huidige klimaat bijna de helft van de nevengeulen onvoldoende vaak mee stroomt. Bij scenario G_L blijft dit ongeveer gelijk. Bij het scenario W_{Hdry} neemt het aantal nevengeulen dat aan de eis voldoet verder af. Bij W_{Hdry} zichtjaar 2085 is dit nog iets sterker het geval dan bij het zichtjaar 2050.

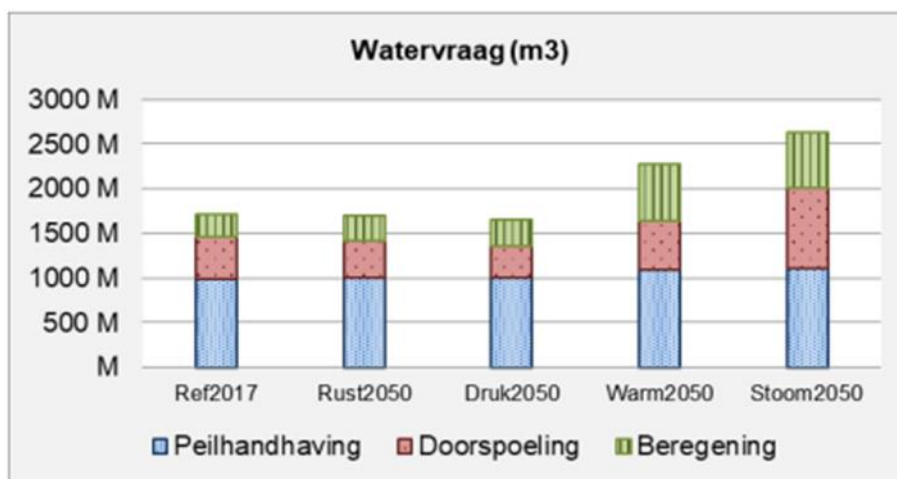


Figuur 9.3 Verandering in doorstroming van nevengeulen bij doorgaande rivierbodemerose (bodemplugging in 2050) uitgaande van het huidige klimaat en van de scenario's W_{Hdry} en G_L (beide in zichtjaar 2050) en W_{Hdry} in zichtjaar 2085.

9.1.4

Zoetwaterbeschikbaarheid

Voor de effectbepaling op de functie zoetwaterbeschikbaarheid is gekeken naar de kans op watertekorten in Noord- en West-Nederland. De kans op een watertekort is echter niet alleen afhankelijk van de wateraanvoer, maar ook van de watervraag. De watervraag in het IJsselmeergebied (regio Noord) is te zien in Figuur 9.4. De figuur laat zien dat de watervraag van regio Noord in scenario Rust in een T=50 jaar nauwelijks verandert, eerder afneemt. Dit in tegenstelling tot scenario Stoom, waarbij de watervraag in deze regio met ongeveer 50% toeneemt.



Figuur 9.4 Watervraag IJsselmeergebied in miljoen m3 in het zomerhalfjaar voor peilbeheer, doorspoeling en beregening uit het oppervlaktewater. Deze watervragen zijn weergegeven voor een T=50 jaar (1976) voor de Referentie 2017 en de scenario's Rust, Druk, Warm en Stoom voor het zichtjaar 2050. Bron: Mens et al. (2020b)

Huidige situatie

- Uit de analyses is gebleken dat er in de huidige situatie gemiddeld eens in de 50 jaar sprake zou zijn van een watertekort in Noord-Nederland van 10% van de watervraag. Met doorgaande bodemerosie blijft de kans op watertekort hetzelfde, maar nemen tekorten in extreem droge jaren wel toe.
- In de analyses voor West-Nederland is gekeken naar de kans op een watertekort met 2,5% van de watervraag. Deze kans is nu ongeveer 1:100 per jaar.
- Ook is gekeken naar verzilting. In de huidige situatie is de kans dat de chloridenorm van 200 mg/l in Krimpen a/d IJssel wordt overschreden ongeveer 1:10 per jaar.

Scenario Stoom (W_{Hdry} in combinatie met sterke economische groei)

- De kans op een watertekort in Noord-Nederland van 10% van de watervraag neemt toe van 1:50 naar 1:9 per jaar. Door rivierbodemerosie kan dit toenemen tot 1:5 per jaar.
- De kans op een watertekort van 2,5% van de watervraag in West-Nederland neemt toe van 1:100 per jaar naar 1:15 per jaar. De rivierbodempligging heeft hier nagenoeg geen invloed op (zeer klein positief effect).
- De kans dat de chloridenorm van 200 mg/l in Krimpen a/d IJssel wordt overschreden neemt toe van 1:10 per jaar naar 1:2,5 per jaar. De veranderde ligging van de rivierbodem heeft een zeer klein positief effect.

Scenario Rust (G_L in combinatie met bescheiden economische groei)

- De kans op een watertekort in Noord-Nederland van 10% van de watervraag blijft ongeveer gelijk aan de huidige kans, ongeveer 1:50 per jaar. Door rivierbodemerossie kan dit toenemen tot ongeveer 1:25 per jaar.
- De kans op een watertekort van 2,5% van de watervraag in West-Nederland blijft ook gelijk aan de kans in de huidige situatie (1:100 per jaar).
- De kans dat de chloridenorm van 200 mg/l in Krimpen a/d IJssel wordt overschreden blijft eveneens gelijk (ongeveer 1:10 per jaar).

Geconcludeerd kan worden dat bij scenario Stoom de kans op een watertekort in zowel Noord als West-Nederland fors toeneemt. Bij scenario Rust neemt de kans op watertekorten niet toe. Dit komt deels door het gematigde klimaatscenario, maar ook door de gelijkblijvende watervraag.

Bij zowel scenario Rust als Stoom, leidt doorgaande rivierbodemerossie tot een toename van de kans op een watertekort in Noord-Nederland.

9.1.5

Bevaarbaarheid

Huidige situatie

Bij de effectbepaling voor de functie bevaarbaarheid is gekeken naar de waterdiepte bij lage afvoeren. Meer specifiek is gekeken naar het aantal dagen per jaar waarop de waterdiepte minder is dan 2,8 m. Volgens internationale afspraken mag deze waterdiepte gedurende 20 dagen per jaar worden overschreden. De analyses tonen echter aan dat de waterdiepte van 2,8 m in de huidige situatie al gedurende 49 dagen per jaar wordt overschreden. Dit komt vooral door een alluviale ondiepte in de binnenbocht net benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen.

Scenario (W_{Hdry} in combinatie met sterke economische groei)

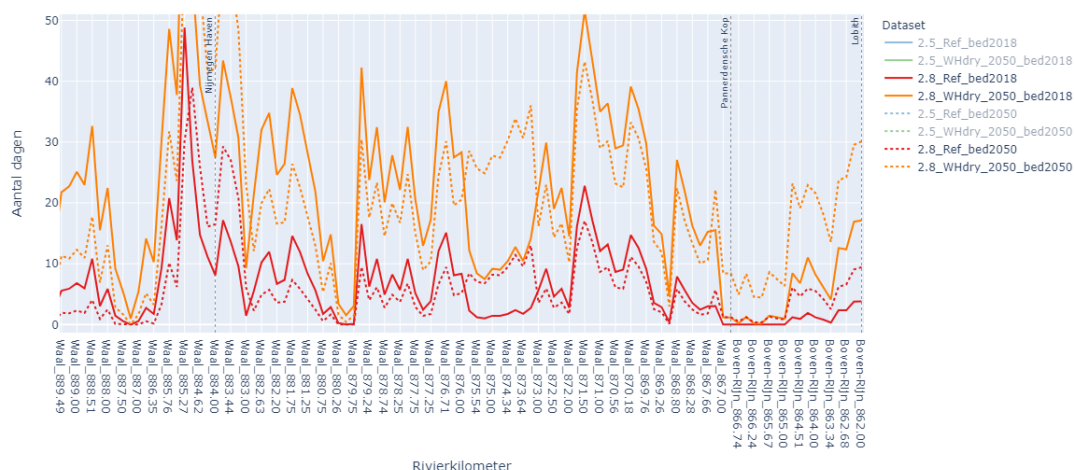
Bij scenario Stoom zal een waterdiepte van 2,8 m gedurende 85 dagen per jaar worden overschreden. Dit komt doordat de kans op laagwater fors toeneemt. De beperkte waterdiepte leidt tot een toename van het aantal benodigde vaarbewegingen en daarmee tot een toename van de vaarkosten. De grootste toename van de vaarkosten komt echter niet door klimaatverandering, maar door socio-economische ontwikkelingen: de transportvraag neemt fors toe.

Rivierbodemerossie heeft een beperkt positief effect op de bevaarbaarheid. Dit komt vooral doordat de afvoer naar de Waal iets toeneemt, wat leidt tot een beperkte toename van de waterdiepte. Het aantal dagen waarop een waterdiepte van 2,8 m op de Waal wordt overschreden bedraagt geen 85 dagen, maar 73 dagen per jaar. Op de IJssel neemt de bevaarbaarheid verder af. Echter, door het veel grotere aantal vaarbewegingen op de Waal ten opzichte van de IJssel, is (kijkend naar de waterdieptes) sprake van lichte verbetering van de bevaarbaarheid.

Scenario Rust (G_L in combinatie met bescheiden economische groei)

Bij scenario Rust blijft het aantal dagen waarop een waterdiepte van 2,8 m wordt overschreden ongeveer gelijk aan de huidige situatie. De vaarkosten blijven daardoor ook gelijk. Dit blijkt ook uit de analyses die zijn uitgevoerd voor het project Klimaatbestendig Netwerken (Rijkswaterstaat, 2022): het aantal dagen overschrijding van de waterdiepte van 2,8 m en de vaarkosten zijn bij het G_L scenario gelijk aan de huidige situatie.

Doorgaande rivierbodemerossie zal bij scenario Rust leiden tot een beperkte toename van de waterdiepte op de Waal. Het aantal dagen waarop een waterdiepte van 2,8 m wordt overschreden neemt iets af ten opzichte van de huidige situatie (zie ook Figuur 9.5).



Figuur 9.5 Langsdoorsnede van de Boven-Rijn en Boven-Waal. Weergegeven is het aantal dagen dat de gewenste waterdiepte van 2,8 m niet gehaald wordt. De rode doorgetrokken lijn geeft de huidige situatie weer. De rode stippellijn duidt op de situatie bij scenario Rust i.c.m. doorgaande rivierbodemerisatie. De oranje stippellijn toont de situatie bij scenario Stoom i.c.m. doorgaande rivierbodemerisatie.

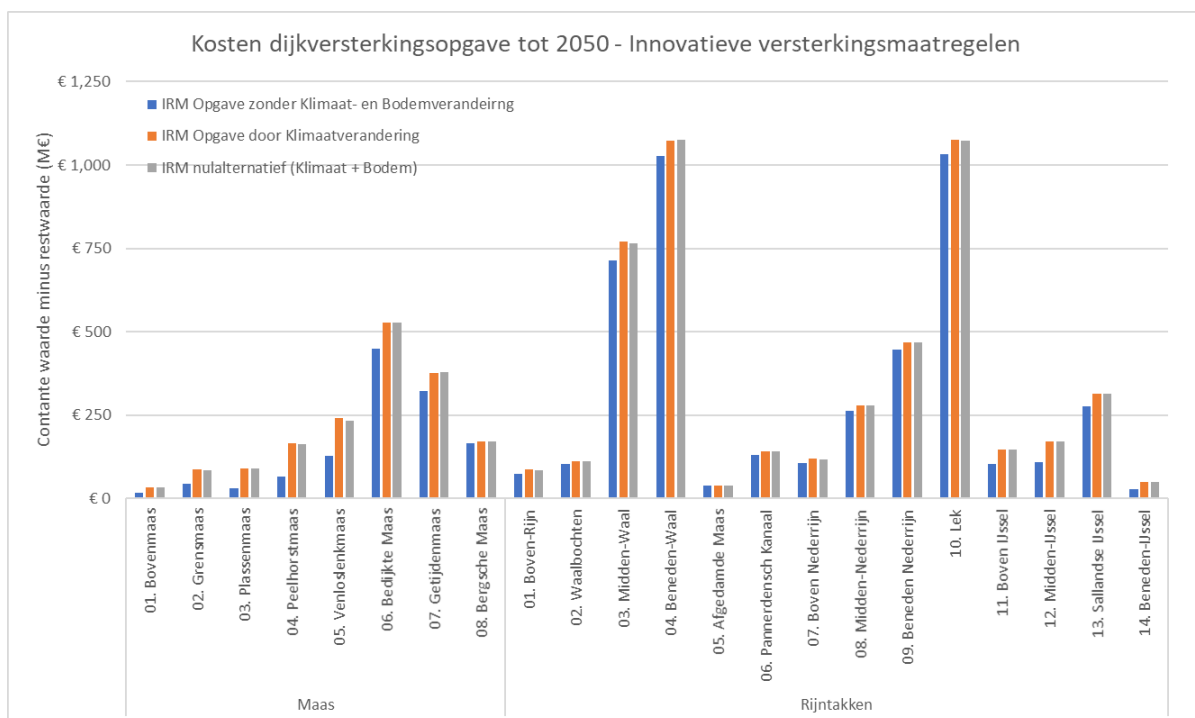
9.1.6 Waterveiligheid

Huidige situatie

Vanwege nieuwe inzichten in met name de faalmechanisme piping en macrostabiliteit in combinatie met de nieuwe (sinds 2017 van kracht zijnde) beschermingsnormen, is grootschalige dijkversterking nodig in het hele rivierengebied. Zonder rekening te houden met klimaatverandering en rivierbodemerisatie varieert de hoogteopgave van minder dan 0,1 m tot ongeveer 0,3 m. De versterkingsopgave voor macrostabiliteit en piping zijn fors. Benodigde pipingbermen van 100 m vormen met name langs de Waal geen uitzondering. De kosten voor de benodigde dijkversterkingen worden geraamd op 6,2 miljard euro (1,2 en 5,0 miljard euro voor respectievelijk de Maas en de Rijnakken).

Klimaatscenario W+

Wanneer rekening wordt gehouden met het effect van klimaatverandering, dan neemt vooral de dijkverhogingsopgave toe. In het geval van het W+ scenario varieert de hoogteopgave van 0,1 tot 0,9 m. Op de faalmechanismen piping en macrostabiliteit heeft klimaatverandering veel minder effect. De dijkversterkingskosten worden geraamd op 7,1 miljard euro. Dit is een toename van 15% ten opzichte van een situatie zonder klimaatverandering (vergelijk de blauwe en oranje balkjes in Figuur 9.6). Het effect van doorgaande erosie van het zomerbed bedraagt slechts enkele tientallen miljoenen (grijze balkjes in Figuur 9.6).



Figuur 9.6 Kosten dijkversterking tot 2050 wanneer gebruikt gemaakt wordt van innovatieve versterkingsmaatregelen (excl. IJssel-Vechtdelta).

Scenario G

Uit eerdere analyses voor het Deltaprogramma Rivieren is gebleken dat de benodigde dijkverhoging als gevolg van klimaatverandering bij het G-scenario ongeveer de helft bedraagt ten opzichte van de opgave bij het W+ scenario. Een gematigder klimaatscenario heeft nauwelijks effect op de dijkversterkingsopgave voor piping en macrostabiliteit. De dijkversterkingskosten zullen bij het scenario Rust midden tussen de blauwe en oranje balkjes in Figuur 9.6 zitten. De kosten zullen naar verwachting enkele honderden miljoenen (minder dan 10%) lager uitvallen bij het G scenario dan bij het W+ scenario.

9.2 Gevoelighedsanalyse rond rivierbodempligging

Bij de effectbepaling van het nulalternatief IRM is uitgegaan dat de rivierbodempligging verandert zoals beschreven in Sloff (2019; 2021). Om de effecten van een hogere rivierbodempligging op de functies te kwantificeren worden momenteel aanvullende berekeningen uitgevoerd. De volledige effectbepaling wordt uitgevoerd voor de bodempligging uit het jaar 2000 (Asselman et al., in voorber.). Botterhuis (in voorber.) brengt voor de bodempligging uit het jaar 1980 de effecten op zoetwaterbeschikbaarheid en bevaarbaarheid in beeld.

Op basis van de berekeningen die zijn uitgevoerd voor het nulalternatief IRM kunnen toch al enkele conclusies worden getrokken:

- Doorgaande erosie van het zomerbed leidt tot lagere rivierwaterstanden. Dit is nadelig voor het inlaten van zoetwater en voor natuur (uiterwaarden worden droger). Voor bevaarbaarheid geldt dat de vaste lagen op de Waal een steeds grotere drempel gaan vormen.

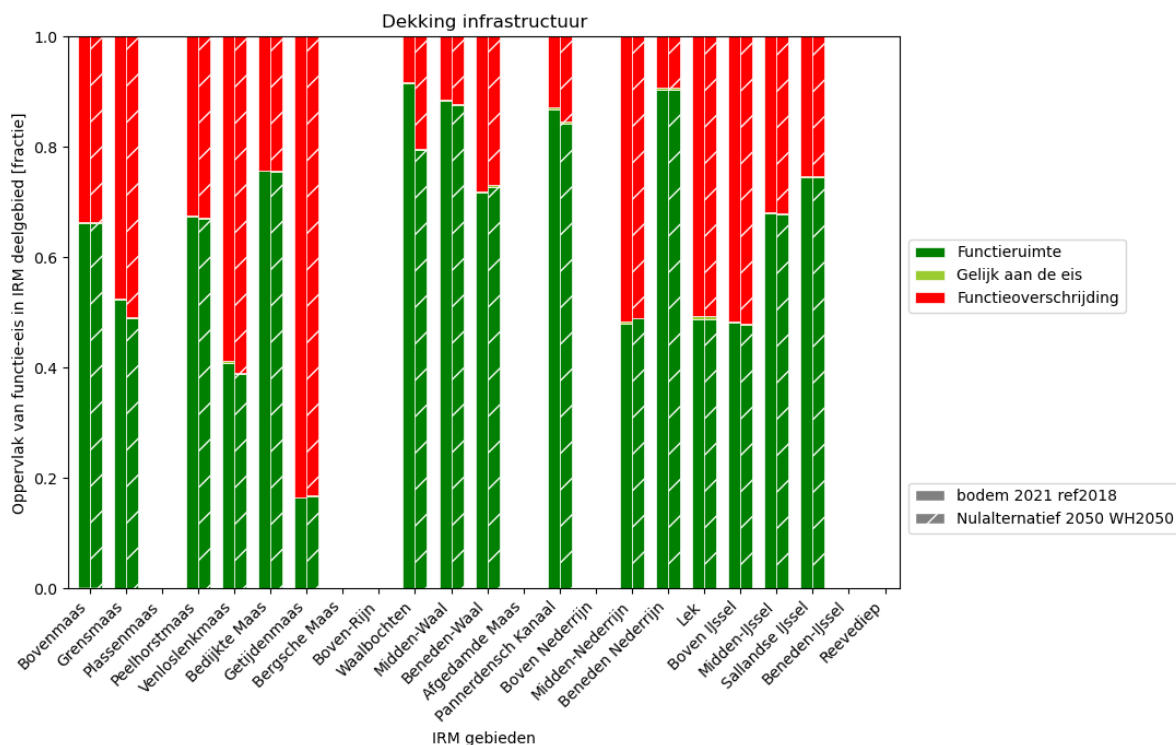
- De grootste onzekerheid in de effectbepalingen komt echter niet door onzekerheden in de absolute bodemerosie, maar door de verschillen in bodemerosie tussen de Waal enerzijds en het Pannerdensch Kanaal en de IJssel anderzijds. Wanneer de Waal veel sterker erodeert dan de andere takken, dan leidt dit tot een steeds grotere verschuiving van de afvoerverdeling, waarbij de Waal steeds meer water af gaat voeren, ten koste van met name de IJssel. Dit vergroot de kans op watertekorten in Noord-Nederland (ongunstig voor zoetwaterbeschikbaarheid), maar leidt wel tot een toename van de waterdiepte op de Waal (gunstig voor de bevaarbaarheid).

9.3 Overige effecten van een verandering in rivierbodemplugging

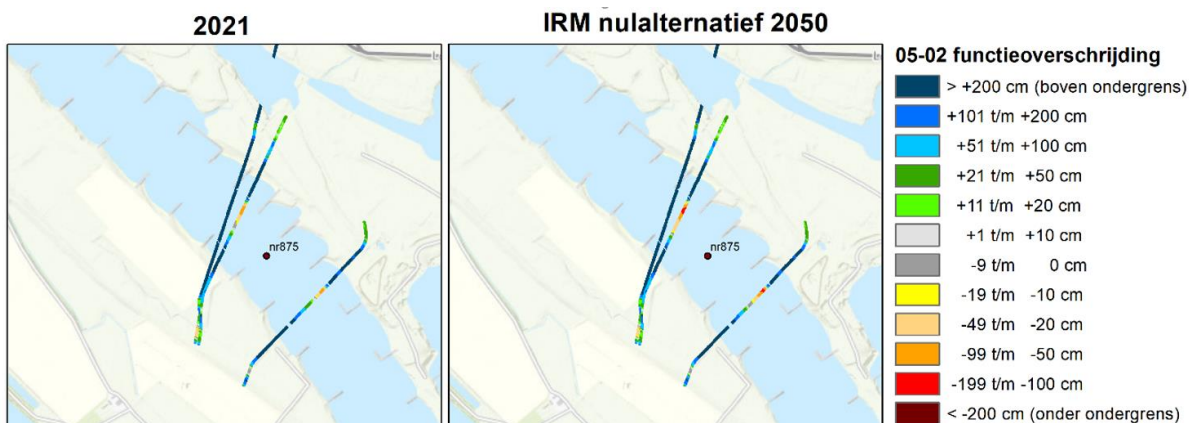
Rijkswaterstaat heeft met betrekking tot het rivierengebied vier kerntaken te vervullen die te maken hebben met natuur, zoetwaterbeschikbaarheid, bevaarbaarheid en waterveiligheid. Een verandering in rivierbodemplugging heeft effect op deze functies, maar ook op een aantal andere aspecten. Met het instrument dat is ontwikkeld voor de Basis Rivierbodemplugging (BRL) kan een aantal van deze aanvullende effecten in beeld worden gebracht. Het gaat dan om effecten op de standzekerheid van kunstwerken, oevers of kribben, en om de afdeklaag boven infrastructuur zoals tunnels, kabels en leidingen.

Figuur 9.7 toont met rood voor elk IRM traject de fractie aan van het traject waarop niet aan de gestelde eisen voor de minimale deklaag bovenop de kabels en leidingen wordt voldaan. Binnen de BRL is de eis opgesteld dat er een minimale dekking van 2,0 meter + halve duinhoogte, over een breedte van 10 m en de gehele lengte van risicovolle leidingen aanwezig moet zijn. De figuur toont dat op dit moment al op meerdere locaties niet aan deze eis wordt voldaan, en dat de dekking in 2050 (bij doorgaande bodemerosie) op nog meer locaties niet meer voldoet aan de eisen die in de Richtlijn vaarwegen, NEN 3654 zijn gesteld.

Boven de kabels en leidingen zijn op dit moment weliswaar geen-baggerzones opgenomen, maar Figuur 9.7 toont dat ook zonder het baggeren, de doorgaande rivierbodemerosie op de erosieve trajecten ervoor kan zorgen dat leidingen niet meer voldoende dekking hebben en bij nog extremere bodemerosie zelfs bloot kunnen komen te liggen. Figuur 9.8 geeft een voorbeeld waar voor enkele leidingen de deklaag afneemt en er in 2050 een tekort van meer dan 110 cm is ontstaan.

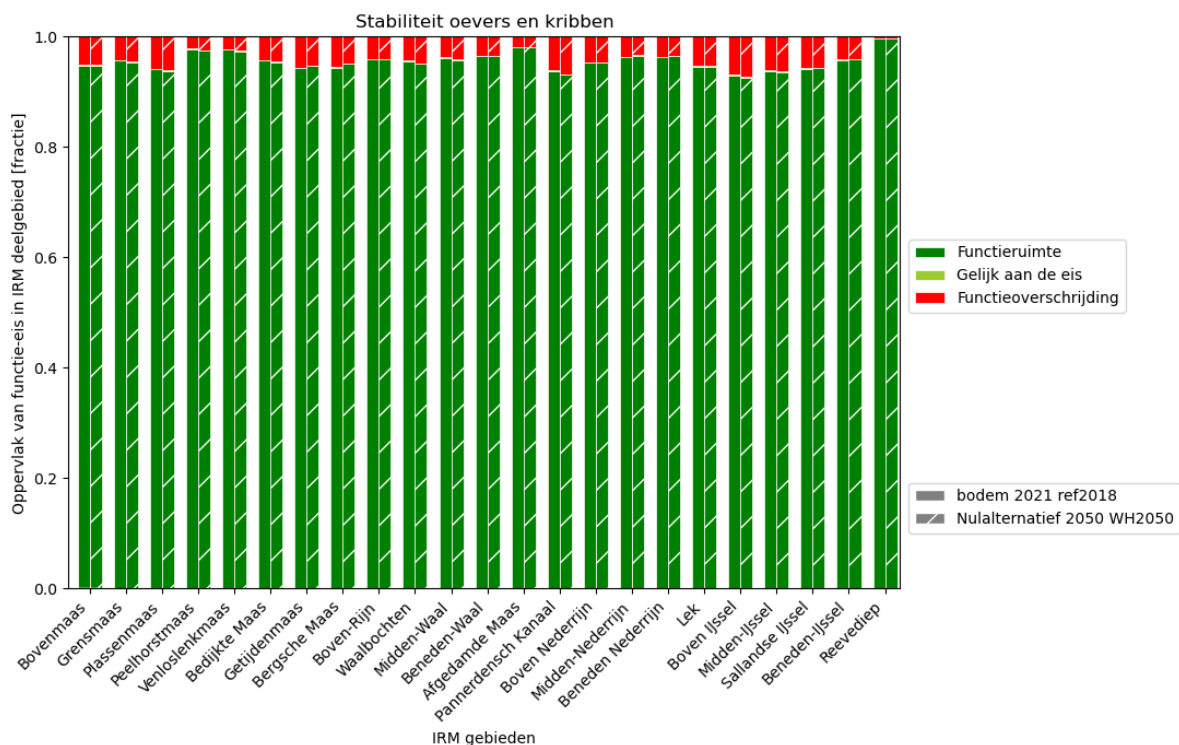


Figuur 9.7 De fractie van ieder IIR-traject dat niet (rood) aan de gestelde eisen voor de minimale deklaag bovenop kabels en leidingen voldoet voor zowel de huidige situatie als voor het nulalternatief (gearceerde balken)

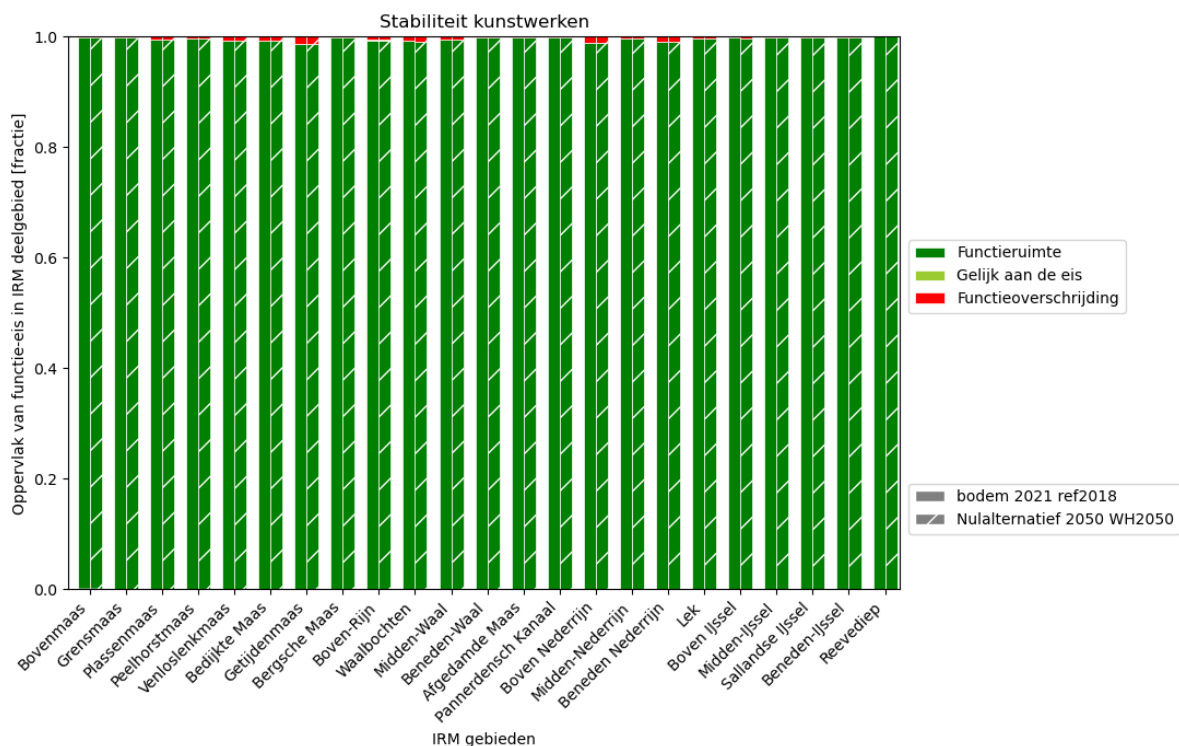


Figuur 9.8 Tekorten (geel-oranje-rood) in de minimale deklaag boven risicovolle kabels en leidingen, zoals bepaald met de BRL voor 2021 (links) en 2050 (rechts)

Figuur 9.9 en Figuur 9.10 tonen met rood voor welk deel van ieder IIR traject waarop niet wordt voldaan aan de gestelde eisen voor de instandhouding van oevers en kribben of kunstwerken. Het grondmassief rondom het grootste deel van de oevers, kribben en kunstwerken is in de huidige situatie stabiel en voldoende. Echter tonen de figuren dat de rivierbodemosie op de erosieve trajecten ook voor de instandhouding van oevers, kribben en kunstwerken nadelig is. Of de tekorten in het standzekerheidvlak van de objecten daadwerkelijk leidt tot instabiele en gevaarlijke situaties, dient voor die de betreffende locaties beter te worden onderzocht (de beschikbare informatie is ontoereikend om daar een harde uitspraak over te doen).



Figuur 9.9 De fractie van ieder IJM traject waarop niet (rood) aan de gestelde eisen voor de instandhouding van oevers en kribben wordt voldaan, voor zowel de huidige situatie als voor het nulalternatief (gearceerde balken)



Figuur 9.10 De fractie van ieder IJM traject waarop niet (rood) aan de gestelde eisen voor de instandhouding van kunstwerken wordt voldaan voor zowel de huidige situatie als voor het nulalternatief (gearceerde balken)

10 Conclusies

Dit rapport gaat over de effectbepaling van het nulalternatief van IRM. Het nulalternatief van IRM beschrijft hoe het rivierengebied er in 2050 bij zou liggen wanneer geen sprake zou zijn van interventies ingevolge IRM. Daarbij is onder meer aangenomen dat sprake zal zijn van doorgaande erosie in het zomerbed van de bovenloop van de Rijntakken en de Maas, dat het klimaat verandert conform het W_{Hdry} scenario en dat sprake is van sterke economische groei (Deltascenario Stoom2050).

Afvoerverdeling en waterstanden

Met behulp van berekeningen met een 2D hydraulisch model is het effect van de rivierbodemerrosie op de afvoerverdeling (alleen voor de Rijntakken) en op de waterstanden op de Rijn en de Maas bepaald. Dit leidt tot de volgende bevindingen:

- Op de Maas bedraagt de verwachte rivierbodemerrosie maximaal 0,3 m. Toch zijn de waterstandsveranderingen beperkt; bij lage afvoeren ($<1.300 \text{ m}^3/\text{s}$) door de gestuwde condities en bij zeer hoge afvoeren door de grote bijdrage van stroming door het winterbed. Op de Grensmaas zijn veranderingen in waterstanden bij lage afvoeren beperkt doordat de grinddrempels (conform huidig beleid) in stand worden gehouden. Op de Grensmaas is de grootste verandering in waterstand bij afvoeren tussen de 1.300 en $1.700 \text{ m}^3/\text{s}$ ongeveer $-0,2 \text{ m}$. Bij hogere afvoeren neemt het effect steeds verder af tot maximaal ongeveer $-0,05 \text{ m}$.
- Op de Rijntakken zorgt de rivierbodemerrosie voor een verandering in de afvoerverdeling bij afvoeren lager dan $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$. De afvoer naar de Waal neemt toe, ten koste van die over de IJssel (verschuiving in de orde van $25 \text{ m}^3/\text{s}$). Op de IJssel worden hierdoor de waterstanden bij zeer lage afvoeren ongeveer $0,35 \text{ m}$ lager. Op de Boven-Waal zorgt de rivierbodemerrosie ook nog voor een waterstandsval, maar doordat op de Beneden-Waal de erosie beperkt is, betekent de grotere afvoer dat daar juist iets hogere waterstanden worden bereikt. De rivierbodemerrosie op de Boven-Waal en het Pannerdensch Kanaal leidt ook tot lagere waterstanden op de Boven-Rijn. Ook hier kunnen de waterstanden tot ongeveer $0,35 \text{ m}$ lager worden.
- Bij hoogwater verandert de afvoerverdeling niet doordat de regelwerken anders worden ingesteld. Mede door een overgang naar de instelling zoals voorzien voor ongeveer 2050 voor een afvoer van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith, komen de regelwerken meer in een middenpositie te staan.

De berekende waterstandseffecten zijn vervolgens gebruikt om de effecten op vier functies te kwantificeren.

Natuur

Om de effecten op natuur in beeld te brengen is gekeken naar veranderingen in overstromingsduur en in grondwaterstand. Dit leidt tot de volgende conclusies:

Analyses op basis van overstromingsduur

- Uiterwaarden langs de Rijntakken met een natuurfunctie overstroom gemiddeld enkele tot enkele tientallen dagen per jaar. Klimaatverandering zorgt voor een kleine toename van de overstromingsduur. Doorgaande rivierbodemerossie leidt tot een beperkte afname van de overstromingsduur. Netto veranderingen in overstromingsduur zijn daardoor klein. De grootste veranderingen in overstromingsduur hangen samen met uiterwaardvergravingen die tussen nu en 2050 plaats zullen vinden.
- Langs de Maas overstroom veel uiterwaarden minder dan 2 dagen per jaar. Een veranderend klimaat heeft hier weinig invloed op. Hetzelfde geldt voor veranderingen in rivierbodempligging.
- Wanneer de ecotooppotentie wordt bepaald op basis van vereiste overstromingsduren, dan zijn de uiterwaarden langs de Rijntakken geschikt voor zachthout- en hardhoutooibos en, afhankelijk van het beheer, ook voor nat en droog grasland. De uiterwaarden langs de Maas liggen veelal te hoog waardoor ze nauwelijks overstroom. Hier zal dus vooral sprake zijn van 'natuur langs de rivier', maar geen riviernatuur.
- Veranderingen in overstromingsduren (als gevolg van klimaatverandering en/of verandering in rivierbodempligging) zijn beperkt. Daarmee is ook het effect van klimaatverandering en verandering in rivierbodempligging op de potentiële ecotoopverdeling beperkt. Dit geldt voor zowel de Rijntakken als de Maas.

Analyses op basis van grondwaterstanden

- De doorgaande rivierbodemerossie leidt tot lagere grondwaterstanden. Langs de Rijntakken dalen de grondwaterstanden tot 2050 nog maximaal ongeveer 20 cm in het splitsingspuntgebied. Langs de Maas dalen de grondwaterstanden met maximaal 10 cm op de Grensmaas.
- Klimaatverandering leidt tot een hogere hoogste grondwaterstand in de winter (GHG; veelal maximaal 10 cm hoger). Dit komt doordat de kans op hoogwater in de wintermaanden toeneemt. De gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) kan langs de Rijntakken en de Grensmaas lokaal 25 à 50 cm lager worden. Dit is het gevolg van vaker voorkomende en langdurigere periodes met lage afvoeren in de zomer.
- Op basis van de grondwaterstanden wordt geconcludeerd dat de uiterwaarden langs zowel de Rijntakken als de Maas vooral geschikt zijn voor droog grasland en hardhoutooibos. Lokaal kunnen langs de Rijntakken ook nattere ecotooptypen voorkomen (nat grasland, zachthoutooibos). De arealen zijn echter beperkt. Langs de Maas zijn de kansen voor deze ecotooptypen eveneens beperkt tot de vergraven delen van uiterwaarden.
- Veranderingen in grondwaterstand door doorgaande bodemerossie hebben nauwelijks effect op de ecotooppotentie. Dit komt doordat de grondwaterstanden in veel uiterwaarden nu al zo laag zijn dat deze alleen geschikt zijn voor de drogere ecotooptypen. Met andere woorden: de uiterwaarden worden door doorgaande bodemerossie en klimaatverandering in het voorjaar en de zomer nog droger, maar dat leidt niet tot een verandering in potentiële ecotoopverdeling; ze blijven vooral geschikt voor de droge ecotooptypen droog grasland en hardhoutooibos.

PAGW doelen

- Vergelijking van de doelen van de PAGW met de potentiële ecotoopverdeling berekend met HABITAT (dus op basis van overstromingsduren) laat zien dat de doelen van de PAGW niet worden gehaald omdat het landbouw areaal te groot is. Dit geldt voor de Rijntakken en de Maas. Langs de Maas liggen de uiterwaarden bovendien veelal te hoog om nattere ecotooptypen te realiseren. Wanneer de doelen van de PAGW worden vergeleken met de ecotoopverdeling berekend op basis van de voorjaarsgrondwaterstanden, dan ontstaat een (nog) minder positief beeld: de meeste uiterwaarden langs Rijn en Maas zijn dan te droog voor de nattere ecotooptypen (nat grasland, zachthoutoibos en riet/moerasruigte).
- Met behulp van de BRL is de doorstroming van nevengeulen onderzocht. Op veel IRM-trajecten stromen nevengeulen nu al onvoldoende vaak mee. Dit is onder meer het geval langs de Venloslenk-Maas, de Waalbochten en de Boven-IJssel. Over het algemeen wordt de doorstroming bij het nulalternatief IRM in 2050 slechter. Dit komt deels door doorgaande rivierbodemerrosie, maar ook door klimaatverandering.
- De riviernatuur scoort in de huidige situatie slecht op connectiviteit, diversiteit en dynamiek. Door doorgaande erosie van het zomerbed en klimaatverandering zal dit bij het nulalternatief IRM nog slechter worden.

Zoetwaterbeschikbaarheid

Voor de functie zoetwaterbeschikbaarheid zijn verschillende indicatoren beschouwd voor West-Nederland en Noord-Nederland die indicatief zijn voor de kans op watertekorten.

- Uit de analyses blijkt dat de kans op watertekorten in de toekomst groter wordt. Dit komt vooral door klimaatverandering en een grotere watervraag. Het effect van veranderingen in rivierbodempligging op watertekorten is voor West-Nederland beperkt. Rivierbodemerrosie zal leiden tot een lichte toename van de afvoer over de Waal, waardoor periodes van externe verzilting eerder korter worden dan langer. Dit effect is echter zo klein dat deskundigen het effect op verzilting verwaarloosbaar achten. Het effect op watertekorten in West-Nederland is daardoor ook verwaarloosbaar. Het effect van klimaatverandering en vergrote watervraag is in West-Nederland dominant.
- Voor Noord-Nederland is het effect van een andere afvoerverdeling als gevolg van de rivierbodemerrosie wel relevant, want het betekent een grotere kans op en mate van watertekorten voor de regio. Hoewel het effect van klimaatverandering en vergrote watervraag groter is dan het netto effect van de verschuivende afvoerverdeling door rivierbodemerrosie, versterken de processen elkaar. Klimaatverandering en rivierbodemerrosie resulteren in 2050 gemiddeld eens in de 8 à 10 jaar in een watertekort van 10% van de watervraag, terwijl dit zonder rivierbodemerrosie eens in de 12 jaar zou zijn (nu is gemiddeld eens in de 50 jaar sprake van een watertekort). De grotere watertekorten treffen deels de beregende landbouw in Noord-Nederland. In het STOOM scenario neemt het landbouwwisico toe met 10-11 miljoen euro per jaar. Circa 18% hiervan is toe te schrijven aan de gevolgen van bodemerrosie.
- Ook de toevoer naar de Twentekanalen wordt significant beïnvloed door lagere rivierwaterstanden als gevolg van rivierbodemerrosie. Problemen met de wateraanvoer naar de Twentekanalen door lage waterstanden worden in de toekomst vooral groter door klimaatverandering, maar dit effect wordt verergerd door de rivierbodemerrosie. Bij een veranderd klimaat kan de onderschrijdingsduur van kritieke waterstanden bij inlaat Eefde verdubbelen als gevolg van doorgaande rivierbodemerrosie.

Bevaarbaarheid

Ten gevolge van rivierbodemerrosie en klimaatverandering gaat de bevaarbaarheid van de rivieren achteruit. In deze studie is inzicht verkregen in de te verwachten ondieptes, en de impact op de scheepvaart met de tool QINCoM. De resultaten hebben betrekking op veranderingen in het aantal vaarbewegingen en de vaarkosten. De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- Door rivierbodemerrosie op de Boven-Waal zal de afvoer naar de Waal toenemen. De waterdiepte op de Waal wordt hierdoor iets groter. Het grootste knelpunt verplaatst zich echter van een alluviale ondiepte (benedenstrooms van Nijmegen) naar de vaste laag van Nijmegen. Indien bij een vaste laag rekening gehouden moet worden met meer kielspeling, neemt de beschikbare vaardiepte voor de schepen toch af.
- Door de rivierbodemerrosie wordt de waterdiepte kleiner op de gehele IJssel (0,2 m), evenals in stuwpand Driel op de Neder-Rijn (0,3 m), omdat dat stuwpand 'leegloopt' naar de IJssel. De bereikbaarheid van beide trajecten neemt hierdoor sterk af. De toename in vaarkosten is daardoor groot.
- Door klimaatverandering neemt het aantal dagen per jaar waarop er onvoldoende waterdiepte is, significant toe. Op de Waal van 49 dagen per jaar nu, naar 73 dagen per jaar bij het nulalternatief IRM. De erosie van het zomerbed heeft hier een gunstig effect op; zonder erosie zou de minimaal vereiste vaardiepte 86 dagen per jaar worden overschreden. Ter vergelijking: internationale afspraken stellen dat de waterdiepte op de Rijn gemiddeld maar 20 dagen per jaar kleiner mag zijn dan 2,8 m.
- Niet alleen het aantal dagen waarop niet aan de vereiste waterdiepte kan worden voldaan neemt toe, maar ook het aantal locaties. Op dit moment wordt op de Boven-Waal over ongeveer 5% van de totale trajectlengte niet aan de vereiste waterdiepte voldaan. Dit neemt toe tot 40% bij het nulalternatief IRM. Zonder rivierbodemerrosie zou op ongeveer 50% van het traject niet aan de vereiste waterdiepte worden voldaan.
- Het aantal reizen over de Waal is een orde groter dan dat over de overige riviertakken. Hierdoor is het effect van droogte op transport per schip hier verreweg het grootst. Veel reizen worden niet enkel beïnvloed door ondiepten in Nederland, maar ook door ondiepten meer stroomopwaarts op de Rijn in Duitsland (o.a. Kaub).
- Op basis van de toegepaste scenario's voor veranderingen in rivierbodempligging en klimaatverandering (W_{Hdry}), wordt geconcludeerd dat het effect van klimaatverandering veel groter is dan het effect van rivierbodemerrosie.
- Door klimaatverandering nemen de vaarkosten per jaar gemiddeld toe met 120 mln. euro (6%). Veranderingen in rivierbodempligging resulteren in een toename van 9 mln. euro (minder dan 1%). Dus hoewel rivierbodemerrosie leidt tot een toename van de waterdiepte op de Waal, wordt toch een (beperkte) toename van de vaarkosten berekend. Dit komt doordat QINCoM uitgaat van een grotere vereiste kielspeling boven vaste lagen (0,4 m in plaats van 0,2 m). Bij doorgaande erosie van het zomerbed verplaatst de meest belangrijke ondiepte zich op de Waal van een alluviale ondiepte benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen, naar de vaste laag zelf. Dit is ongunstig.

Waterveiligheid

Voor waterveiligheid is gekeken naar de dijkversterkingen die nodig zijn om in 2050 aan de beschermingsnormen te voldoen. Daarbij is gekeken naar het effect van de veranderingen in rivierbodempligging en klimaatverandering afzonderlijk en in combinatie. De belangrijkste conclusies zijn als volgt:

- De dijkverhogingsopgave berekend voor het nulalternatief IRM wordt grotendeels (meer dan 50%) bepaald door het op orde komen voor de nieuwe normering in combinatie met klimaatverandering. De verandering in rivierbodempligging speelt een veel kleinere rol (maximaal 10%).
- De versterkingsopgaven voor macrostabiliteit en piping worden nagenoeg volledig bepaald door het op orde komen voor de nieuwe normering. Klimaatverandering heeft een minder groot effect. Het effect van een verandering in rivierbodempligging is verwaarloosbaar.
- Hierdoor is het effect van klimaatverandering op de totale versterkingskosten relatief beperkt. Het zorgt voor 850 mln (15%) extra kosten bovenop de al bestaande versterkingsopgave om aan de norm te voldoen in 2050.
- De verandering in rivierbodempligging heeft een beperkt gunstig effect op de totale kosten voor dijkversterking. De totale kosten voor dijkversterking langs de Maas worden geraamd op 1,9 miljard euro. Door veranderingen in rivierbodempligging zouden de kosten 9 mln. lager uit kunnen vallen. Langs de Rijntakken worden de kosten geraamd op 5,6 miljard euro. Veranderingen in rivierbodempligging leiden hier tot een besparing van 7,5 mln. euro. Het verschil in kosten is dus minder dan 1%.

Gevoeligheid voor gekozen scenario's

Bij de effectbepaling van het nulalternatief IRM is gebruik gemaakt van het Deltascenario Stoom. Dat scenario combineert relatief snelle klimaatverandering met bevolkingsgroei en sterke economische groei. In dat geval geldt met name voor de functies zoetwaterbeschikbaarheid en bevaarbaarheid dat de negatieve effecten als gevolg van klimaatverandering (veel) groter zijn dan die van doorgaande erosie van het zomerbed. Wanneer wordt uitgegaan van het scenario Rust (geringe klimaatverandering, krimpende bevolking en bescheiden economische groei), dan leidt vooral de doorgaande bodemerosie tot een toename van de problemen. Dit komt doordat de rivierafvoer bij het scenario Rust in de zomer gelijk blijft of zelfs iets toeneemt, terwijl bij scenario Stoom in de zomer vaker sprake is van perioden met lage afvoeren. Zonder rivierbodemerosie zou de problematiek voor zoetwaterbeschikbaarheid, bevaarbaarheid en natuur bij Rust2050 vergelijkbaar zijn met de huidige problematiek.

De gevoeligheid voor aannames rondom veranderingen in rivierbodempligging hebben vooral te maken met de verschillen in bodemerosie tussen de Waal en het Pannerdensch Kanaal, omdat dit van invloed is op de afvoerdeling. Wanneer erosie op de Boven-Waal groter is dan op het Pannerdensch Kanaal, gaat de Waal meer water afvoeren. Dit is gunstig voor de bevaarbaarheid op deze riviertak, maar ongunstig voor de zoetwaterbeschikbaarheid in Noord-Nederland.

11 Referenties

- Asselman, N. (2021) Voorstel effectbepaling PlanMER IRM - Uitgangspunten en effecten op toestand van de rivier en riviergebonden functies. Versie 3 maart 2021.
- Asselman, N. en Y. Snoek (2021) Nulalternatief Integraal Riviermanagement (IRM). IRM rapport. Versie 03, 4 oktober 2021
- Asselman, N., J. de Jong, M. Mens, P. de Grave, B. Maas, M. Maarse (2022) Uitgangspunten effectbepaling nulalternatief IRM. Deltares rapport 11208036-004-ZWS-0004
- Asselman, N., B. Maas, M. Mens, P. de Grave, R. van der Wijk, E. van der Deijl (in voorber.) Effectbepaling IRM: Gevoeligheidsanalyse bodemligging en klimaatverandering. Deltaresrapport 11208036-004-ZWS-0005.
- De Jong, J.S. (2019). KBN: Bedreiging klimaatverandering - Beschrijving karakteristieke droge jaren met stationaire afvoerniveaus. Deltares memo 11203738-005-BGS-0002 versie 1.1, d.d. 14 december 2019
- De Jong, J.S. (2020a). Effect van een nieuwe bodemhoogte 2050 op de waterstanden en afvoeren op de Rijntakken. Deltares memo 11203738-005-BGS-0011 d.d. 19 januari 2020
- De Jong, J.S. (2020b). Stresstest Droogte Rijntakken – Impact op de scheepvaart. Deltares rapport v1.1, kenmerk 11205274-004-BGS-0009
- De Jong, J.S. (2020c) Documentatie economische effectmodule scheepvaart. Deltares memo 11205272-005-ZWS-0001
- De Jong, J.S. (2021) Quick Inland Navigation Cost Model (QINCoM) voor een snelle berekening van het effect van laagwater en maatregelen op kosten van de binnenvaartsector. Deltares memo 11205272-005-ZWS-0003, d.d. december 2021 v1.0
- De Jong, J.S. (2022). Randvoorwaarden dynamische afvoergolven Maas-model voor toepassing in BOI. Deltares memo 11206813-002-ZWS-0019 v1.0 d.d. 16 maart 2022
- De Jong, J.S. en T. Boschetti (2021) Kwetsbaarheid sluizen Maas voor klimaatverandering. Onderzoek naar de sluizen Born, Maasbracht en Heel in klimaatbestendige netwerken. Deltares rapport 1120527-004-BGS-0017 v1.0 d.d. 19 april 2021
- De Jong, J.S. & R. van der Mark (2021). KBN-HVWN Stresstest droogte Rijntakken: Toestand van het Systeem en Kwetsbaarheid gebruiksfunctie. Deltares rapport 11205274-004-BGS-0022 v1.1, d.d. 7 mei 2021
- De Jong, J.S. & W. Ottevanger (2021) Waterdiepteknelpunten door toenemende inzinking en drempelvorming bij kabels en leidingen Verdiepend onderzoek in Klimaatbestendige Netwerken Stresstest droogte Rijntakken. Deltares rapport 11206832-020-GEO-0001 v1.0
- De Jong, J.S. & M. Schippers (2021). Effect bodemscenario's op de waterstanden van de Maas en Rijn. Hydraulische modelresultaten BRL Grondwatertool. Deltares memo 11206795-012-ZWS-0004

- De Jong, J.S., A. Spruyt, E. Van der Deijl (2021) Synthetische randvoorwaarden zesde generatie. Deltares memo 11205258-002-ZWS-0009 v0.13 d.d. 15 november 2021
- De Jong, J.S. & R. Van der Wijk (2021). Discussie over de normering van de doorvaarthoogte in Nederland, in relatie tot de normering in Duitsland en de gewenste doorvaarthoogte. Deltares memo 11206832-019-GEO-0001, d.d. 15 november 2021
- Domhof, B.C.A., de Jong, J.S. (2022a) Verschilanalyse overstap zesde generatie modellering Maas. Effect nieuwe generatie, modelinstellingen en beno-actualisaties. Deltares rapport 11206813-002-ZWS-0023 v1.0 26 april 2022
- Domhof, B.C.A., de Jong, J.S. (2022b) Verschilanalyse overstap zesde generatie modellering Rijnakken. Effect nieuwe generatie, modelinstellingen en beno-actualisaties. Deltares rapport 11208036-004-ZWS-0002 v0.10 d.d. 2 mei 2022
- Duró, G. (2021a) Notes on adjusting bed levels in a 2D grid with 1D elevation changes for Rijn branches. Witteveen+Bos Memorandum in project 129047 d.d. 24 december 2021
- Duró, G. (2021b) Notes on adjusting bed levels in a 2D grid with 1D elevation changes for Meuse River. Witteveen+Bos Memorandum in project 129047 d.d. 24 december 2021
- Ecorys (2018). Kosten en effecten van droogte voor de scheepvaart. Eindrapportage d.d. 30 april 2018
- Erasmus-UTP (2020) Economische impact laagwater. Een analyse van de effecten van laagwater op de binnenvaartsector en de Nederlandse en Duitse economie
- Heusden, W. van, H. Sluiter, M. Tijnagel, W. Vercuijsse, A. Zuidhof (2021) Ecologische Systeempogave PAGW-Rivieren – Naar klimaatbestendige robuuste riviernatuur in 2050. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, Rijkswaterstaat en Staatsbosbeheer.
- HKV, B. Kolen, J. Caspers, J. Pol (2021) Actualisatie OKADER voor toepassing bij de IRM-MER. PR4343.10, april 2021.
- Horváth, K. and Mens, M. (2020) Quick Water Allocation Scan Tool: Gebruikersdocumentatie, Deltares rapport 11205272-019, Delft.
- Hunink, J., Mens, M. and Melman, R. (2022) Verkenning toename watervraag door vernattingsmaatregelen in veenweidegebieden. Deltares rapport 11208074-008-ZWS-0001
- HydroLogic (2019). Effect afvoerverschuiving Pannerden op de waterbeschikbaarheid vanuit het IJsselmeer, Hydrologic notitie P1124: 18 december 2019.
- HydroLogic (2020). Duiding Afvoerverschuiving op Splitsingspunt Pannerden. Hydrologic notitie P1160: 17 maart 2020
- Klijn, F., H. Leushuis, M. Treurniet, W. van Heusden en S. van Vuren (2022) Systeembeschoouwing Rijn en Maas ten behoeve van ontwerp en besluitvorming. Programma Integraal RivierManagement, Ministerie Infrastructuur & Water, Den Haag
- Klijn, F., M. Hegnauer, J. Beersma en F. Sperna Weiland (2015) Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas? Samenvatting van onderzoek met GRADE naar implicaties van nieuwe klimaatprojecties voor rivierafvoeren. Rapport van Deltares en KNMI, nummer 1220042-004.

- Klijn, F., B. Pedrolí, H. Duel, M. de Vries, (1998) Ecotopen: een blik terug en een blik naar voren. WL-rapport R3124, Delft.
- Koedijk, O. C. (2020), Richtlijnen vaarwegen (2020) Tech. rep., Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving.
- Kosters, A. (2022) Actualisatie Rijn j19_6 en beno19_6. Deltares rapport 11206813-003-ZWS-0004 v0.2 d.d. 8 februari 2022
- Kosters, A., N. Asselman, J. de Jong, M. Mens (2022) Strategische Verkenning Rivieren: Huidige en toekomstige knelpunten voor scheepvaart, zoetwatervoorziening, natuur en hoogwaterveiligheid. Deltares rapport 11208036-004, Deltares, Delft
- Kroekenstoel D. (2019) Synthesedocument OKADER, verbeteringen, uitkomsten pilots en recente analyses. RWS memo, 25 oktober 2019 versie 1.1
- Manders, T. en C. Kool (2015) Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving Nederland in 2030 en 2050: twee referentiescenario's. PBL-publicatienummer: 1689
- Mens, M., Schasfoort, F., Hunink, J., Pouwels, J., Delsman, J., De Jong, J. (2020a) Hydrologische en economische effecten van twee maatregelpakketten voor Deltaprogramma Zoetwater fase II. Deltares rapport 1205271-005, Deltares, Delft
- Mens, M., Hunink, J.C., Delsman, J.R., Pouwels, J., Schasfoort, F. (2020b). Geactualiseerde knelpuntenanalyse voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II, Deltares rapport 112003734-003, Delft.
- Mens, M., R. van der Wijk, N. Kramer, J. Hunink, J. de Jong, B. Becker, P. Gijsbers, C. ten Velden (2018a) Hotspotanalyses voor het Deltaprogramma Zoetwater. Inhoudelijke rapportage. Deltares rapport 11202240-004, Delft.
- Mens, M., Van den Boogaard, H., Buschman, F., Nolte, A. (2018b) Eenvoudige zoutrelaties voor snelle zoetwateranalyses. Deltares rapport 11200589-002, Delft.
- Pouwels, J., America, I., Delsman, J. R. and Mens, M. J. P. (2021). Stresstest voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II, Deltares Rapport 11206829-002, Delft.
- Prinsen, G., H. van den Boogaard, M. Hegnauer (2015). Onzekerheidsanalyse hydraulica in GRADE. Deltares rapport 1220082-010, Delft
- Rijksoverheid (2020) Notitie Reikwijdte en Detailniveau voor de Milieueffectrapportage voor het programma Integraal Riviermanagement.
- Rijksoverheid (2021). Nationaal Deltaprogramma 2021: Koersvast werken aan een klimaatbestendig Nederland. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. (online: Deltaprogramma 2021)
- Rijkswaterstaat (2022) Klimaatbestendige Netwerken: Stresstest Hoofdvaarwegennet - Deelrapport Droogte. Risico's van klimaateffecten voor de scheepvaart.
- Sloff, K. (2019) Prognose bodemligging Rijntakken 2020-2050. Trends voor scheepvaart en waterbeschikbaarheid. Deltares rapport 11203738-005-BGS-0008.

- Sloff, K., (2021) Prognose bodemligging Maas 2050 voor IRM. Memo, d.d. 3 november 2021.
- Smale, A. (2018) Werkwijzer bepaling Hydraulische Ontwerprandvoorwaarden Aanvulling OI2014, versie 5 (Hydra-NL 2.4.1). Deltaresrapport 11202226-009-GEO-0002.
- Spruyt, A. & N. Asselman (2017) Afvoerverdeling Rijntakken. Eenvoudig regelbaar of niet? Deltares rapport 11200539-000-ZWS-0007
- Ten Brinke W. (2019) Effecten morfologische ontwikkelingen op functies Rijn en Maas, Blueland Consultancy BV, Rapport B19.01, November 2019.
- Van der Deijl, E. (2022) Toepassing van de Basisrivierbodemplugging op het IRM-nulalternatief. Actualisatie functie-eisen en toetsing bodem 2050. Deltares rapport 11208036-009-ZWS-0001. d. d. 27-06-2022
- Van der Deijl, E., J.S. de Jong, T. Visser (2022) Actualisatie zesde-generatie Maas-modellen. Schematisaties j19_6, beno19_6, beno_mknov19_6. Deltares rapport 11206813-002-ZWS-0021 d.d. 19-04-2022.
- Van der Sluis, T., B. Pedrolí, I. Woltjer, E. van Elburg, G. Maas (2020) Uitwerking PAGW natuuropgave Hotspots Grote Rivieren; Eindrapport. WENR rapport 3031.
- Van der Veen, R. (2018a). Actualisatie beschrijving laterale toestroming Maas
- Van der Veen, R. (2018b). Actualisatie beschrijving laterale toestroming Rijntakken
- Van der Wijk, R. & J.S. de Jong (2021). Stresstest Doorvaarthoogte Hoofdvaarwegennet. Zeespiegelstijging en rivierafvoeren. Deltares rapport 11205274-004-BGS-0023 v8.0, d.d. 30 augustus 2021
- Van der Wijk (2022) Afleiden QH-relatie Rijn-Maasmonding voor Rijntakken en Maas. Deltares memo 11206813-006-ZWS-0008 v4.0 d.d. 1 maart 2022
- Van Geest, G. (2020) Rivieren en klimaat – PAGW; Effecten van lage rivierpeilen op de vochttoestand van uiterwaarden langs de Rijn en Maas - Tweede herziene versie. Deltares rapport 11203733-005-ZWS-0002.
- Verbeek, M. (2022) De IJssel kreeg minder water: De ontwikkeling in de verdeling van lage Rijnafvoeren in de periode 1989 - 2021. Versie 3 definitief d.d. 01-03-2022
- Verschuren, D. (2020). Effects of drought on the traffic capacity of the river Waal and the occurrence of congestion. Master thesis TU Delft
- Wolters, H, J. Hunink, J. Delsman, G. de Lange, F. Schasfoort, R. van der Mark, G.J. van den Born, E. Dammers, B. Rijken en S.Reinhard (2018) Deltascenario's voor de 21^e eeuw actualisering 2017. Hoofdrapport. Rapport van Deltares i.s.m. PBL en WUR.

A Bijlage wijziging effectenmethodiek

Onderstaande tabel geeft een overzicht in de wijzigingen die zijn door gevoerd ten opzicht van de oorspronkelijk door Asselman (2021) voorgestelde effectenmethodiek.

Onderdeel	Verandering	Reden
Morfologie	-	
Hydraulica	D-HYDRO i.p.v. WAQUA en SOBEK	Voor de hydraulische effectbepaling geldt als uitgangspunt dat wordt aangesloten bij de modellering van het beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) Bovendien verdient het de voorkeur om voor alle effectbepalingen gebruik te maken van een consistente set hydraulische berekeningen (de voorkeur gaat dus uit naar gebruik van 1 hydraulische model)
Waterveiligheid	Input D-HYDRO i.p.v. WAQUA	-
Bevaarbaarheid	Input D-HYDRO i.p.v. WAQUA	-
	QINCoM i.p.v. BIVAS	Rekent veel sneller dan vergelijkbare sommen in BIVAS en wordt ook bij andere studies gebruikt
Zoetwaterbeschikbaarheid	Input D-HYDRO i.p.v. SOBEK	-
Natuur	Input D-HYDRO i.p.v. SOBEK	-
	Gebruiken HABITAT	HABITAT kan aangeven of gebieden geschikt zijn voor bepaalde ecotootypen. Dit geeft inzicht in de haalbaarheid van de PAGW doelen.

B Bijlage (rivierverruimende) maatregelen die deel uitmaken van het nulalternatief IRM

Samenvattend overzicht van (rivierverruimende) maatregelen die deel uitmaken van het nulalternatief en die zijn meegenomen in de hydraulische modellen

Rijn	Maas
Kribverlaging Pannerdensch Kanaal	Grensmaas (al in realisatie)
IJsseldelta fase 2	Over de Maas (realisatie)
Havikerwaard-Zuid	Gebiedsontwikkeling Ooijen-Wanssum (realisatie)
Ontzanding Angerensche en Doornenburgsche Buitenpolder	Integrale verkenning Ravenstein-Lith (= Meanderende Maas)
Inrichtingsplan Welsumerwaarden	Oeffelt
Roetwaarden	Inrichtingsplan Demen Dieden
Kleine Willemspolder	Verruiming Geleenbeek/Oude Maasje t/m Stevol plas incl. brug aanpassing
Palmerswaard	Inlaatwerk Heerenlaak plas bij rkm 53 en verleggen monding van de plas bij rkm 57
Rhenen	Ingrep Mazenhoven-Meeswijk op basis van DO
Stiftsche waard ontkleining	Aanleggen veerstoep Grevenbicht
Afferdensche en Deestsche waarden	4 prioritaire systeemmaatregelen: 1) Thorn-Wessem, 2) Baarlo, 3) Arcen, 4) Well
RvdR IJsseldelta-Zuid; Zalk	Ontwerp Vlaamse rivierverruiming locatie Elerweert
Reevediep fase 2	Ingreplocatie Meeswijk-Molenveld dat uit een weerdverlaging bestaat.
Millingerwaard, ontzanding tot 2020	Ingrep Booien-Veurzen langs de Maas van rivierkilometer 42.5 tot 44.5 (linkeroever).
Rijnwaarden	
Rijnwaarden, Bijlandse waard	VKA Wijnaerden
Krib- en Oeververlaging Pannerdensch kanaal, SNIP2A	Maatregel vergraving Koornwaard
Overnachtingshaven Spijk	Maaswerken ingrep locatie Visserweert volgens eindplan.
3e kolk Beatrixsluis Nieuwegein	Maaspark Well
Marswaard Zutphen	Maaswerken ingrep Boscherveld.
Beuningse uiterwaarden	Verdieping hoogwatergeul Lomm ecologische variant
Loenensche Buitenpolder	Maaswerken ingrep Meers Maasband en Urmond
Drutensche waarden, Waaier van Geulen	Maaswerken ingrep Grevenbicht
Amerongse Bovenpolder, incl. hoogwatervluchtplaats	Maaswerken ingrep Koeweide (slapersdijk rkm. 45)
ontzanding Randwijkse waarden	Lob van Gennep (ontwerpvoorkeursbeslissing ligt ter inzage)
ontzanding Tull en 't Waal	Meanderende Maas (inmiddels in planuitwerkingsfase)
Waalfront Nijmegen omarmt de Waal	
Rivierklimaatpark IJsselpoort (IJsselpoort fase 1), besluit al in nov 2020 genomen, maar handtekening pas in maart 2021 gezet	
Stadsblokken Meinerswijk (vergund)	
Paddenpol *	

* wordt waterstandsneutraal gerealiseerd. Is nog niet opgenomen in het hydraulische model

C Bijlage hydraulica

C.1 Uitgangspunten modellering

C.1.1 Software

In de hydraulica is gebruik gemaakt van de volgende software:

- ArcMap 10.6.1 met Baseline: 6.2.1.2353
- Matlab 2019
- D-HYDRO 2021.04 ²⁴

Rekenplatform:

- Hydrax-NL van Deltares
- Modellenplatform van Nationaal Water Model

Beide clusters zijn ongeveer even snel. Voor een vergelijkbare simulatie van de Rijntakken met een duur van 15 dagen en een 1x4 parallelisatie, rekent bij Deltares in 18.9 uur en op het modellenplatform in 18.2 uur.

C.1.2 Baseline

C.1.2.1. Maas

Voor de Maas wordt direct gebruik gemaakt van de schematisatie baseline-maas-beno_mknov19_6-w7, zonder verdere aanpassingen. Dit model is de kandidaat om gebruikt te worden in BOI als het hr_mknov2023-model na opname in Baseline-NL en na toevoeging van de BOI-uitvoerlocaties (Van der Deijl, et al., 2021). De verwachting is dat deze resterende werkzaamheden geen effect hebben op de modelresultaten.

In dit model zijn de Maas-kades (de dijkringen met een lagere veiligheidsnorm) niet-overstroombaar. In het model zit de vegetatielegger “Legger 2.0”, verleende en gerealiseerde vergunningen en geplande maatregelen met voldoende status. Een overzicht van deze maatregel wordt gedocumenteerd in BOI en de naam van de Baseline-maatregelen in de bijlage van Van der Deijl et al. (2021). Bij extreem hoge afvoeren (hoger dan 4.000 m³/s) ontstaan in het model glazen wanden doordat het water hier wordt tegengehouden door de modelbegrenzing, maar in werkelijkheid hoger op zou lopen bij deze zogenaamde hoge gronden.

In tegenstelling tot de toetsing in WBI2023 worden geen berekeningen uitgevoerd in het beno19-model (dus met overstroombare maaskades), om het aantal berekeningen (incl. effectmodules) beperkt te houden.

De instellingen van de drempels bij retentiegebieden Lateraal Kanaal West en Lob van Gennep zijn als onderdeel van dit project niet aangepast en zodoende gelijk aan de gebruikte instellingen in BOI. De afvoercondities waarbij de retentiegebieden actief worden veranderd hierdoor ten gevolge van de rivierbodemerrosie.

²⁴ In definitieve BOI simulaties is overgestapt naar versie D-HYDRO 2022.01-p01. In deze versie is een bug gecorrigeerd waardoor de modelresultaten rondom stuwen kunnen verschillen.

Ten behoeve van IRM zijn in het beheersgebied van de Maas geen andere maatregelen gepland ten opzichte van de uitgangspunten van BOI. De autonome rivierbodemerrosie wordt direct verwerkt in het model (zie hoofdstuk C.1.3).

C.1.2.2. Rijntakken

Voor de Rijn wordt als basisschematisatie gebruik gemaakt van baseline-rijn-beno19_6-v1. Dit model is de kandidaat om gebruikt te worden in BOI als het hr2023-model na toevoeging van de BOI-uitvoerlocaties (Kosters, 2022). Dit model wordt begin 2022 afgerond. Gebruik wordt gemaakt van de versie van eind 2021. Omdat gebruik wordt gemaakt van een 'tussendoor'-versie kan niet gegarandeerd worden dat alle details in het model (zoals initiële condities en bestandsopbouw) overeen komen met de definitieve versie die in 2022 wordt opgeleverd.

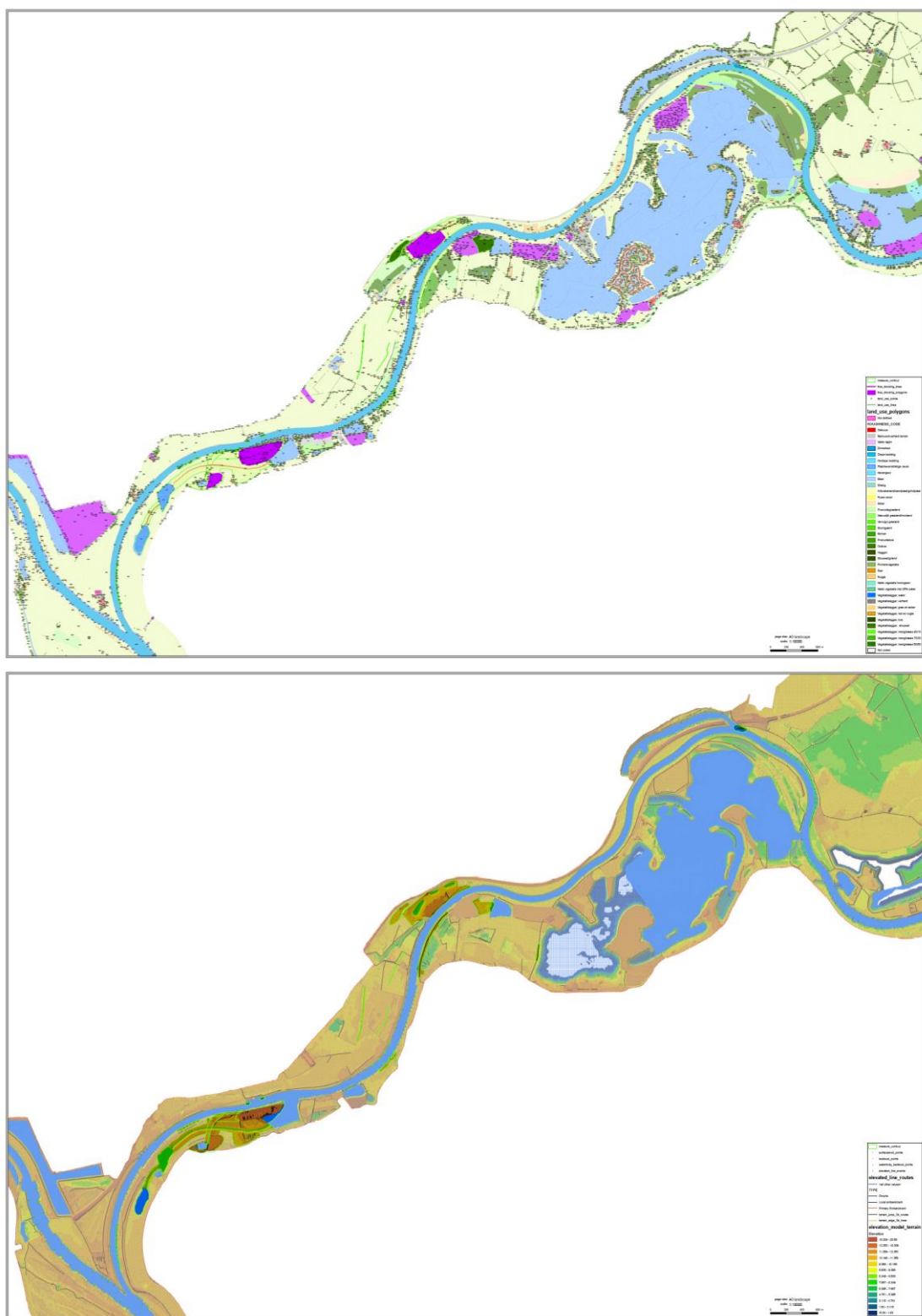
Ten behoeve van IRM is in het beheersgebied van de Rijntakken de maatregel Rivierklimaatpark IJsselpoort (RKIJ) toegevoegd. Deze maatregel is ontwikkeld door Witteveen+Bos en ten behoeve van IRM geconverteerd naar Baseline6. In overleg met RWS-ON is gekeken naar de status van deze maatregel. Besloten is om geen gebruik te maken van een variant van deze maatregel waarin een deel van de Kadeverlaging Kopperwaard niet wordt gerealiseerd waardoor de verwachte waterstandsdeling maar 10 cm zou zijn. De variant die nu gebruikt wordt heeft naar verwachting een waterstandsdeling van 20 cm. Deze maatregel bestaat uit 3 baseline-maatregel: ij_RKP_v52, ij_RKP_VKA_WN2 en ij_RKP_VKA35a1. De status van de maatregel is onderwerp van discussie geweest (hij wordt bijvoorbeeld niet meegenomen in OI), maar besloten is om de maatregel wel mee te nemen in het nulalternatief voor IRM omdat de maatregel samenwerkt met de maatregel Meinerswijk. Na inmixen wordt de variant de naam gegeven baseline-rijn-beno19_6-v1_irm en geconverteerd naar geometrische bestanden voor de modellering in D-HYDRO.

De autonome rivierbodemerrosie wordt direct verwerkt in het D-HYDRO-model (zie hoofdstuk C.1.3).

Maatregel Klimaatpark IJsselpoort

Onderstaande figuren tonen het landgebruik en de bodemhoogte na inmixen van de baseline-maatregelen van Rivierklimaatpark IJsselpoort (ij_RKP_v52, ij_RKP_VKA_WN2 en ij_RKP_VKA35a1). De kaarten zijn geproduceerd door Witteveen+Bos.

Deze maatregelen zijn door Witteveen+Bos in Baseline5-format op 28 mei 2020 opgeleverd aan RWS.



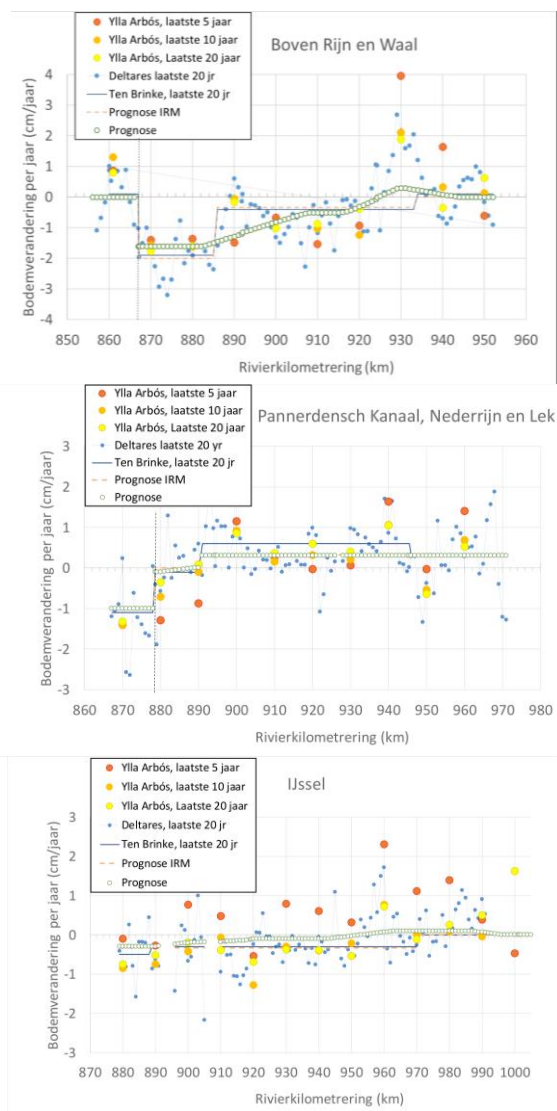
Figuur C.1 Landgebruik (boven) en bodemhoogte (onder) in maatregel Klimaatpark IJsselpoort.

C.1.3 Aanpassing bodemhoogte

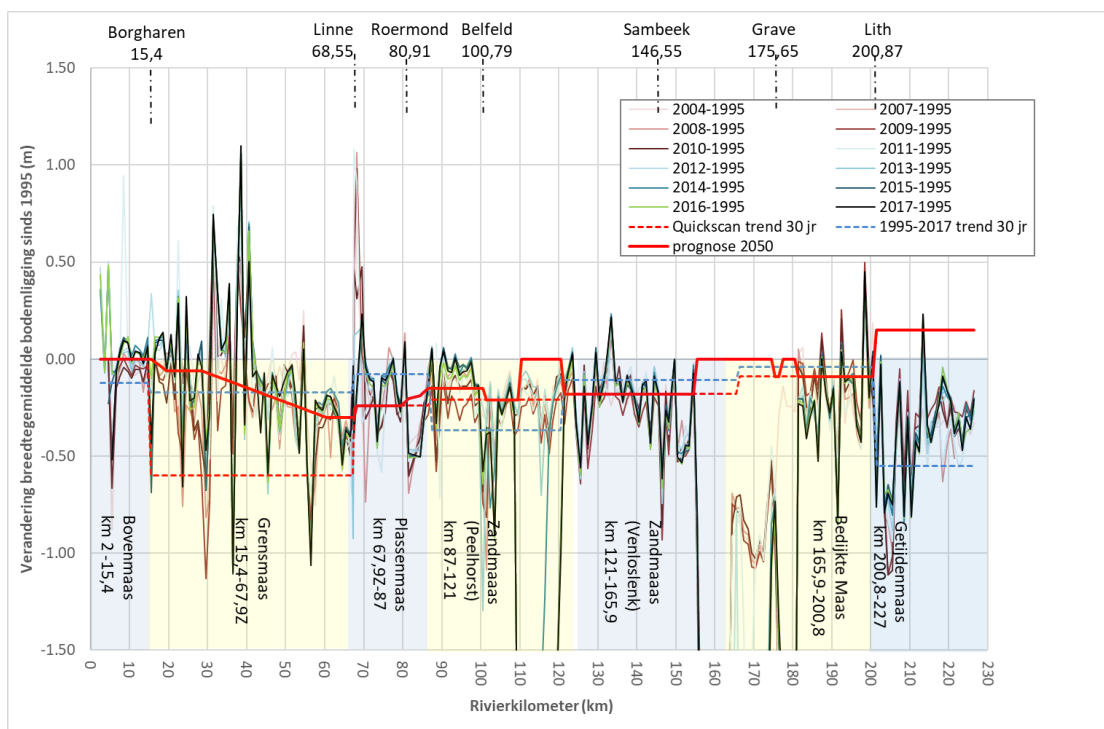
Door rivierbodemerrosie is de bodem van het zomerbed van de rivier continu in ontwikkeling. Op sommige trajecten is er sprake van een trend van verdere rivierbodemerrosie, op andere plekken juist een trend van sedimentatie. Scenario's zijn ontwikkeld voor de bodemverandering in 2050 voor de Rijn (Sloff, 2019) en voor de Maas (Sloff, 2021).²⁵ Deze scenario's zijn eerder hydraulisch doorgerekend in 1D-modellen (SOBEK3) door aanpassing van het zomerbed (De Jong, 2020a; De Jong & Van der Mark, 2021; De Jong & Schippers, 2021). Voor IRM is de wens de hydraulica te berekenen met behulp van 2D-modellen en wordt daarom aangesloten bij het uitgangspunt van BOI voor het gebruik van D-HYDRO.

Opgemerkt wordt dat de bodemscenario's uitgaan van het huidige beleid. Momenteel zijn hier ontwikkelingen gaande, waardoor bijvoorbeeld aanzandingen niet toegelaten worden en worden weggebaggerd. Ook zou de zandhonger van de Waal gecompenseerd gaan worden door suppletie. Beide ontwikkelingen zitten niet opgenomen in de bodemscenario's.

²⁵ Door Sloff (2019; 2021) wordt gebruik gemaakt van Quick-Scan IRM (Ten Brinke, 2019) in de opzet van de bodemscenario's. Deze Quick-Scans zijn niet geschikt voor toepassing in modellering omdat ze zijn opgesteld voor trajecten van tientallen kilometers. De scenario's van Sloff zijn hier een verfijning op per rivierkilometer.



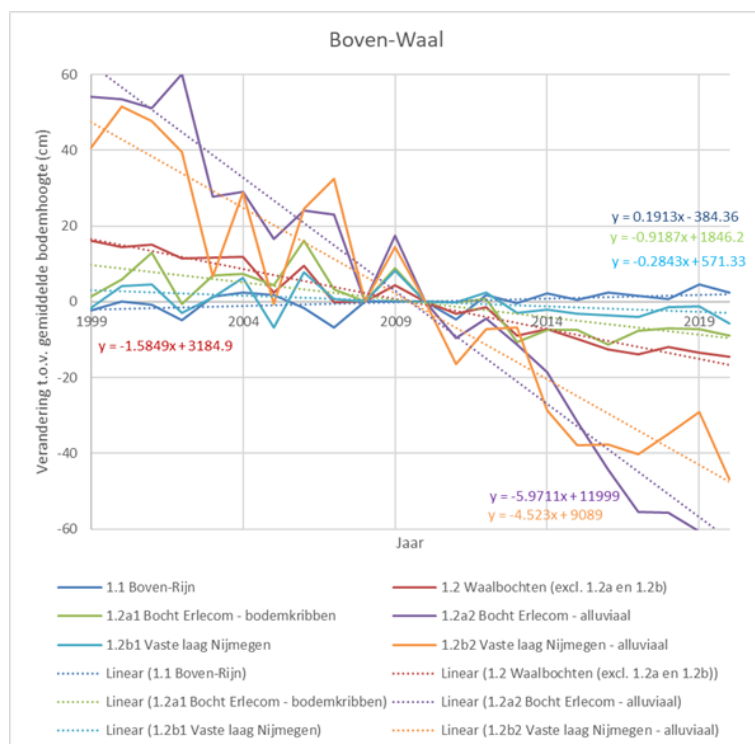
Figuur C.2 Toegepaste trend in bodemontwikkeling op de Rijn ("Prognose", groene bolletjes) in relatie tot de metingen. Om tot het scenario van 2050 te komen wordt dit vermenigvuldigd met 31 jaar. Het scenario "Prognose IRM" is het resultaat van een eerder project en in deze studie niet verder toegepast. (Sloff, 2019)



Figuur C.3 Bodemontwikkeling op de Maas (doorgetrokken rode lijn) in relatie tot de metingen. Op de Bergsche Maas zijn geen gegevens in de analyse aanwezig. (Sloff, 2021) In het model is de bodemtrend op de op de Getijdenmaas ook toegepast op de Bergsche Maas.

De aanpassing van de bodemhoogte in 2D-modellen vraagt meer aannamen en ingewikkeldere scripts. Een aanzet voor de methode is eind 2021 gemaakt door detachering van Witteveen+Bos (Duró, 2021a; Duró, 2021b) en in 2022 verder uitgewerkt door Deltares. Deze methode maakt gebruik van GIS-bestanden die gebaseerd zijn op datalagen uit Baseline, een scenario van de bodemhoogte verandering dat gedefinieerd is in een csv bestand, en scripts in Matlab waarin het bodemhoogtebestand (het roosterbestand) wordt bijgewerkt.

Ter hoogte van vaste lagen van Erlecom en Nijmegen is een aanpassing doorgevoerd in de trends uit Sloff (2019). Doordat de alluviale breedte van de rivier hier smaller is, is de erosie hier sterker. Op basis van data van RWS-ON is een analyse uitgevoerd van deze trends (zie Figuur C.4 en Tabel C.1) en is gekozen gebruik te maken van -5.97 cm/jaar bij Erlecom en -4.52 cm/jaar bij Nijmegen. Er is geen correctie bij St. Andries doorgevoerd omdat de trends hier te klein zijn en met metingen niet kunnen worden onderbouwd. In de bodemtrends zijn deze correcties lokaal (hectometer resolutie) geïmplementeerd.



Figuur C.4 Analyse van de relatieve verandering in bodemligging van verschillende riviervakken. Deze analyse is uitgevoerd op basis van P-map data aangeleverd door RWS-ON (M. Reneerkens). De data toont het verschil in bodemhoogtetrend tussen de 'normale rivier', de vaste lagen, en de alluviale strook langs de vaste lagen. De trendlijn is gegeven in de figuur waarbij de helling van de lijn het aantal cm/jaar aangeeft.

Tabel C.1 Trends in bodemhoogte op basis van de data uit Figuur C.4. Opgemerkt wordt dat de toename in trends vrijwel gelijk is aan het omgekeerde van de verandering in alluviale breedte. Dit is conform de theoretische verwachting.

Traject	Trend, verandering per jaar (cm)	Rel. trend t.o.v. Waalbochten (-)	Rel. trend t.o.v. vaste laag (-)	Breedte (m)	Rel. breedte (-)
1.2 Waalbochten (excl. 1.2a en 1.2b)	-1.58	1.00		260	1.00
1.2a1 Bocht Erlecom - bodemkribben	-0.92	0.58		170 à 180	0.65 - 0.69
1.2a2 Bocht Erlecom - alluviaal	-5.97	3.77	6.50	80 à 90	0.31 - 0.35
1.2b1 Vaste laag Nijmegen	-0.28	0.18		160 à 190	0.62 - 0.73
1.2b2 Vaste laag Nijmegen - alluviaal	-4.52	2.85	15.91	60 à 80	0.23 - 0.31

De trends worden toegevoegd volgens een methode die op hoofdlijnen bestaat uit de volgende stappen:

- 1 Vermenigvuldigen van de prognose van de trend per jaar, met het aantal jaren tot 2050. Voor de Rijn is vermenigvuldigd met 32 jaar (van 2018 naar 2050). voor de Maas nog met 31 jaar.
- 2 Selectie van alle cellen in het zomerbed. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de zomerbed polygoon in Baseline met een buffer van 5 meter om te voorkomen dat de bodempunten op de rand worden meegenomen.²⁶ Ter hoogte van vaste lagen worden de cellen uitgesloten.
- 3 Corrigeren van de bodemhoogte op basis van een opgegeven scenario:
 - Voor iedere gridcel bepaal het (op afstand) gewogen gemiddelde tussen omliggende rivierkilometers.
 - Deze afstand wordt berekend op basis van de rivieras voor de Maas zodat interpolatie ook in bochtige trajecten goed gaat.
- 4 De aangepaste bodemhoogte wordt geëxporteerd naar een nieuw rooster-bestand (hierin zit ook de bodem opgeslagen).

Ten opzichte van Duró zijn de volgende aanpassingen nog doorgevoerd:

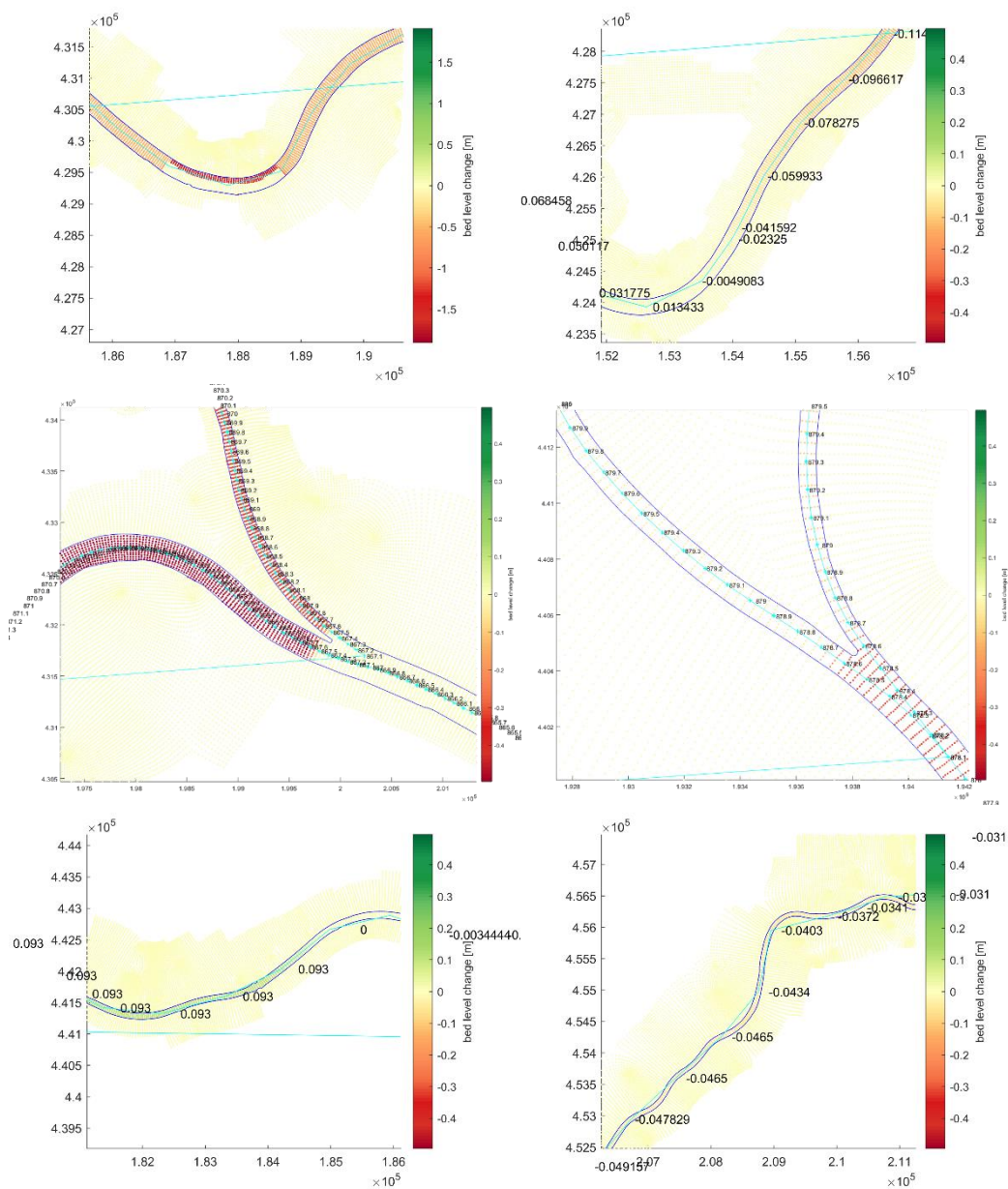
- Rijn: Opname van de bovenste polygoon van de IJssel in het bodemhoogte-scenario.
- Rijn: De optie om vaste lagen uit te sluiten is toegevoegd
- Verbeteren methode van stap 3
- Verbeteren van de output figuren

In de simulaties wordt nu gebruikt van de volgende versies:

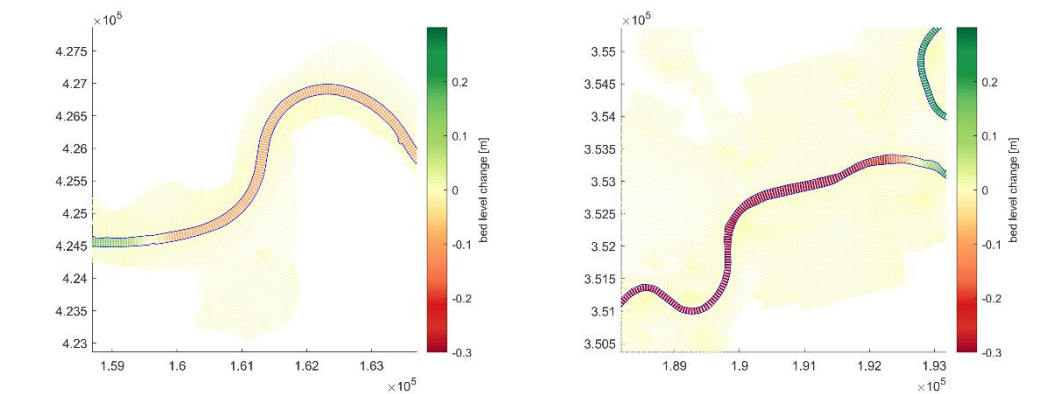
- maas_03 (d.d. 15 maart)
- rijntakken_04 (d.d. 6 maart)

Opgemerkt wordt dat enkel de bodemhoogte in het rekenrooster van het model is gecorrigeerd. Bodemhoogte in lijnelementen is verondersteld constant te zijn. Hierdoor blijven bijvoorbeeld kribben en grinddrempels op dezelfde hoogte liggen. Dit is in overeenstemming met de praktijk: de overlaten zijn bijvoorbeeld in de historie relatief steeds hoger geworden ten gevolge van de rivierbodemerossie. De grinddrempels worden daarnaast actief door RWS op hoogte gehouden om te voorkomen dat bij lage waterstanden de rivierpeilen en daarmee de grondwaterstanden te ver uit kunnen zakken.

²⁶ Het rekenrooster is ontworpen om (in de basis) met de hoekpunten precies op de omhullende van het zomerbed te liggen. Door orthogonalisatie zijn er kleine verplaatsingen geweest. Hierdoor is het willekeurig of deze punten wel of niet worden toegekend in deze polygoon vallen. Door een buffer te nemen wordt de deze willekeur verkleind, maar niet volledig verholpen.



Figuur C.5 Bodemhoogteverandering Rijn



Figuur C.6 Bodemhoogteverandering Maas

Mogelijke verbeterpunten:

- Opname drempels en bodembescherming bij stuwen
- Op sommige punten zorgt de gebruikte zomerbedpolygoon ervoor dat enkele locaties in het zomerbed net niet aangepast worden. Mogelijk is een aanpassing aan de zomerbedpolygoon hier wenselijk.
- Rondom vaste lagen op de Rijn zijn er enkele oneffenheden in de overgang tussen vaste laag en alluviale bodem. Vermoedelijk kan dit worden opgelost door ook op de Rijn de rivieras mee te nemen in het interpoleren van de trends (dit is nu enkel voor de Maas gedaan).

C.1.4

Randvoorwaarden

Voor de randvoorwaarden wordt onderscheid gemaakt in twee categorieën: (dynamische) hoge afvoergolven, en (stationaire) lage (en gemiddelde) afvoeren.

Voor de hoge afvoergolven kan voor zowel de Maas als de Rijn gebruik gemaakt worden van de randvoorwaarden zoals ontwikkeld worden voor BOI. Voor de Rijn is dit gedocumenteerd in Asselman et al. (2021). Voor de Maas zijn recent nieuwe randvoorwaarden ontwikkeld waarin ook gebruik wordt gemaakt van deze QH-relaties (De Jong, 2022). Voor deze randvoorwaarden van de Maas betreft dit de eerste toepassing.

Voor de lage afvoeren kan voor de Rijn en de Maas wordt gebruik gemaakt van de randvoorwaarden voor de 'stationaire lage afvoeren' zoals beschreven in De Jong et al. (2021). De stationaire randvoorwaarden zijn zo gekozen dat deze aansluiten, maar niet overlappen, met de piekafvoer van de afvoergolven. Het aantal stationaire simulaties is hierdoor relatief beperkt.

Iedere randvoorwaardenset bestaat uit een bovenstroomse modelrand bij Doornik (Rijn) of Lixhe (Maas) en vele tientallen zijdelingse instromingen en onttrekkingen (ook wel lateralen). Deze lateralen bevatten zowel grote beken, als kleine gemalen en zijn gebaseerd op de regressies van Van der Veen (2018a; 2018b). Deze lateralen zijn niet afhankelijk gemaakt van klimaatverandering en bevatten ook geen nieuwe ontwikkelingen zoals een veel grotere onttrekking door het Betuwepand voor zoetwatervoorziening (Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem, KZH). Het effect hiervan op de modelresultaten is beperkt tot enkele centimeters waterstandsverschillen. In de waterverdelingsmodellering van QWAST is dit in meer detail opgenomen.

In alle gevallen worden de QH-relaties bij Krimpen, Hardinxveld en Keizersveer gebruikt zoals ontwikkeld met het rmm-j19-model (Van der Wijk, 2022). Deze QH-relatie bevat de maximale waterstand bij een gemiddeld getij. Er is gekozen voor de variant met 5 cm zeespiegelstijging (conform uitgangspunten BOI). Omdat voor IRM een later zichtjaar wordt gehanteerd zou volgens scenario's een grotere zeespiegelstijging meegenomen moeten worden. Een QH-relatie voor die condities is echter nog niet beschikbaar.

Tabel C.2 Overzicht randvoorwaarden in hydraulische modellen. Grijsgedrukt is wel aanwezig maar wordt niet gebruikt.

Rijntakken		Maas	
Piekafvoer afvoergolven (m ³ /s)	Stationaire afvoeren (m ³ /s)	Piekafvoer afvoergolven (m ³ /s)	Stationaire afvoeren (m ³ /s)
“JAMR/BOI” (De Jong et al., 2021)	“JAMR/BOI” (De Jong et al., 2021)	“BOI” (De Jong, 2021)	“JAMM” (De Jong et al., 2021)
D6000	S600	D1300	S50
D8000	S1020	D1700	S250
D10000	S2000	D2100	S1500
D12000	S4000	D2500	
D13000		D2800	
D14000		D3200	
D15000		D3600	
D16000		D4100	
D17000		D4500	
D18000		D5000	
D20000		D6000	
D24000			

- C.1.4.1. Afvoerdeling Rijntakken
- Bovenstaande vastgestelde set met randvoorwaarden maakt gebruik van relatief grote sprongen in het lagere afvoerbereik. Dat terwijl juist deze afvoeren belangrijk zijn voor zoetwatervoorziening. Met name het knippunt waarop stuw Driel weer verder open gaat is hierin belangrijk.

Om dit goed te modelleren is een aanvullende simulatie gedaan ten behoeve van deze afvoerdeling. Hierbij is gebruik gemaakt van een semi-stationaire som waarbij de afvoer in stapjes van 50 m³/s oploopt van 500 naar 2.000 m³/s. Iedere afvoer wordt 2 dagen vastgehouden. In de simulatie is geen gebruik gemaakt van laterale instromingen (deze staan op 0 m³/s), ondanks dat dit wel een groot effect kan hebben op de afvoerdeling.

C.1.5 Afregelen regelwerken

Bij de splitsingspunten van de Rijntakken kan met behulp van regelwerken de afvoer worden gereguleerd. Voor aanvang van ieder hoogwaterseizoen worden de schotten van de regelwerken Pannerden en Hondsbroeksche Pleij aangepast zodat (indien dit zou optreden) de beleidsmatige vastgestelde afvoerdeling (BVA) wordt verkregen. Ook in het Rijntakken-model dient bij aanvang van ieder project de regelwerken ingesteld te worden op deze afvoerdeling. Voor IRM wordt uitgegaan van de gewenste afvoerdeling (GA) bij een afvoer Lobith van 17.000 m³/s conform het beleid “Lek Ontzien” met de afvoerdeling gegeven in Tabel C.4 (Spruyt & Asselman, 2017). Om dit te bewerkstelligen wordt de methode gevolgd zoals beschreven in Paragraaf 3.1 van Kusters (2022).

Met het Rijntakken-model wordt eerst een stationaire simulatie zonder lateralen uitgevoerd met 17.000 m³/s bij Lobith met hierin regelwerken die door het RTC-model in hoogte veresteld wordt tijdens het hoogwater.²⁷ De hoogtes die hieruit volgen worden vervolgens in de overige simulaties toegepast als vaste instelling. Het regelbereik wordt beperkt tot de fysieke dimensies van de regelwerken.

De resultaten van de afregeling van de regelwerken is gegeven in Tabel C.3. De resultaten lijken vooralsnog plausibel: doordat de Lek wordt ontzien zal HP bij 17.000 m³/s verder open moeten, hierdoor zijn er relatief lage waterstanden op het Pannerdensch Kanaal waardoor RP verder dicht moet om de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop in stand te houden. Dat laatste blijkt ook uit Spruyt & Asselman (2017). Bij rivierbodemerisatie (IRM 2050) trekt de Waal meer afvoer en moet het Regelwerk Pannerden verder geopend worden op de afvoerverdeling niet te laten schuiven.

Tabel C.3 Hoogte (m+NAP) van de regelwerken in verschillende modellen. De modellen j19 en beno19 zijn afgeregeld op de BVA bij 16.000 m³/s. Het IRM-model is afgeregeld op de BVA bij 17.000 m³/s.

Naam regelwerk	Regelbereik	j19_6-v2a (Kosters, 2022)	beno19_6-v1a (Kosters, 2022)	IRM 2018	IRM 2050
Pannerden	12.00 – 17.00	13.9112	14.3130	16.71	15.82
Hondsbroeksche Pleij	11.00 – 15.20	15.2 ¹	15.2 ²	13.61	13.70

¹ Dit is de maximale hoogte. Het verschil met de gewenste verdeling is 2 m³/s (te weinig naar Nederrijn, te veel naar IJssel)

² Dit is de maximale hoogte. Het verschil met de gewenste verdeling is 9 à 10 m³/s (te weinig naar Neder-Rijn, te veel naar de IJssel)

Tabel C.4 Afvoerverdeling (m³/s) na afregeling regelwerken

	BVA 16.000	GA 17.000 “Lek ontzien”	IRM 2018	IRM 2050
Bovenrijn	16.000	17.000	17.000	17.000
Waal	10.165	10.970	10.970	10.970
Pannerdensch Kanaal	5.835	6030	6030	6030
Neder-Rijn	3.376	3376	3376	3376
IJssel	2.459	2654	2654	2654

Bij de resultaten voor IRM 2050 zit er meer schommelingen in het (stationaire) debiet over tijd dan bij IRM 2018. Ordegrote 1-10 m³/s.

C.1.6

Stuwsturing

De stuwsturing is in de nieuwe actuele modellen in D-HYDRO herzien ten opzichte van WAQUA. Deze aanpassingen waren deels noodzakelijk omdat bij lage afvoer een open verbinding ontstaat tussen Lek en Waal door het openen van de Prins Bernhardsluizen. Deze stuwsturing staat uitgebreid gedocumenteerd in Kosters (2022), maar is relatief ingewikkeld om te zorgen voor een stabiele stuwsturing bij zowel stijgende als dalende afvoergolven. Om de modelresultaten te begrijpen is in deze paragraaf een samenvatting van de stuwsturing opgenomen.

²⁷ Er wordt gebruik gemaakt van de huidige QH-relaties. Door RWS-ON is opgemerkt dat hierdoor niet wordt meegenomen dat door een veranderende verdeling over Lek en Waal de QH-relaties beïnvloed zouden worden. Dit effect is vermoedelijk klein, maar niet gevalideerd met berekeningen.

Figuur C.7 Overzicht stuwregimes per stuw. De grijsgedrukte condities worden vermoedelijk in de simulaties van IRM niet bereikt.

Stuw Driel			
	Beschrijving	Wanneer	Opmerking/interpretatie
A	Stuw strijken i.v.m. negatief verval	H_IJsselkop < 6 m	
B	Sturing op afvoeren	H_Lobith < 8.85 m+NAP	Afnemend van 40 tot 0 m³/s (bij H_Lobith=6 m+NAP)
C	Sturing op waterstanden		Geen vast peil. Peil bij H_Driel afhankelijk van H_Lobith tussen 8.25 – 7.5 m+NAP
D	Stuw strijken i.v.m. hoge afvoer	H_Lobith > 10.05 m+NAP	
Stuw Amerongen			
	Beschrijving	Wanneer	Opmerking/interpretatie
A	Stuw strijken i.v.m. negatief verval	dH < 0 m	<i>Bij zeer zeer zeer lage afvoeren?</i>
B	Sturing op waterstanden		Peil: 6 m+NAP. Tussen H_Lobith > 9.1 en < 11.4 m+NAP wordt dit langzaam verlaagd naar 5.5 m+NAP.
C	Stuw strijken i.v.m. hoge afvoer	H_Lobith > 11.4 m+NAP	
D	<i>Stuw strijken i.v.m. negatief verval</i>	<i>dH < 0 m</i>	<i>Dalend peil Amerongen en stijgende waterstand op pand Hagestein zorgen weer voor negatief verval. Wordt vermoedelijk nooit bereikt</i>
Stuw Hagestein			
	Beschrijving	Wanneer	Opmerking/interpretatie
A	Stuw strijken i.v.m. negatief verval	dH < 0 m	<i>Als H_Tiel < H_getij/storm?</i>
B	Sturing op afvoeren	H_Tiel < 3 m+NAP	PBS open. Enkel Q_vistrap: 0.5 tot 5 m³/s
C	Sturing op waterstanden		Peil: 3 m+NAP. Tussen H_Lobith > 9.1 en < 11.4 m+NAP wordt dit langzaam verlaagd naar 2.7 m+NAP
D	Stuw strijken i.v.m. hoge afvoer	H_Lobith > 11.4 m+NAP	
E	<i>Stuw strijken i.v.m. negatief verval</i>	<i>dH < 0 m</i>	<i>Misschien bij hele hoge storm</i>

Uit de evaluatie van de stuwsturing wordt het volgende geconcludeerd:

- Bij zeer lage afvoeren wordt stuw Driel gestreken (Regel Driel A). De afvoerverdelingsfunctie (regel Driel B) wordt dan in de praktijk overgenomen door stuw Amerongen. Dit zit niet in de huidige modellering opgenomen. Hierdoor neemt de afvoer naar de Nederrijn af naar 0 m³/s.
- In de stuwsturing van Hagestein zit bij lage afvoer enkel de vistrap opgenomen. In de stuwsturing wordt er vanuit gegaan dat de vizierstuw en omloopriolen volledig gesloten blijven. In werkelijkheid zien we echter een belangrijke functie van afvoer over Hagestein in het voorkomen van verzilting van de Lek.

Beide punten worden in het model niet aangepast, waardoor dit ook uit de resultaten zal volgen. Om meer inzicht te krijgen in de werking van het systeem wordt een extra berekening gestart waarbij de afvoer door Hagestein en de Prinses Irenesluizen wordt verhoogd. Zie hiervoor paragraaf C.3.

C.1.7 Modeluitvoer

De modelresultaten worden uitgevoerd op een tijdstap van 5 minuten. Voor de verwerking worden de volgende resultaten uit het model verkregen:

- Voor dynamische afvoergolven (D...) wordt het maximum van een lopend gemiddeld over 13 tijdstappen (1 uur) genomen.
- Voor stationaire simulaties (S...) wordt het gemiddelde van de laatste 25 tijdstappen genomen.

Naast de statische figuren zoals in het rapport gepresenteerd. Zijn er ook dynamische figuren gemaakt in html-format. De resultaten zijn beschikbaar in Excel-format.

C.2 Vergelijking resultaten met eerdere studies

C.2.1 Afvoerverdeling Rijntakken

Voor de resultaten o.b.v. de BOI simulaties in paragraaf 4.3.2.1.

Vergelijken we deze modelresultaten met de eerdere SOBEK3 berekeningen in De Jong (2020), dan lijken de resultaten plausibel.

- Bij de lage afvoeren tot 2.000 m³/s is het lastig de resultaten te vergelijken. De verandering in afvoerverdeling bevat hier veel details die in deze resultaten niet zichtbaar zijn (zie hiervoor de paragraaf hieronder). De resultaten van S2000 zitten nu precies in de grote sprong die tussen 1.800 en 3.000 m³/s zichtbaar is in de 1D resultaten.
- Opvallend is dat de 1D resultaten een knippunt geven bij 8.000 m³/s: plotseling gaat de afvoer naar de Waal afnemen, ten koste van de andere riviertakken. Dit is ongeveer de afvoer waarop uiterwaarden beginnen mee te werken. In het 2D model ontbreekt dit knippunt. Mogelijk wordt dit verschil ook veroorzaakt door de wijze waarop de regelwerken zijn geschematiseerd en door het verschil in de gehanteerde afvoerverdeling (uitgaande van een beleidsmatig vast gestelde verdeling behorend bij 16.000 m³/s te Lobith in het 1D model t.o.v. 17.000 m³/s in het 2D model).

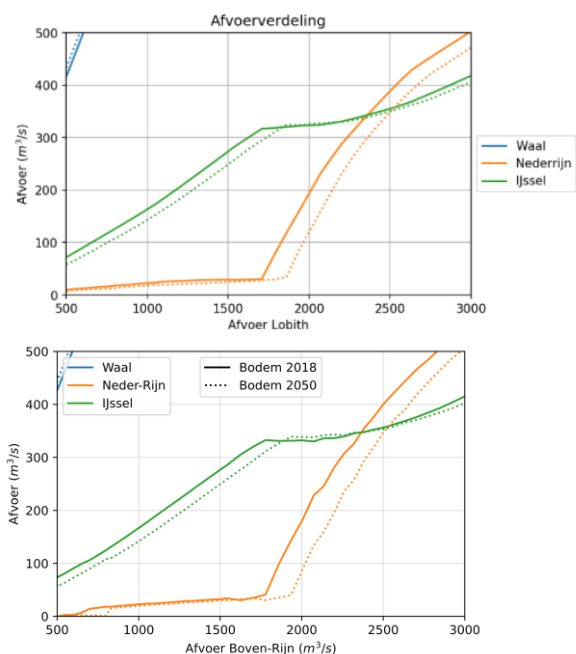
Uit deze visuele vergelijking kan vooral een verandering in trends worden geconcludeerd. Voor een betere kwantitatieve analyse is het nodig de resultaten op elkaar te leggen.

Voor de resultaten bij lage afvoeren uit paragraaf 4.3.2.1

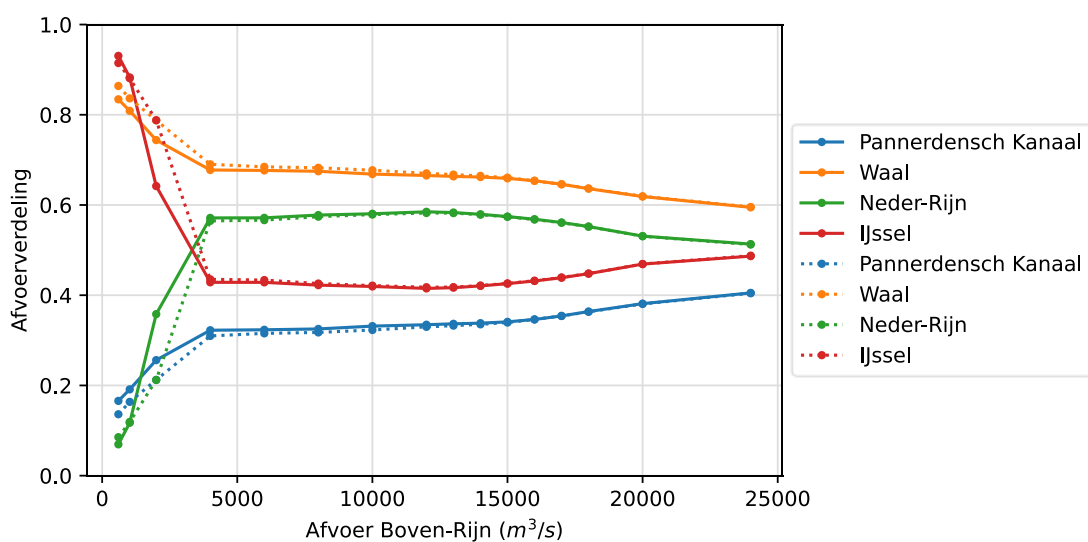
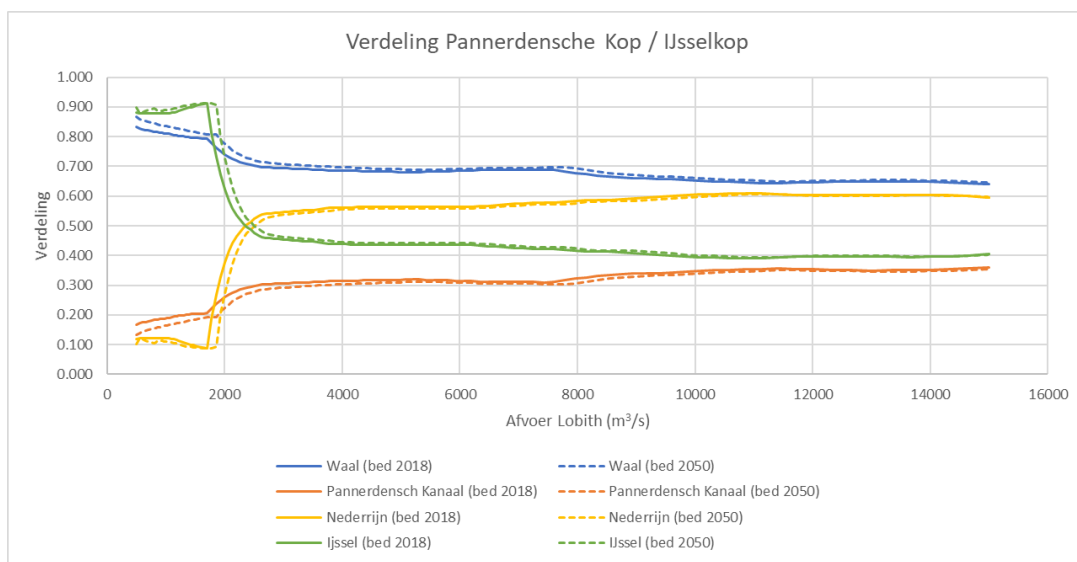
Vergelijken we deze modelresultaten met de eerdere SOBEK3 berekeningen in De Jong (2020), dan lijken de resultaten grotendeels plausibel.

- De veranderingen tussen 800 en 1.800 m³/s verschillen maximaal enkele m³/s: D-HYDRO berekent meer afvoer richting de IJssel, en een kleinere verandering op de Neder-Rijn. Vanwege de extra dimensies van deze schematisaties (2D t.o.v. 1D), wordt vermoed dat de nieuwe resultaten een betrouwbaarder beeld geven.
- Zoals eerder benoemd is het knippunt bij lage afvoeren vermoedelijk niet betrouwbaar, maar ontbreekt hiervoor nog een verklaring.

- Het knikpunt bij hoge afvoeren lag in het 1D model al bij lagere afvoeren, maar de relatieve verschuiving is vergelijkbaar. Ook in 1D is in beide bodemscenario's de afvoer naar de IJssel groter dan 285 m³/s. De verandering in afvoer laat echter bij dit knikpunt wel, bij specifieke afvoeren, in 2D grotere veranderingen zien op Waal en Neder-Rijn. Vermoedelijk doordat de verschuiving van het knikpunt net iets groter is.



Figuur C.8 Berekende afvoerverdeling. Links: SOBEK3 (De Jong, 2020), rechts: D-HYDRO (dit document)

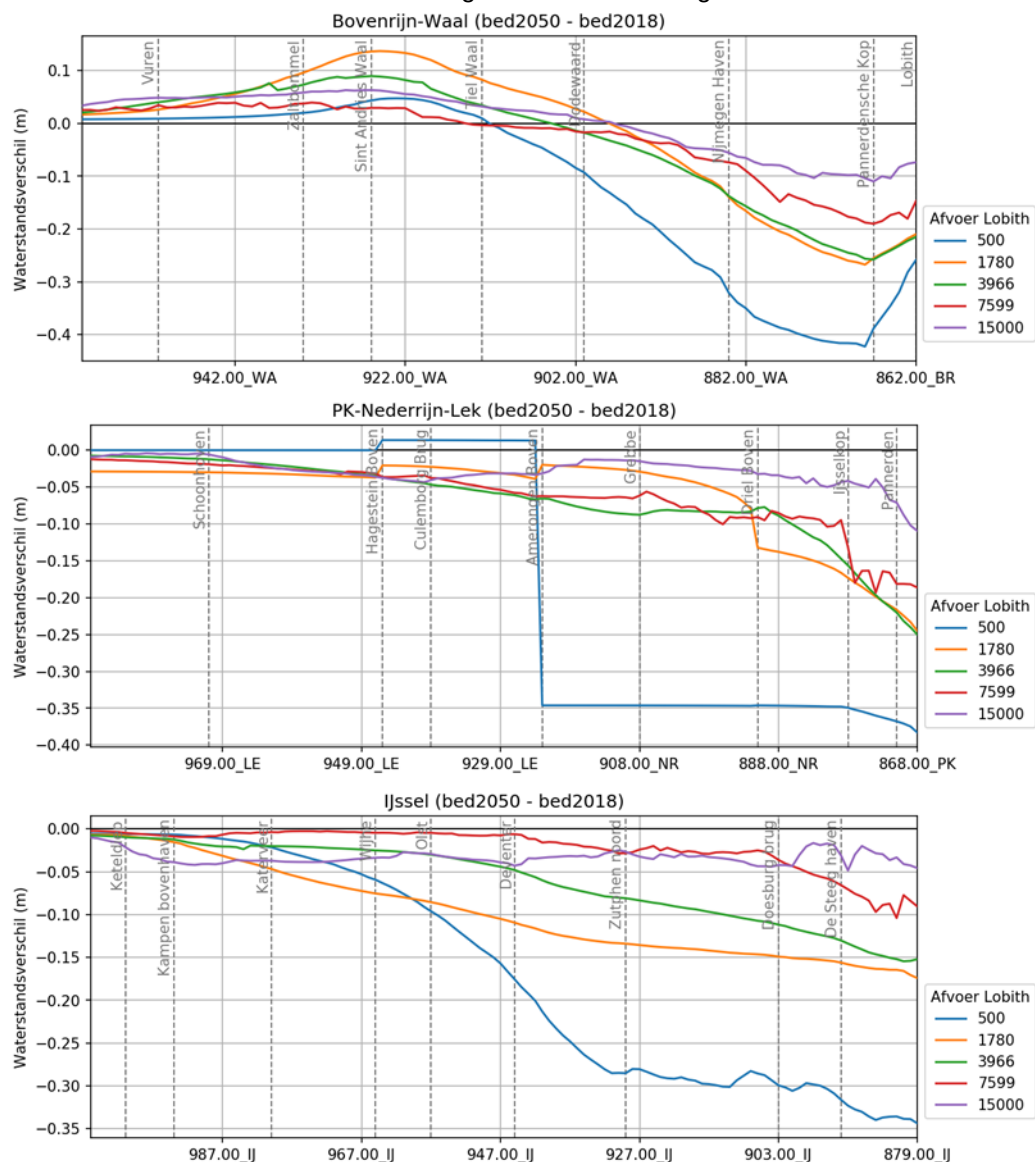


Figuur C.9 Berekende afvoerverdeling Rijntakken. Boven: SOBEK3 (De Jong, 2020), onder: D-HYDRO (dit document)

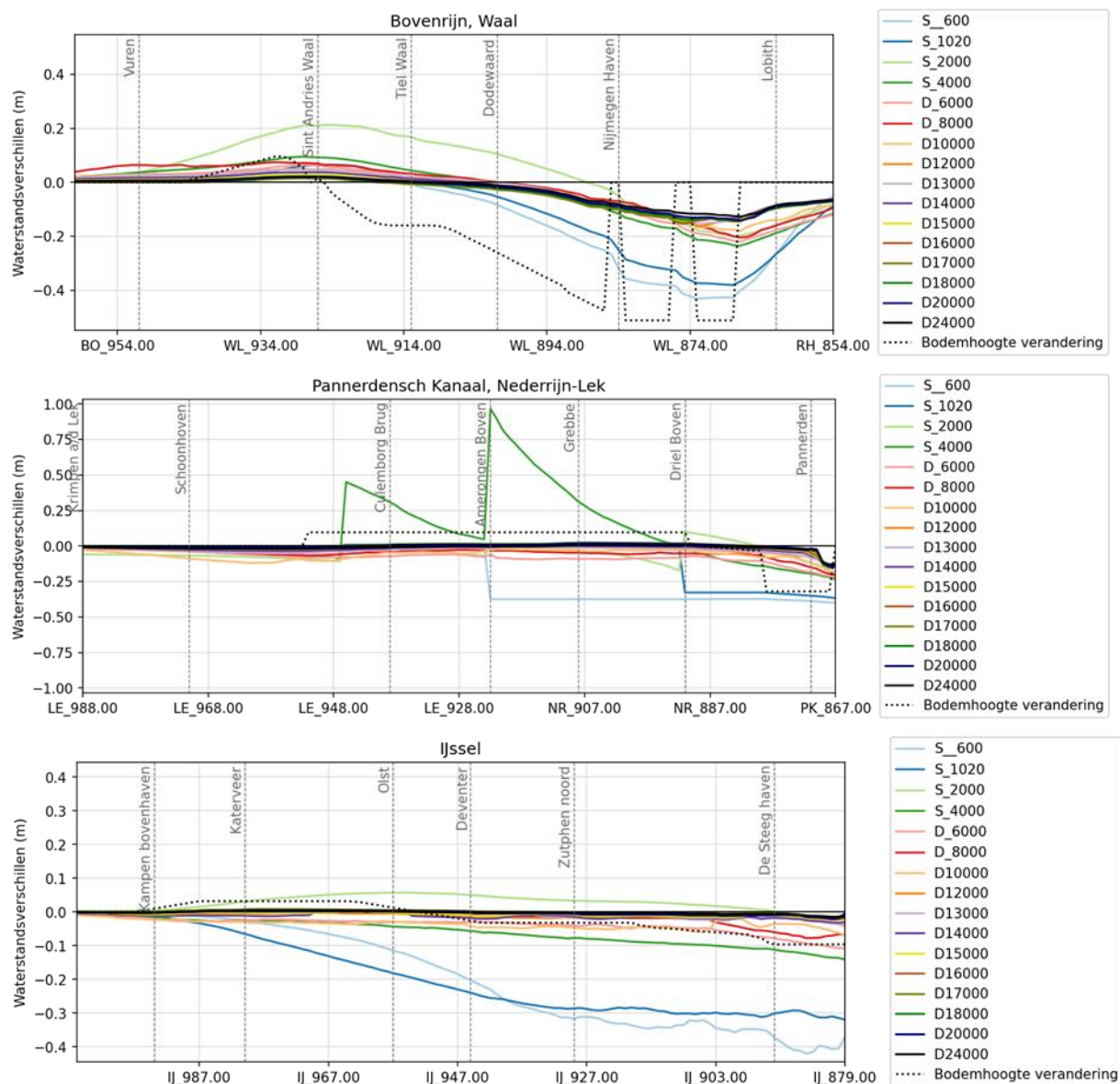
C.2.2

Waterstanden Rijntakken

Goede overeenkomsten met eerder uitgevoerde berekeningen.



Figuur C.10 Waterstandsveranderingen bij veranderende rivierbodempligging berekend met SOBEK



Figuur C.11 Waterstandsveranderingen bij veranderende rivierbodempligging berekend met D-HYDRO

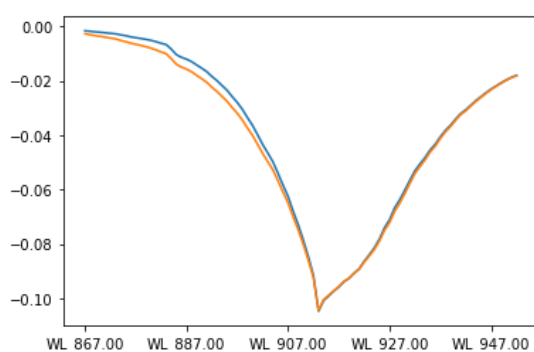
C.3 Gevoeligheid afvoer Betuwepand

Bij lage rivierafvoer ontstaat door het Betuwepand een afvoer omdat dit in open verbinding staat met zowel Waal als Neder-Rijn-Lek. Deze afvoer is gelijk aan de afvoer over stuw Hagestein en de onttrekkingen. In het model wordt bij lage waterstand de stuwsturing afgeregeld op afvoer. Deze afvoer komt echter overeen met de situatie met volledig gesloten stuw, waardoor alleen de afvoer door de vistrap wordt benaderd. Afhankelijk van de waterstand is dit tussen 0.5 en 5 m³/s. In deze afvoer is niet meegenomen dat doorspoeling van de Lek noodzakelijk kan zijn voor zoutindringing. De methode van modellering zorgt er wel voor dat de rivierbodemerodatie geen negatieve bijeffecten kan geven.

Een gevoeligheidsberekening is uitgevoerd waarbij de afvoer door het Betuwepand is verhoogd. In de referentie berekening is dit 27.7 m³/s bij S1020. Dit wordt verhoogd met 40 m³/s:

- Onttrekking Prinses Irenesluizen van 19 naar 39 m³/s
- De afvoer door (vistrap) Hagestein verhoogd met 20 m³/s (bovenop de bestaan 0.5 tot 5 m³/s)

Door de waterstandsdeling op de Waal neemt de afvoer naar de Waal toe. Dit is echter maar beperkt tot 0.2 m³/s. De waterstandsdeling is het grootst bij rkm 913 (-0.1 m, aansluiting ARK) en neemt in beide richtingen af. De halveringslengte van dit effect is in bovenstroomse richting 9 km (rkm 904, t.g.v. stuwkromme), en in benedenstroomse richting 20 km (rkm 933, t.g.v. invloed van zee).



Figuur C.12 Waterstandsverschillen (m) ten gevolge van extra onttrekking Betuwepand bij bodem2018 (blauw) en bodem2050 (oranje)

C.4 Vergelijking situatie IRM met huidige situatie

Deze bijlage beschrijft verschillen in hydraulische effecten tussen de situatie die in IRM wordt gemodelleerd (vergunde situatie, hier met bodemhoogte 2018) en de huidige situatie in werkelijkheid (het j19-model). Dit is een samenvatting van de belangrijkste conclusies van de actualisaties uit het project KPP Hydraulica schematisaties.

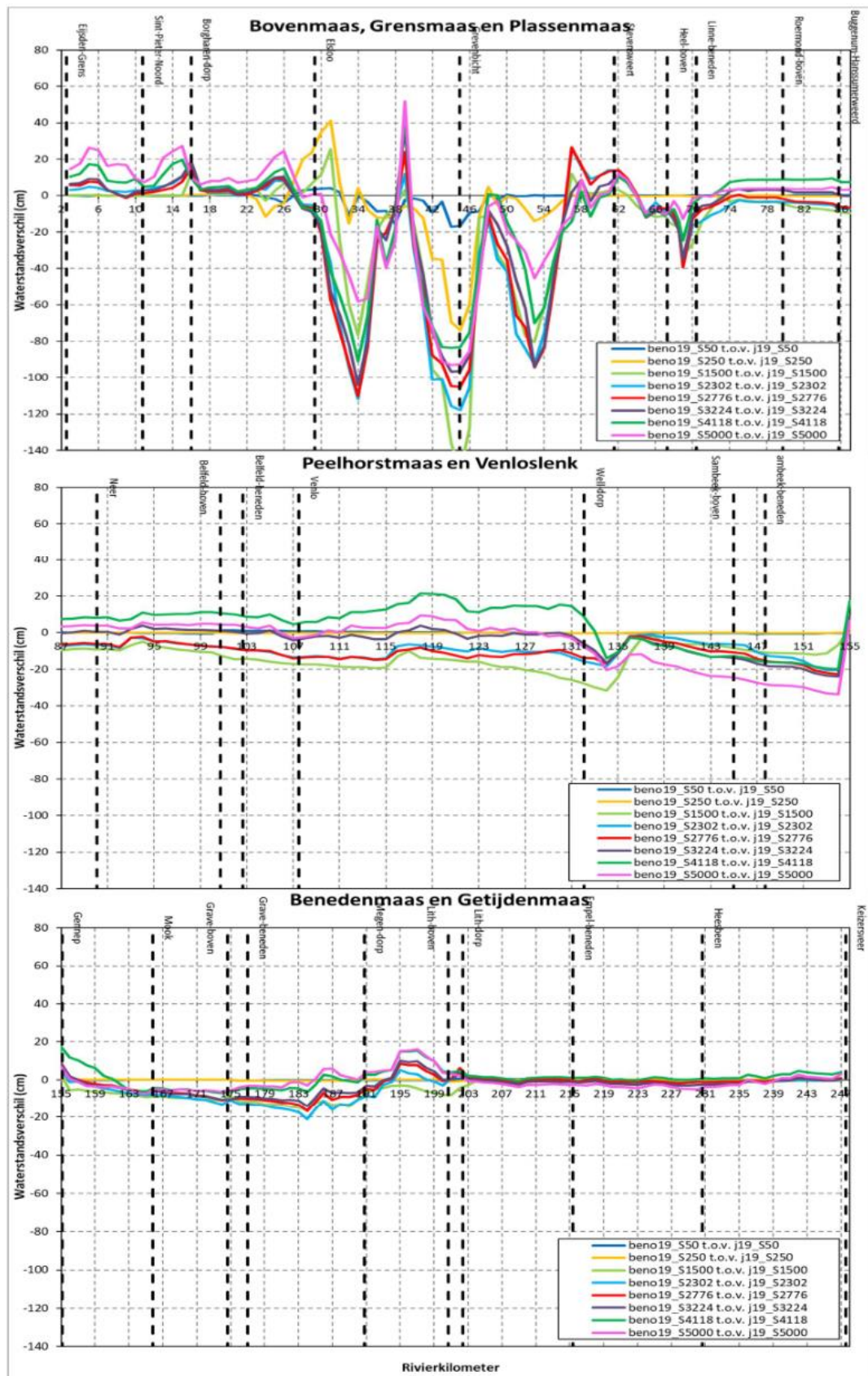
C.4.1 Maas

Voor de Maas wordt het model beno19 gebruikt voor IRM. Dit betekent dat de vergelijking met de actuele situatie zoals uitgevoerd in Hoofdstuk 5 van Van der Deijl et al. (2022) nog geldig is (en vergelijkbare analyse in Domhof & De Jong (2022a)). Voor een uitgebreide analyse wordt naar die rapportage verwezen, hier enkele aandachtspunten.

Veranderingen in waterstanden zijn gegeven in onderstaande figuur. Ten gevolge van de maatregelen kunnen waterstanden veranderen met -140 tot +40 cm. De grootste verschillen zijn op de Grensmaas bij enkele (hieronder uitgelichte) grootschalige maatregelen. Bij lage afvoer (Q50) zijn de verschillen zeer beperkt, bij gemiddelde afvoer (Q250) zijn op de Grensmaas de maatregelen al in beperkte mate merkbaar. Het effect van de rivierkundige maatregelen is het grootste bij condities dat de uitwaarden meestromen (Q1500 en hoger).

De volgende maatregelen worden in Van der Deijl et al. (2021) uitgelicht:

- Maasband (rkm 34 – 36)
- Koeweide (rkm 44 – 49)
- Verruiming Geleenbeek (rkm 57)
- Meeuwisshof (rkm 93)
- Lomm (rkm 115 – 118)
- Maaspark Well (rkm 134 – 138)
- Demen en Dieden (rkm 184-187)
- Meanderende Maas (rkm 191 – 194)
- Natuurvriendelijke oevers getijde Maas (rkm 200-204)



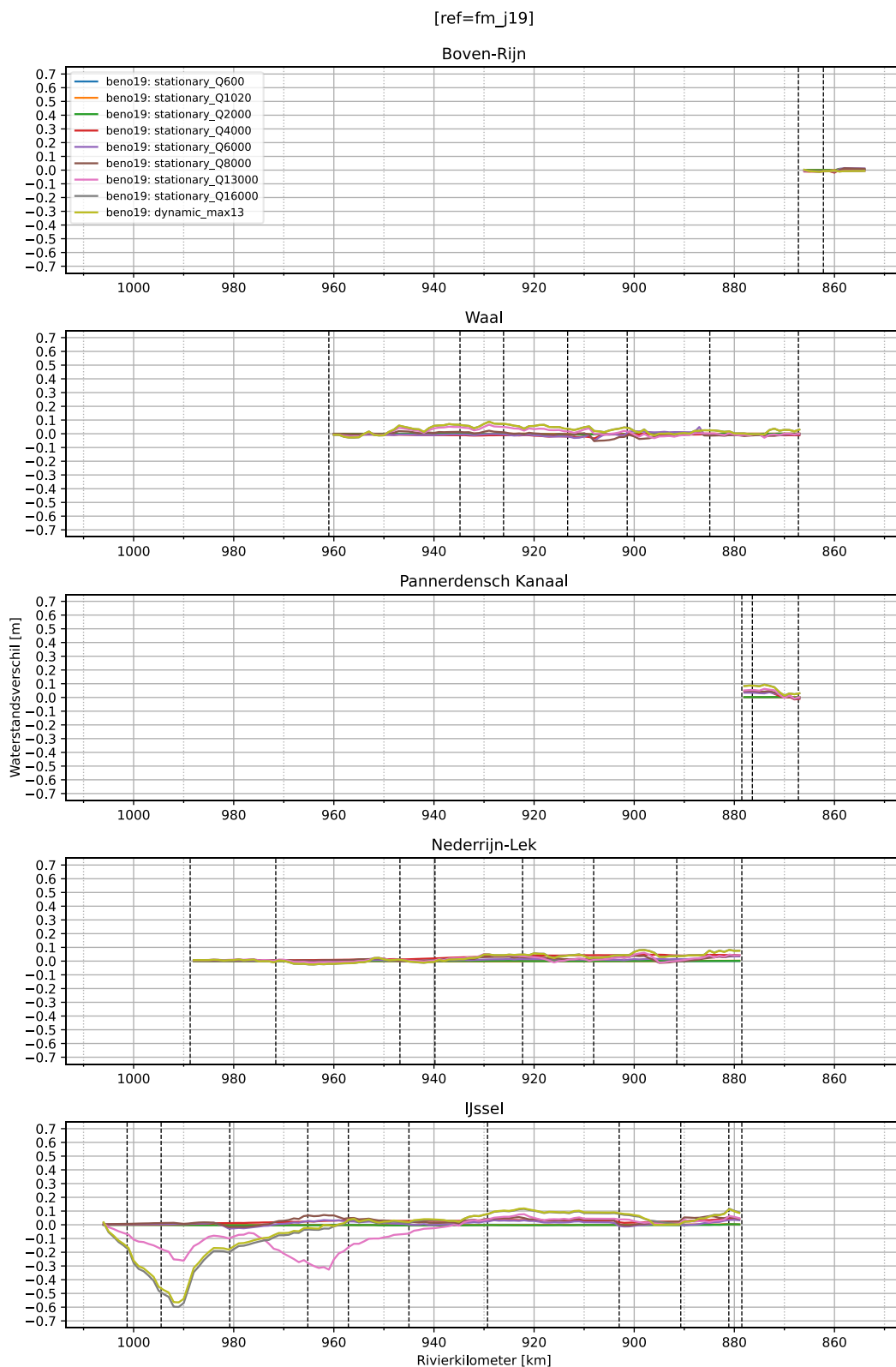
Figuur C.13 Waterstandverschillen tussen vergunde situatie en actuele situatie voor 7 randvoorwaarden (uit: Van der Deijl et al., 2021)

C.4.2 Rijntakken

Voor de Rijntakken is in de actualisatie (Kosters, 2022) niet vergeleken tussen actuele en vergunde situatie. Die vergelijking is wel uitgevoerd in Domhof & De Jong (2022b).

Op de Rijntakken zijn de waterstandsverschillen veel kleiner dan op de Maas. Op alle takken zijn de verschillen tussen -0.1 en +0.1 m. Enige uitzondering is de benedenloop van de IJssel waar door de inzet van Veessen-Wapenveld (rond rkm 960) en het Reevediep (Bypass Kampen; rkm 990) voor sterke waterstandsdalingen zullen zorgen.

Omdat de waterstandsverschillen relatief klein zijn wordt er in deze sectie niet nader op ingegaan. Dit wil overigens niet zeggen dat de verandering in bodemligging in de uiterwaarden door vergunningen beperkt is gebleven. Een verschilanalyse van de bodemliggingen is echter niet uitgevoerd.



Figuur C.14 Verschil in waterstand berekend voor de j19 en beno19 situatie

C.5 Model post-processing

D-HYDRO heeft gedraaid voor een aantal vooraf bepaalde afvoeren. Hierdoor kan per RKM-locatie een QH-relatie worden opgesteld. Door deze QH-relatie te combineren met een Q-tijdreeks van Lobith wordt een H-tijdreeks per RKM bepaald. Met deze methode worden bepaalde aspecten verwaarloosd: hysteresis, looptijd, variatie in laterale onttrekkingen, getij.

C.5.1 Afvoerverdeling (t.b.v. waterdistributiemodellering)

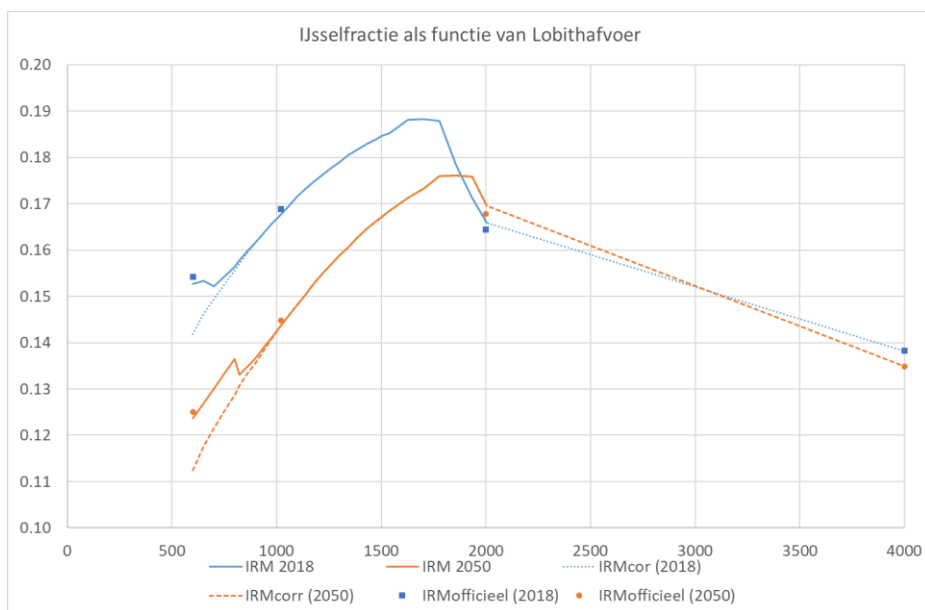
Ten behoeve van simulaties van de waterdistributie in QWAST, is de afvoerverdeling bij de splitsingspunten nodig voor de situatie IRM_2018 en IRM_2050. In samenwerking met de experts in deze modellering, is gebruik gemaakt van een combinatie van de eerder beschreven simulaties:

In de basis wordt gebruik gemaakt van de 'officiële' IRM simulaties met BOI-randvoorwaarden zoals beschreven in paragraaf 0. Deze resultaten blijken echter niet geschikt te zijn voor lage afvoeren, met name het berekenen van de afvoer waarbij stuw Driel volledig gesloten is en de afvoer naar de IJssel snel begint af te nemen (rond 1.800 m³/s). Dit is het moment dat in het model wordt overgeschakeld van sturing op waterstanden naar sturing op afvoer (regime C naar B van paragraaf C.1.6). Dit moment is belangrijk omdat juist rondom dit moment de grootste verandering ontstaat in de afvoerverdeling.

De modelsimulaties worden voor lage afvoeren (600 tot 2.000 m³/s) daarom uitgebreid met de extra semi-stationaire simulatie. Enkel in de reeks van hoge afvoeren (4.000 tot 24.000 m³/s) wordt nu gebruik gemaakt van de BOI-sommen. Tussen 2.000 m³/s en 4.000 m³/s wordt lineair geïnterpoleerd. De hoge afvoeren zijn echter minder relevant in het toepassingsbereik van QWAST.

Ook de resultaten voor lage afvoeren zijn echter niet plausibel voor zeer lage afvoeren (tot 800 m³/s) omdat de afvoer over de Nederrijn lager wordt dan 20 m³/s. Dit wordt veroorzaakt doordat stuw Amerongen geen functie (in werkelijkheid en model) heeft om de afvoer te reguleren, en in deze simulaties geen lateralen zijn meegenomen. Voor dit zeer lage afvoerbereik wordt daarom een handmatige correctie aangebracht. Voor alle afvoeren waarbij de Nederrijn-afvoer lager is dan 20 m³/s, wordt de volgende correctie uitgevoerd:

- Verhogen afvoer naar de Neder-Rijn met $\Delta Q_{NR} = 20 - Q_{NR}$
- Verlagen afvoer naar de Waal met $\Delta Q_{WL} = \frac{2}{3} \Delta Q_{NR}$
- Verlagen afvoer naar de IJssel met $\Delta Q_{IJ} = \frac{1}{3} \Delta Q_{NR}$



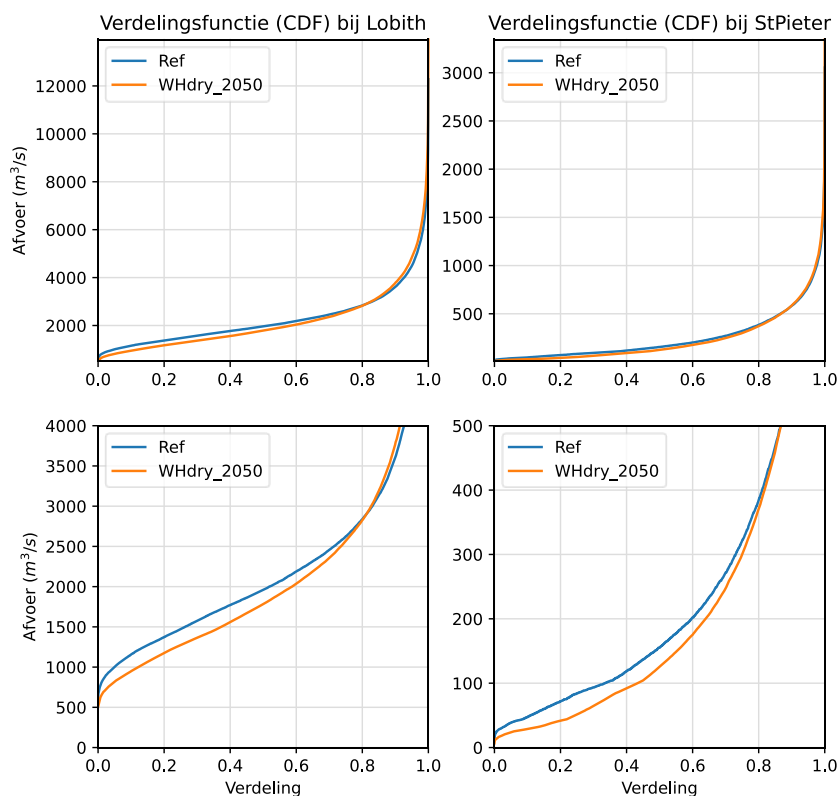
Figuur C.15 Ijssel fractie t.b.v. QWAST. De figuur bevat de BOI-randvoorwaarden (stippen), de semi-stationaire resultaten (doorgetrokken lijn) en het handmatig gecorrigeerde resultaat voor QWAST (stippellijn)

Vanwege het lange interpolatietraject tussen 2.000 en 4.000 m³/s, en de verwachting dat de curve hier niet recht moet zijn maar convex zijn na afronding van de eerste simulaties met de semi-stationaire randvoorwaarde, nieuwe simulaties gestart die doorliepen tot 3.000 m³/s (i.p.v. 2.000 m³/s). Deze konden echter in de resultaten niet meer meegenomen worden, maar staan wel beschreven in paragraaf 4.3.2.1 en worden aanbevolen voor vervolgstappen.

C.5.2 Distributiekrommes (t.b.v. natuurmodellering)

Voor de doorvertaling van veranderingen in waterstanden voor de potentie voor natuur, wordt gebruik gemaakt van waterstandsduurlijnen: bijvoorbeeld welke waterstand wordt gemiddeld 20 dagen per jaar overschreden. Dit kan het best bepaald worden door een zeer lange tijdreeks door te rekenen en hierop per locatie de statistieken af te leiden (zoals een periode van 100 jaar in DPZW). Door de toepassing van 2D modellen is een dergelijke lange simulatie in IRM niet mogelijk, en is gebruik gemaakt van de beschikbare IRM-simulaties (zoals gegeven in Tabel C.2).

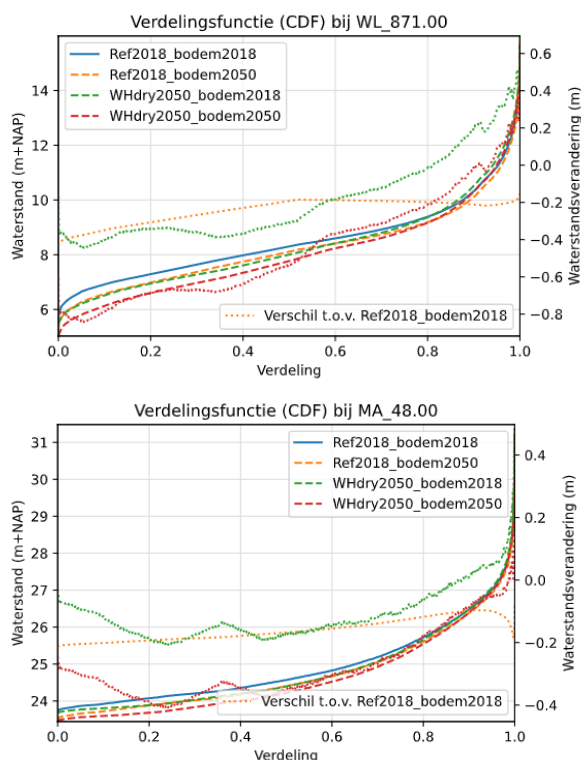
Hiervoor wordt in iedere simulatie gebruik gemaakt van de (piek)waterstanden bij de ten opzichte van de afvoer bij de bovenrand (feitelijk de naam van de simulatie). Van de afvoer bij de bovenrand (dus ofwel Lobith of St. Pieter) is een distributiekromme berekend op basis van de 100-jarige reeks van het DPZW. Omdat de 100-jarige reeks op de Maas is bepaald ter hoogte van Monsin is hier nog een correctie uitgevoerd om te corrigeren naar St. Pieter. Hiervoor is gebruik gemaakt van de regels van het Maas-afvoeroverdrag. Zie Figuur C.16.



Figuur C.16 Distributiekromme bij Lobith en St. Pieter. De onderste figuren zijn een detail van de bovenste figuren bij lage afvoeren.

Doordat slechts gebruik gemaakt is van enkele afvoeren, moet tussen de bekende afvoeren gebruik gemaakt van interpolatie. Op basis van de simulaties wordt per rivierkilometer een QH-relatie opgesteld waartussen lineair wordt geïnterpoleerd. Door in deze functie te interpoleren voor alle kleine afvoersteps uit Figuur C.16, wordt de vorm van de distributiekromme wel behouden. Het resultaat is gegeven in Figuur C.17 voor twee willekeurige locaties.

In de figuur is bijvoorbeeld te zien dat bij de Millingerwaard de waterstand ongeveer -0.2 tot -0.4 m afneemt ten gevolge van rivierbodemeris (oranje lijn). Door klimaatverandering (groene lijn) zijn er vaker lage afvoeren: het grootste deel van het jaar een waterstands daling van -0.2 tot -0.4 m. Er zijn echter ook vaker hoge afvoeren waardoor 70 dagen (20%) per jaar de waterstanden hoger zijn dan nu (tot +0.4 m). Door de combinatie van rivierbodemeris en klimaatverandering neemt de waterstand af: 30 dagen per jaar (10%) zijn de waterstanden -0.8 m lager dan de huidige situatie.

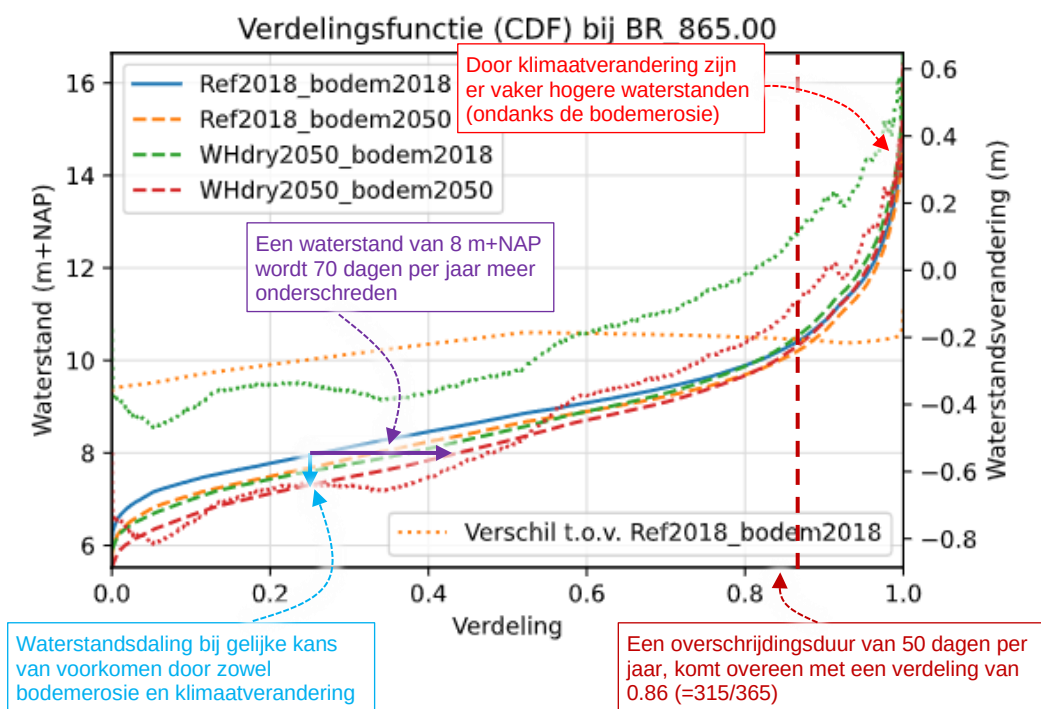


Figuur C.17 Waterstands distributiekromme van twee willekeurige locaties, links op de Rijn (Boven-Waal bij Millingerwaard) en rechts op de Maas (Grensmaas bij Visserweert). De weergegeven resultaten zijn voor zowel huidige en toekomstig klimaat en voor bodem 2018 en 2050. De verschillen zijn allemaal ten opzichte van huidige klimaat, huidige bodem. Aan de knikpunten in de waterstandsverschillen, is nog goed te zien op welke punten daadwerkelijk modelresultaten beschikbaar zijn.

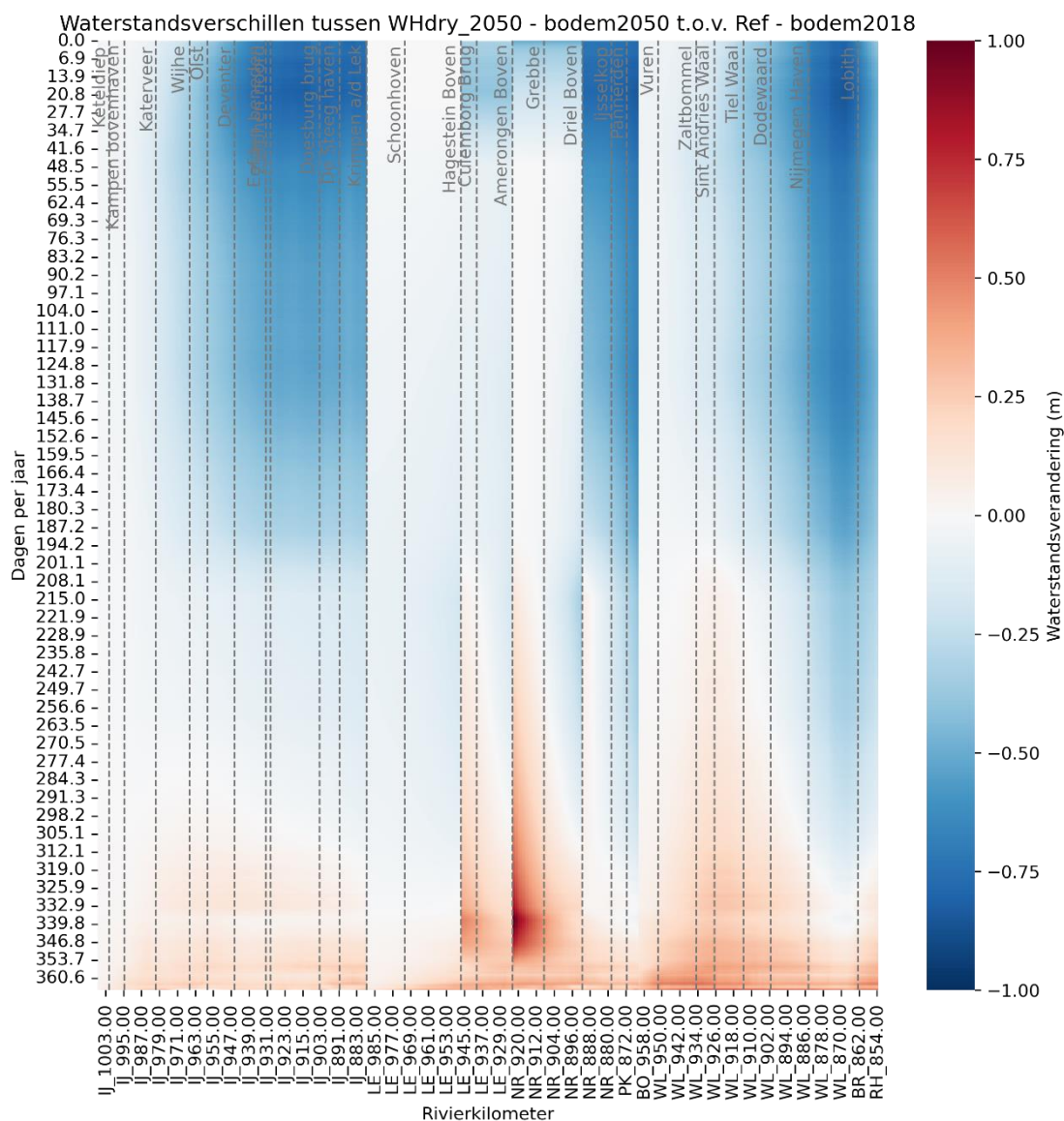
De waterstandsverschillen uit de voorgaande CDF-figuren kunnen voor alle rkm tegelijk weergegeven worden in een heatmap zoals Figuur C.19 voor de combinatie van rivierbodemosie en klimaatverandering. De kleur geeft hier aan hoeveel de waterstanden stijgen. Ten behoeve van de leesbaarheid is in de figuur de 'verdeling' omgerekend naar dagen per jaar. Uit de figuur kan worden geconcludeerd dat bij alle lage afvoeren (lage dagen per jaar) de waterstanden op de bovenstroomse trajecten van alle rivieren dalen met 1 m. Bij hogere afvoeren kan wel sprake zijn van een stijging doordat deze nog hoger worden. Bovenstrooms van Stuw Hagestein en stuw Amerongen zijn grote stijgingen zichtbaar. Dit wordt veroorzaakt doordat in de simulaties met een afvoer van 4000 m³/s net overgeschakeld wordt naar een ander stuwregime: de waterstanden zijn bij deze afvoer lager dan bij lagere (en hogere) afvoeren (zie Figuur 4.6).

Voor de modelering van natuur, worden enkele grenswaarden gebruikt: een overschrijdingsduur van 2, 20 en 50 dagen, oftewel een onderschrijdingsduur van 363, 345, 315 dagen.

Distributiekrommes van alle resultaten zijn ook opgenomen in een distribueerbare HTML-kaart. In deze kaart is iedere rkm aanklikbaar en geeft dit de resultaten en verschillen van alle resultaten. In onderstaande figuur is een voorbeeld bij Gelderse Poort ter verduidelijking geannoteerd.

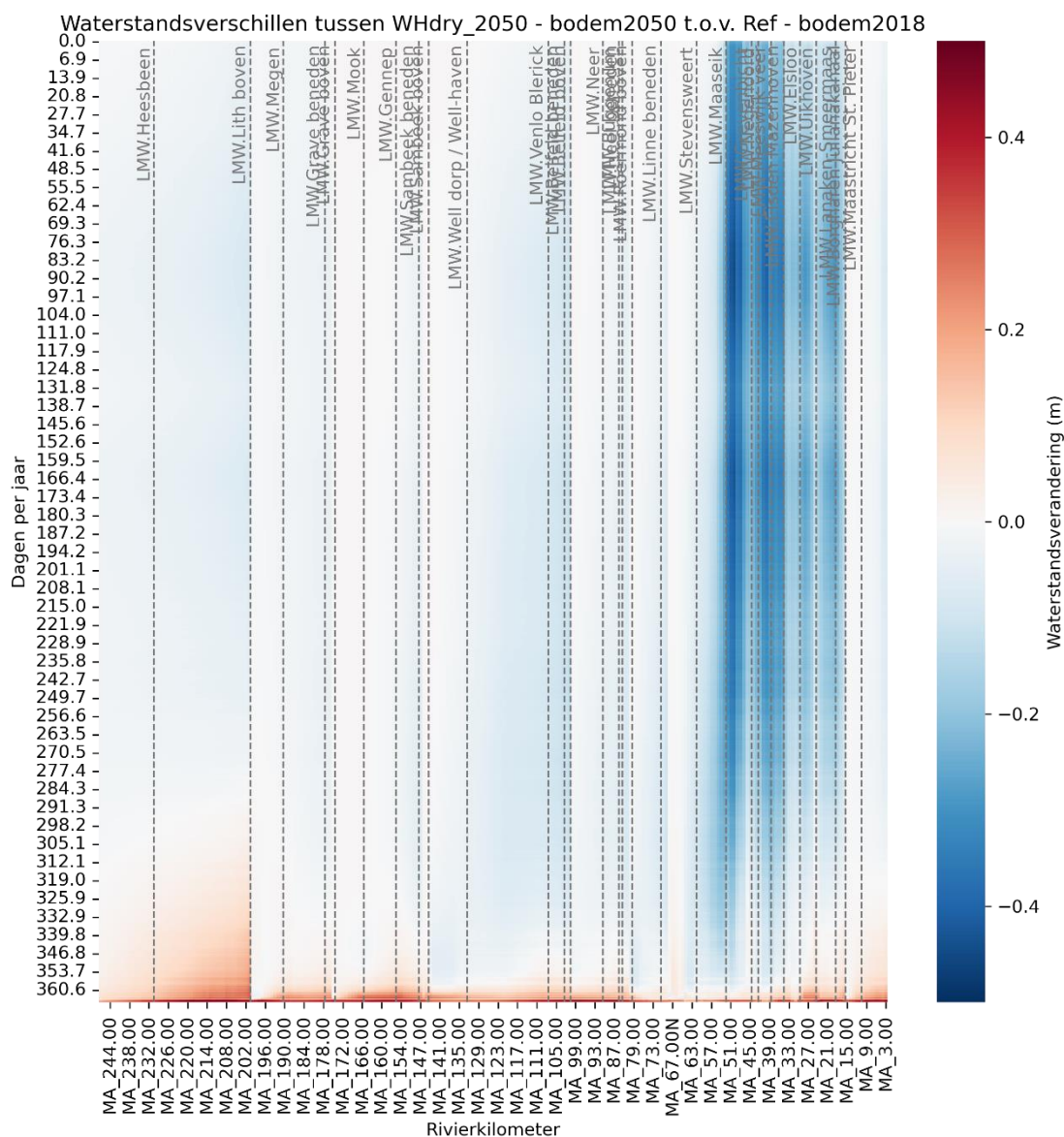


Figuur C.18 Geannoteerde versie van de distributiekrommes zoals opgeleverd voor alle rivierkilometers



Figuur C.19 Heatmap van de waterstandsverschillen in de distributiekrommes voor de Rijn takken. De horizontale as bevat de rivierkilometers (van rechts naar links) en de verticale as de onderschrijdingsduur (lage afvoer staat dus bovenaan). Weergegeven is klimaatscenario $W_{Hdry}2050$ met bodem2050 t.o.v. klimaatscenario Ref met bodem2018.

Eenzelfde figuur is weergegeven voor de Maas in Figuur C.20. Evenals eerder geconcludeerd is de waterstandsvaling het grootst op de (benedenstroomse) Grensmaas.



Figuur C.20 Heatmap van de waterstandsverschillen in de distributiekrommes voor de Maas. De horizontale as bevat de rivierkilometers (van rechts naar links) en de verticale as de onderschrijdingsduur (lage afvoer staat dus bovenaan). Weergegeven is klimaatscenario $W_{\text{Hdry}}2050$ met bodem2050 t.o.v. klimaatscenario Ref met bodem2018.

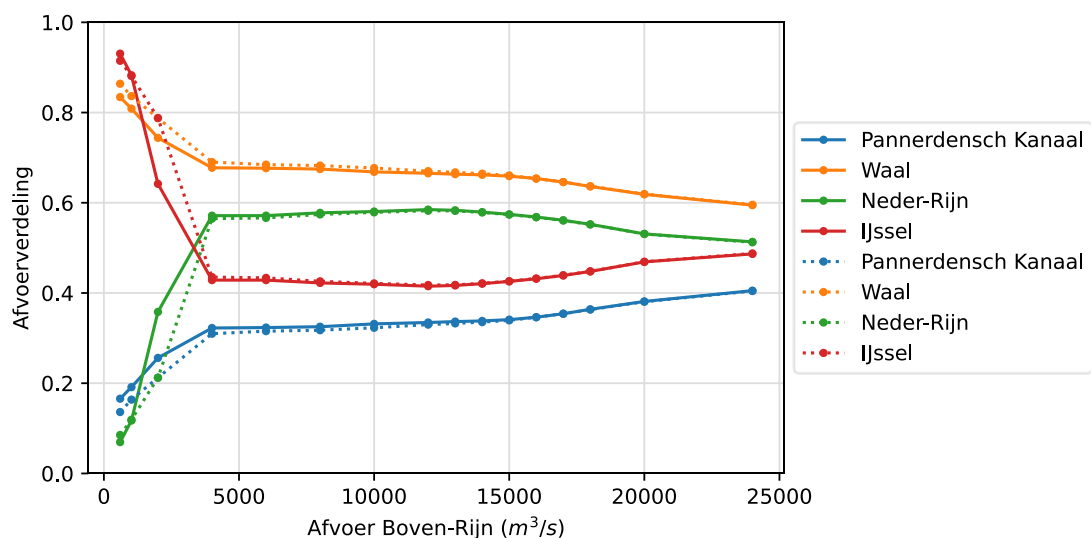
Overige heatmaps staan in bijlage C.6.2.

C.6 Aanvullende figuren

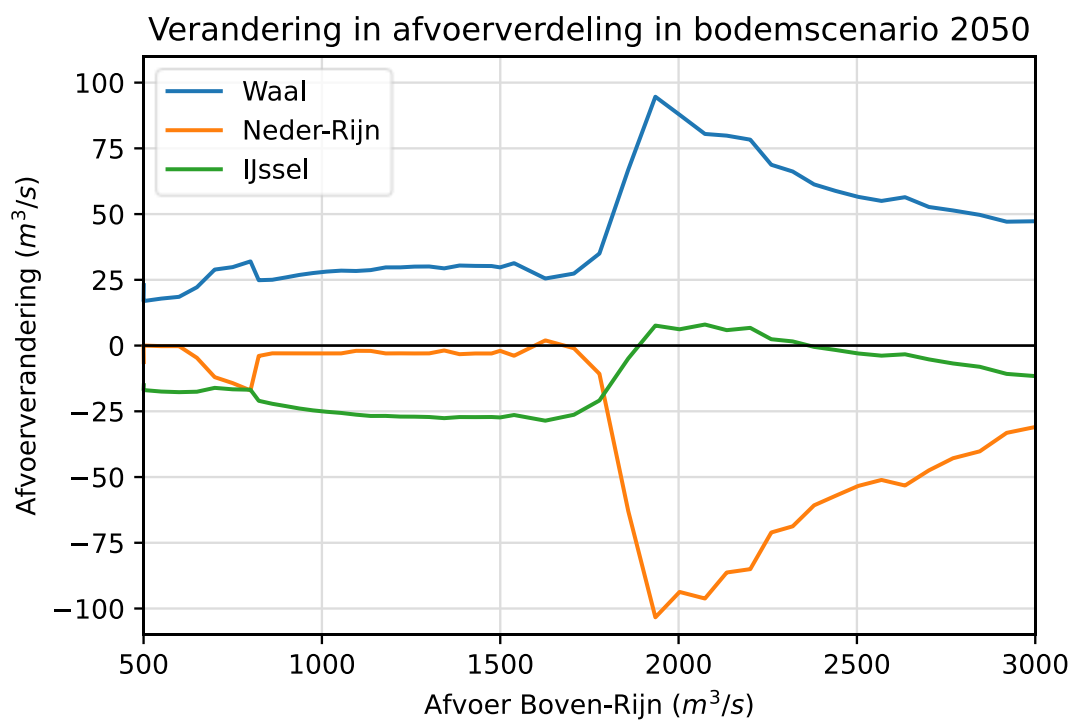
Deze bijlage bevat diverse figuren die aanvullend zijn op eerdere passages van dit rapport.

C.6.1 Afvoeroverdeling

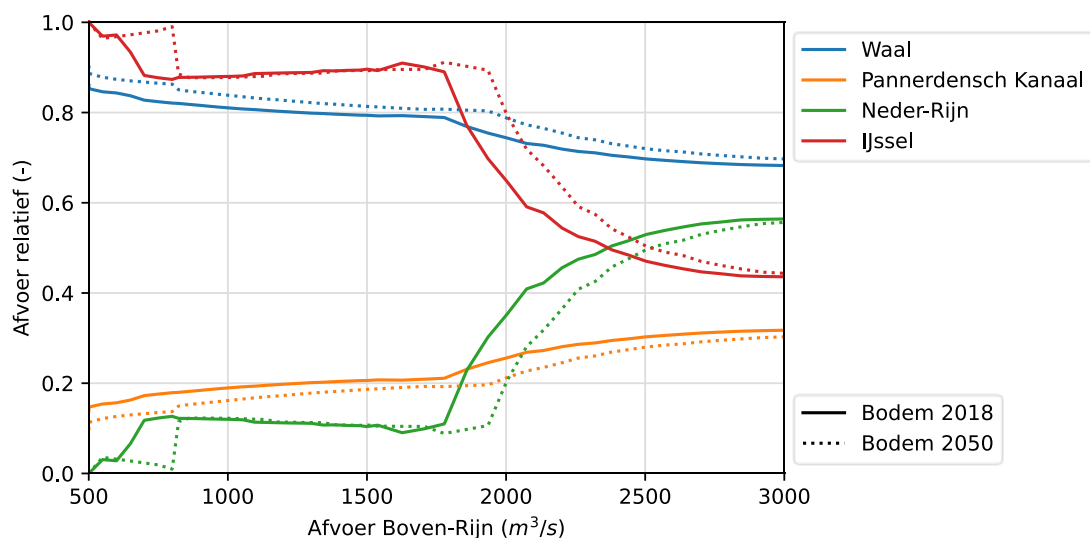
Onderstaande figuren zijn aanvullend op paragraaf 4.3.2.1.



Figuur C.21 Relatieve afvoerverdeling bij de splitsingspunten. De stippellijn is het resultaat met de bodem van 2050



Figuur C.22 Verandering in afvoerverdeling door rivierbodemerrosie



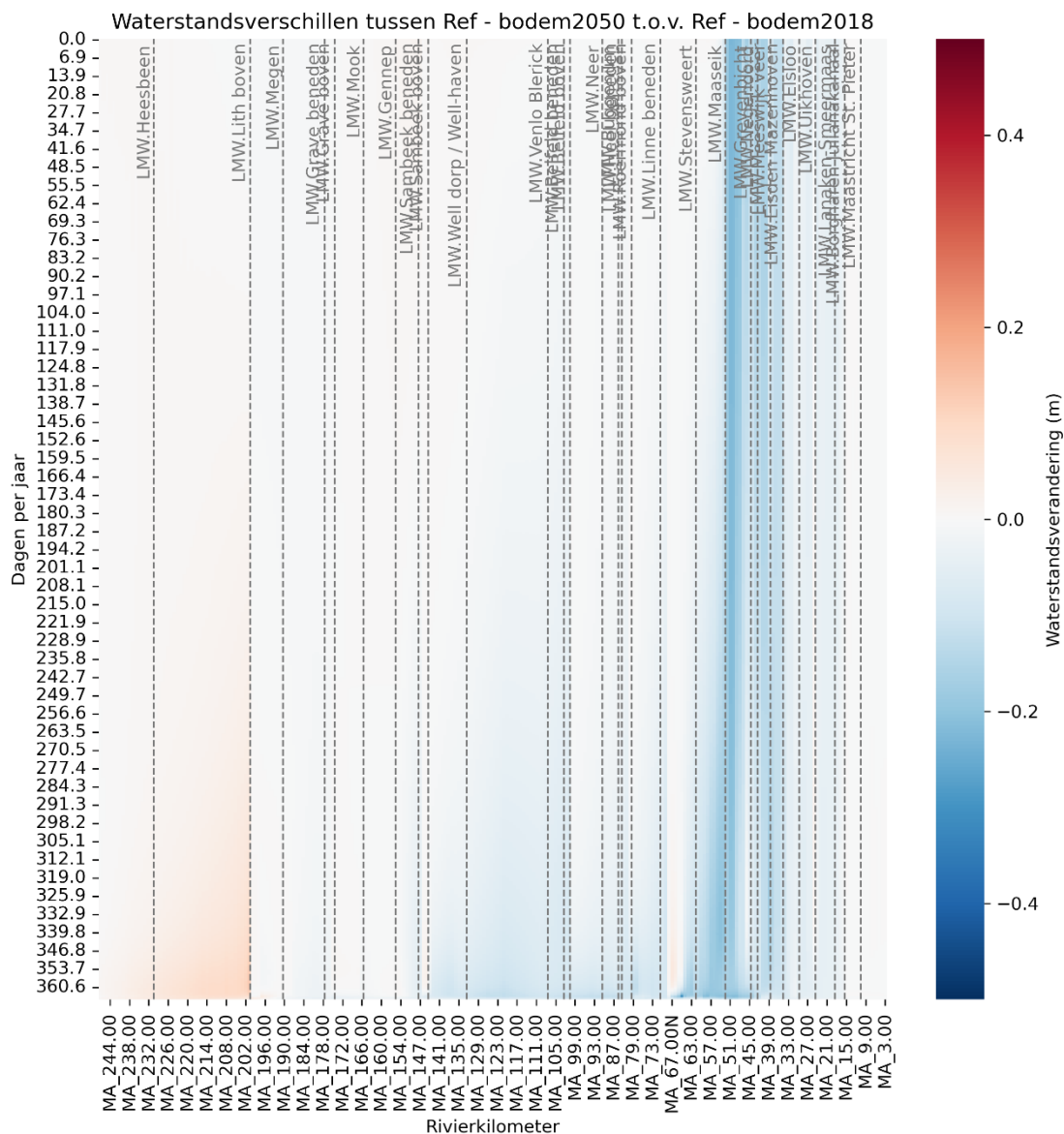
Figuur C.23 Fractieverdeling bij splitsingspunten

C.6.2

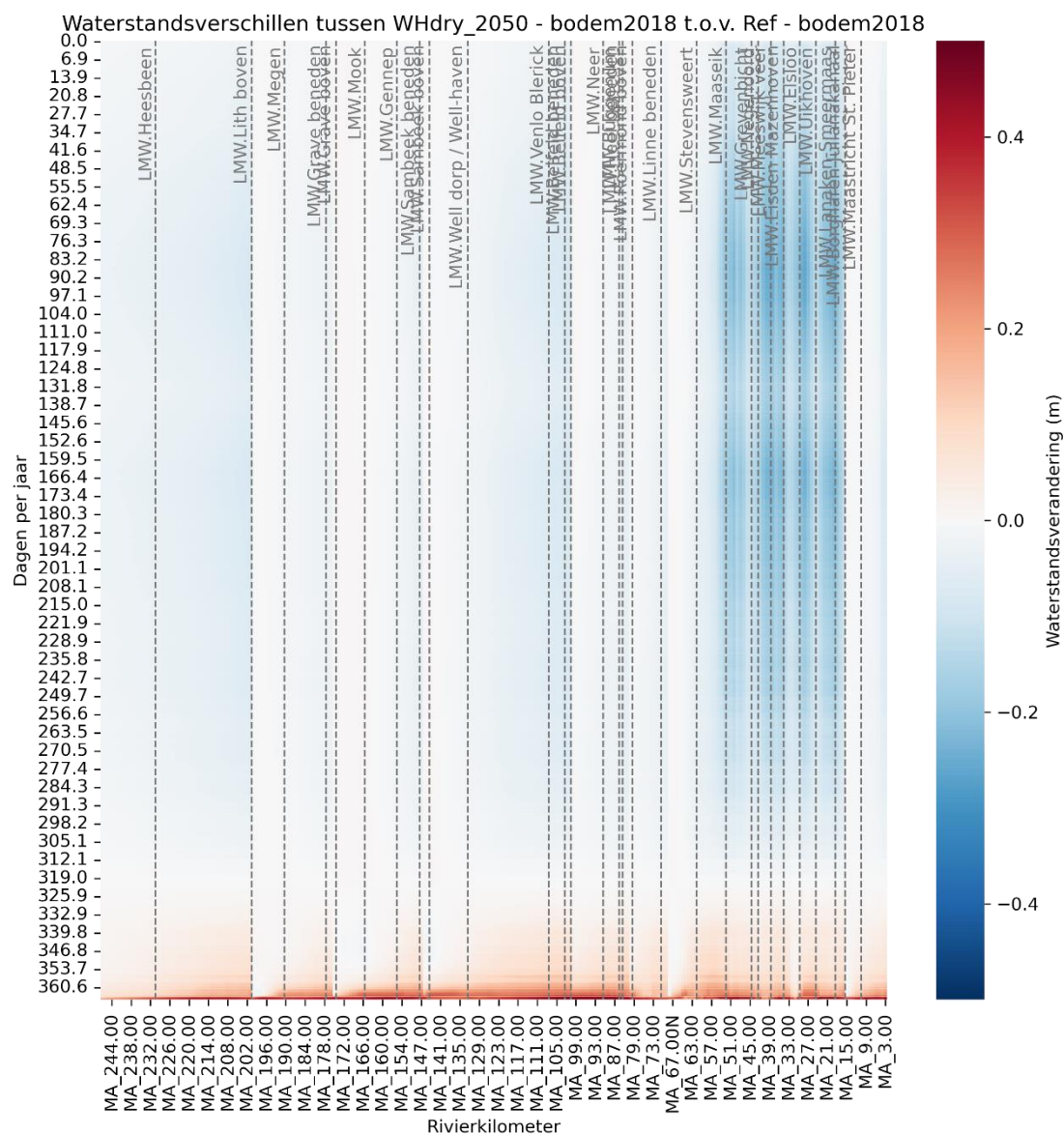
Heatmaps distributiekrommes

In aanvulling op de heatmaps in bijlage C.5.2 zijn hier de resultaten weergegeven voor zowel de Rijn als Maas indien enkel wordt gekeken naar bodemscenario 2050, en voor enkel klimaatscenario W_{Hdry_2050} . De combinatie van beiden staat in het hoofdrapport.

C.6.2.1. Maas

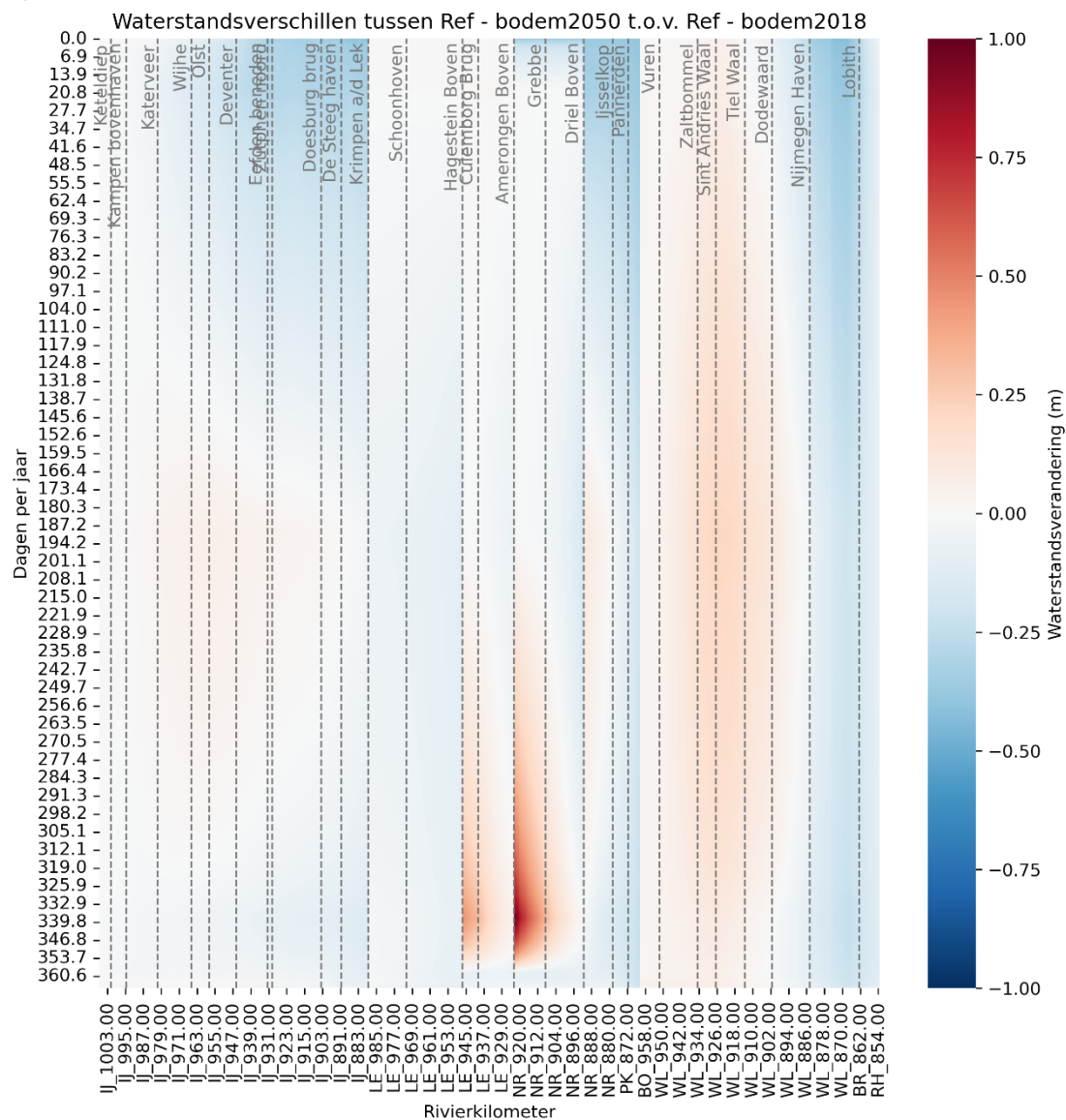


Figuur C.24 Waterstandsverandering door rivierbodemerisatie

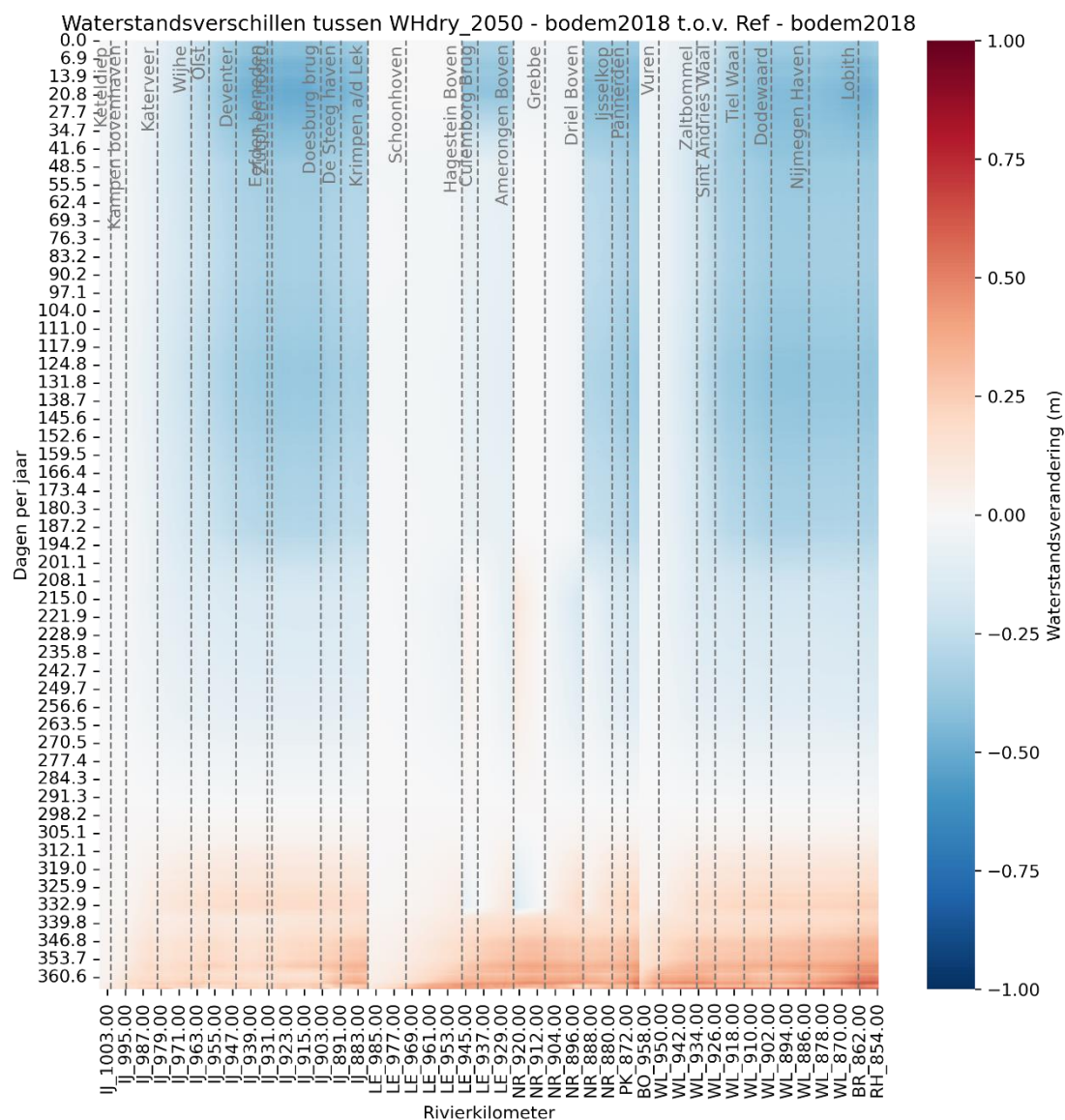


Figuur C.25 Waterstandsverandering door klimaatverandering

C.6.2.2. Rijntakken



Figuur C.26 Waterstandsverandering door rivierbodemerisatie

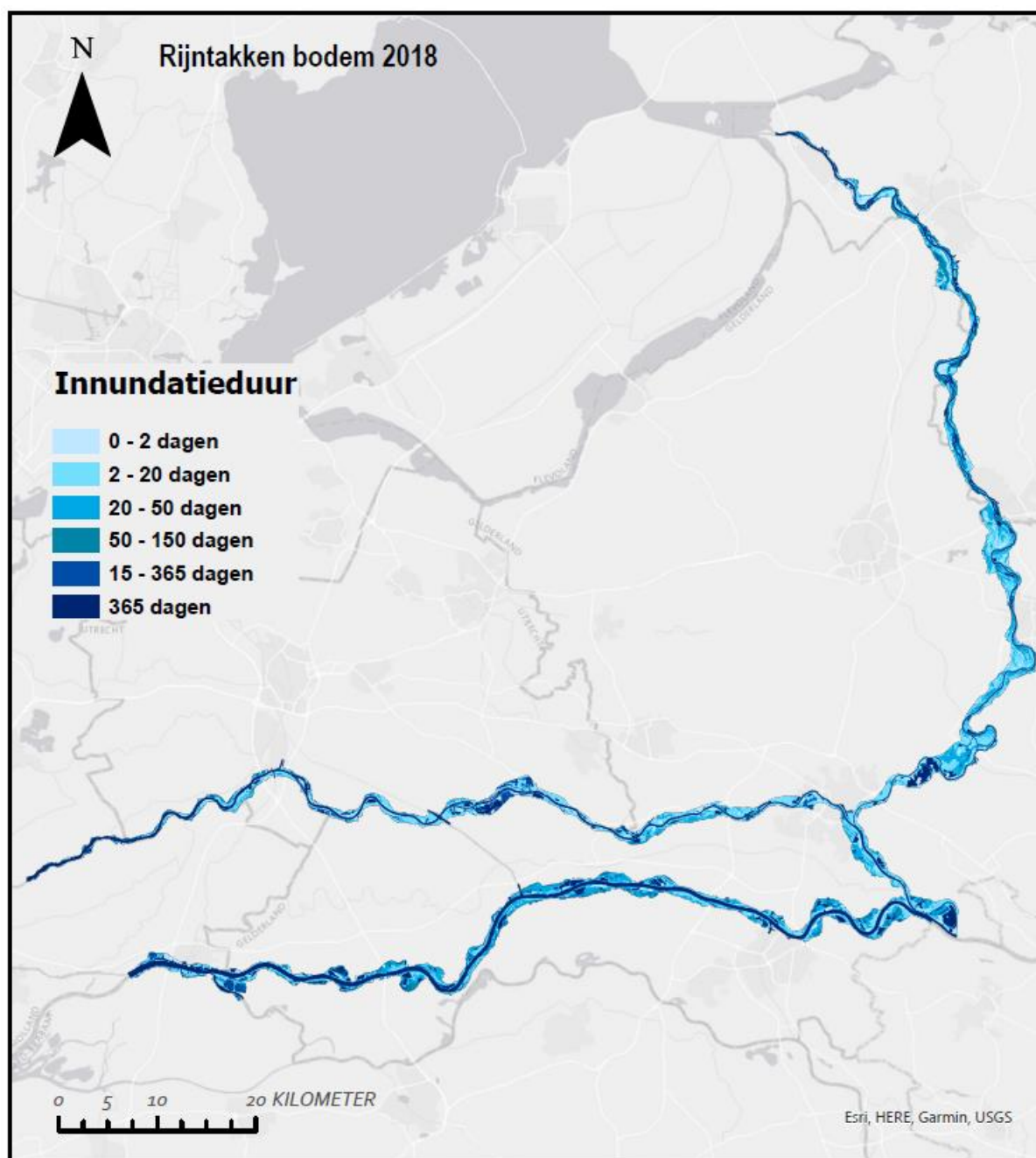


Figuur C.27 Waterstandsverandering door klimaatverandering

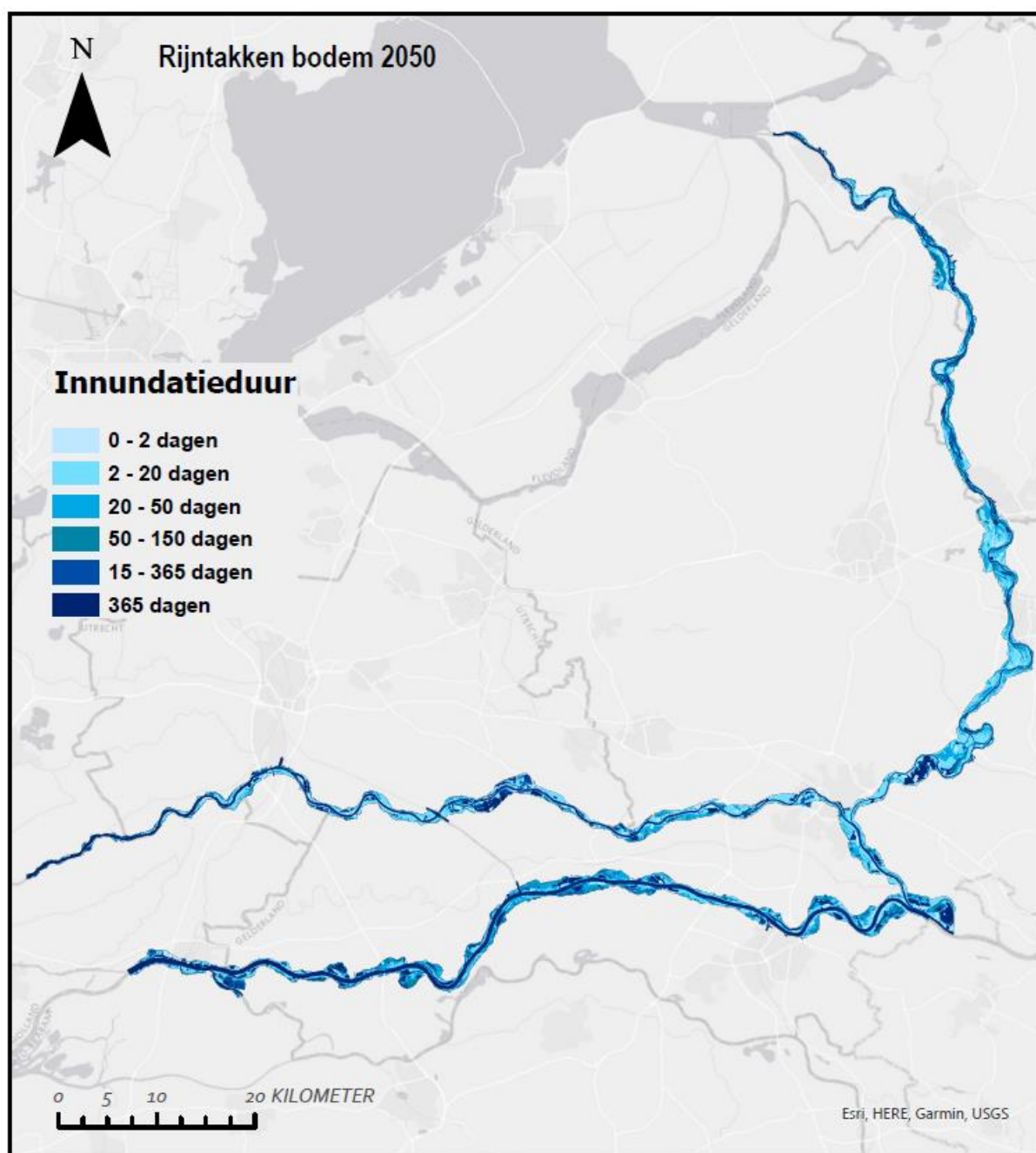
D Bijlage natuur

D.1 Overstromingsduur

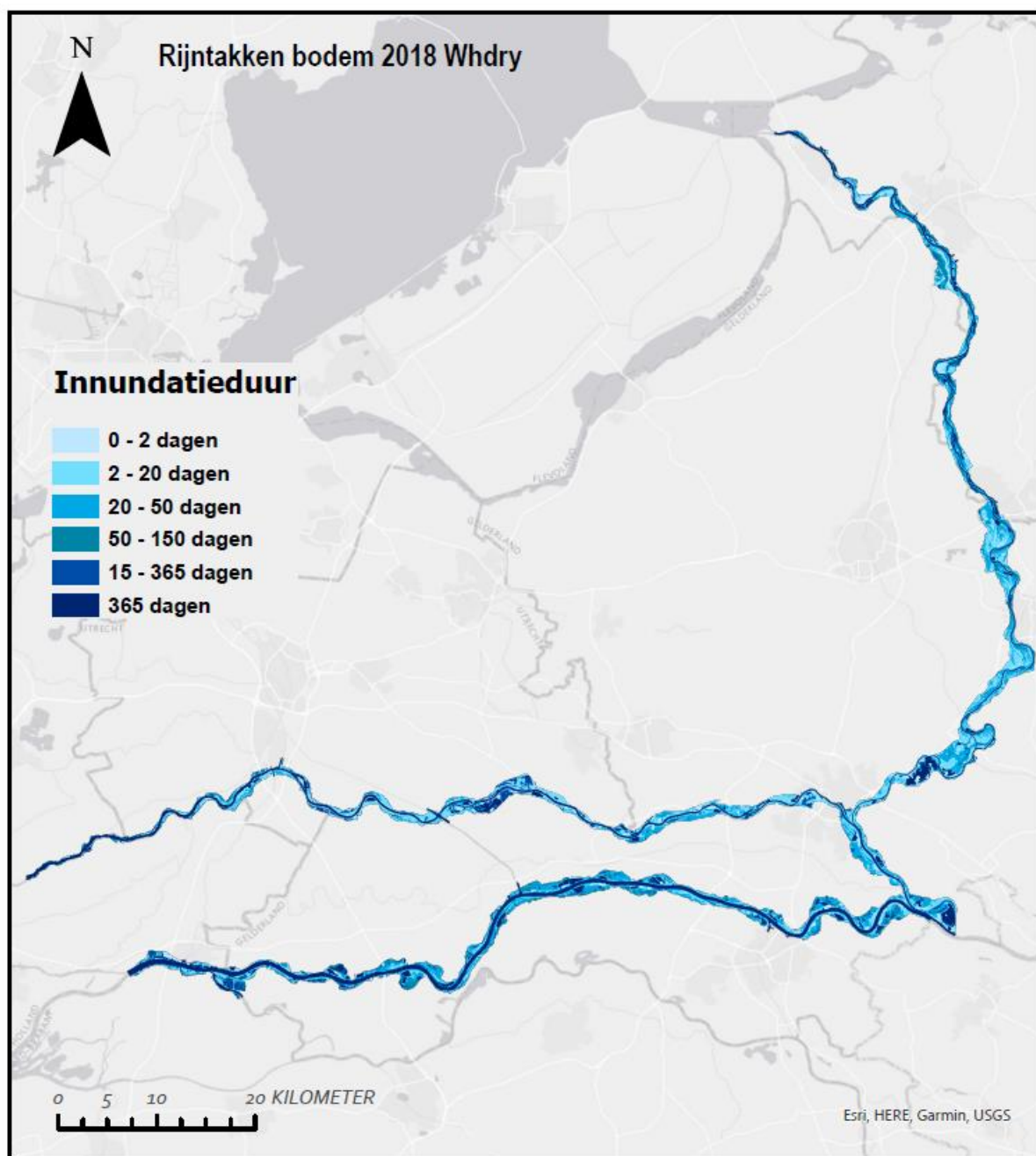
Onderstaande figuren tonen de overstromingsduren van de uiterwaarden langs de Rijntakken en de Maas in de huidige situatie, bij veranderende rivierbodempligging, bij veranderend klimaat en bij een combinatie van veranderingen in rivierbodempligging en klimaat. Er is geen rekening gehouden met de aanwezigheid van zomerkades.



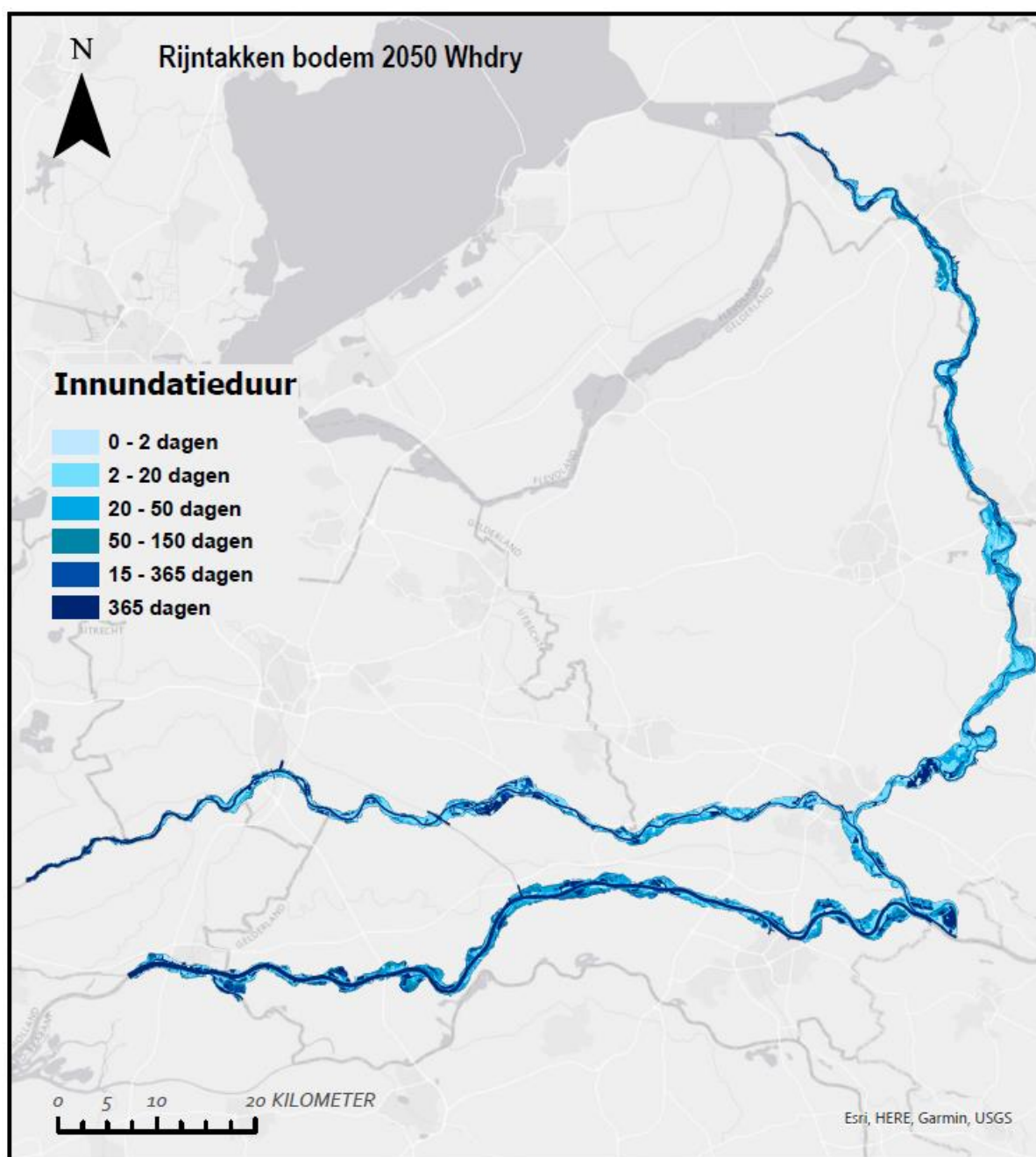
Figuur D.1 Overstromingsduur Rijntakken, huidig klimaat en huidige rivierbodempligging (huidige situatie)



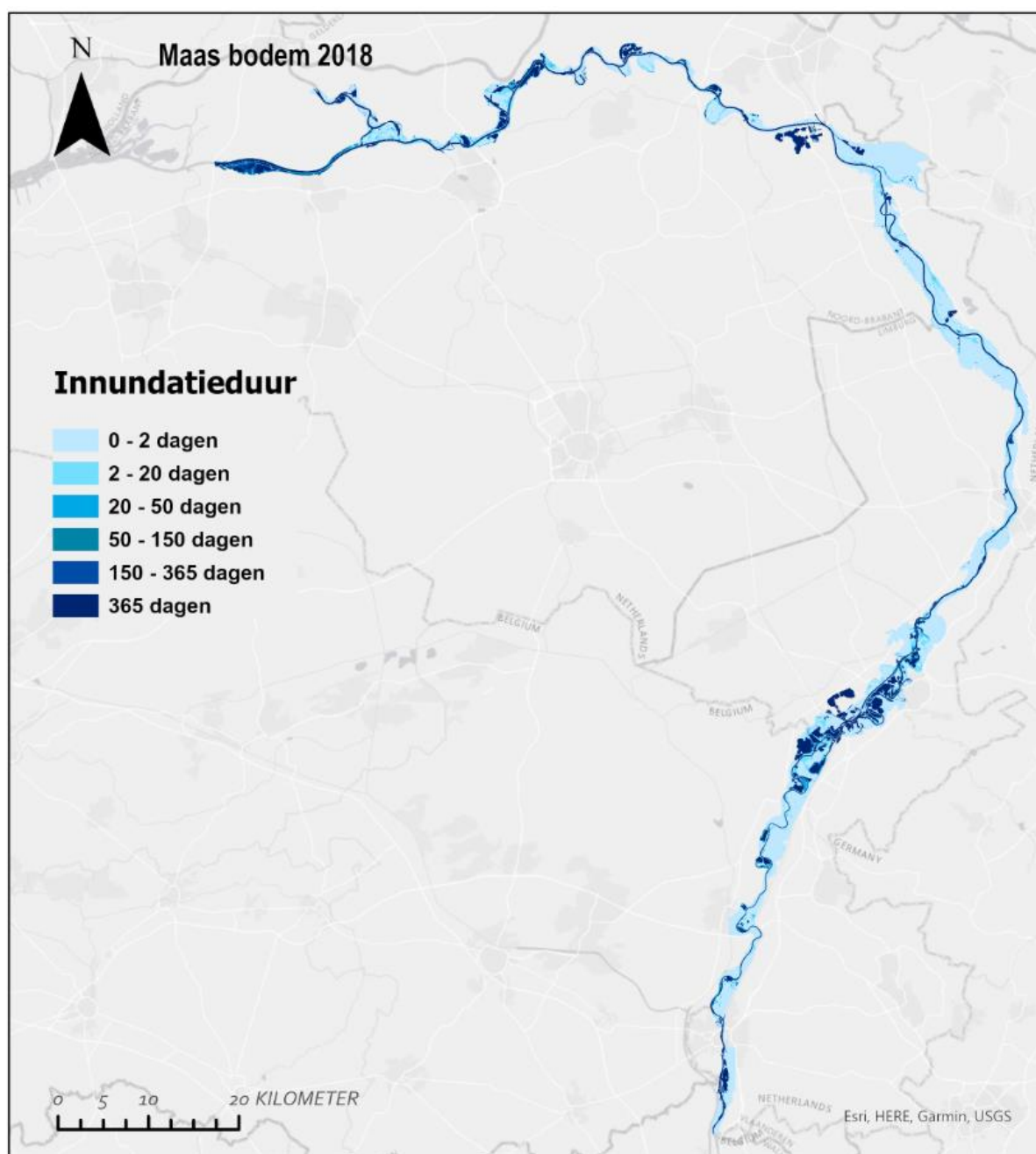
Figuur D.2 Overstromingsduur Rijntakken, huidig klimaat en rivierbodempligging 2050



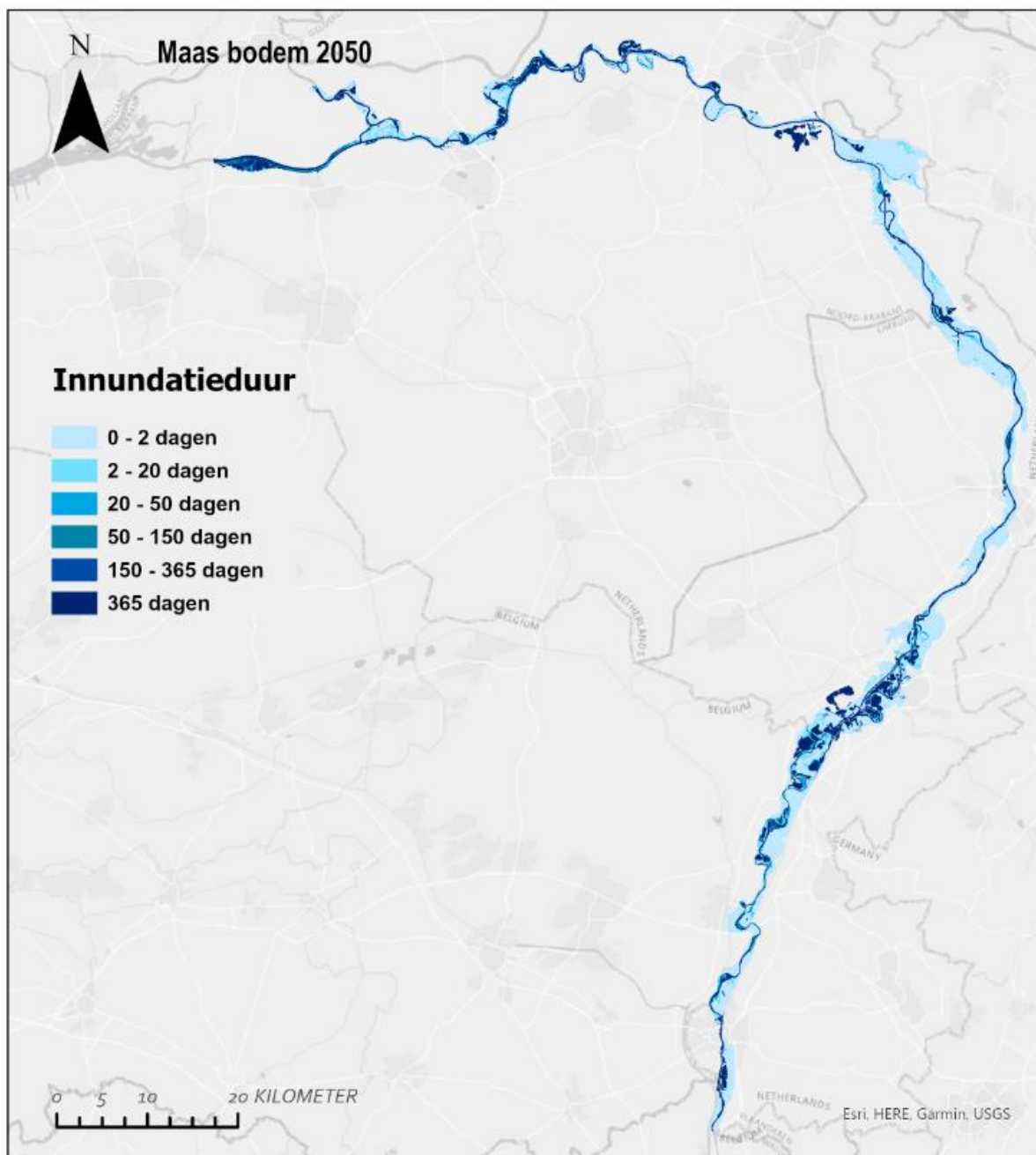
Figuur D.3 Overstromingsduur Rijntakken, klimaat 2050 en huidige rivierbodempligging



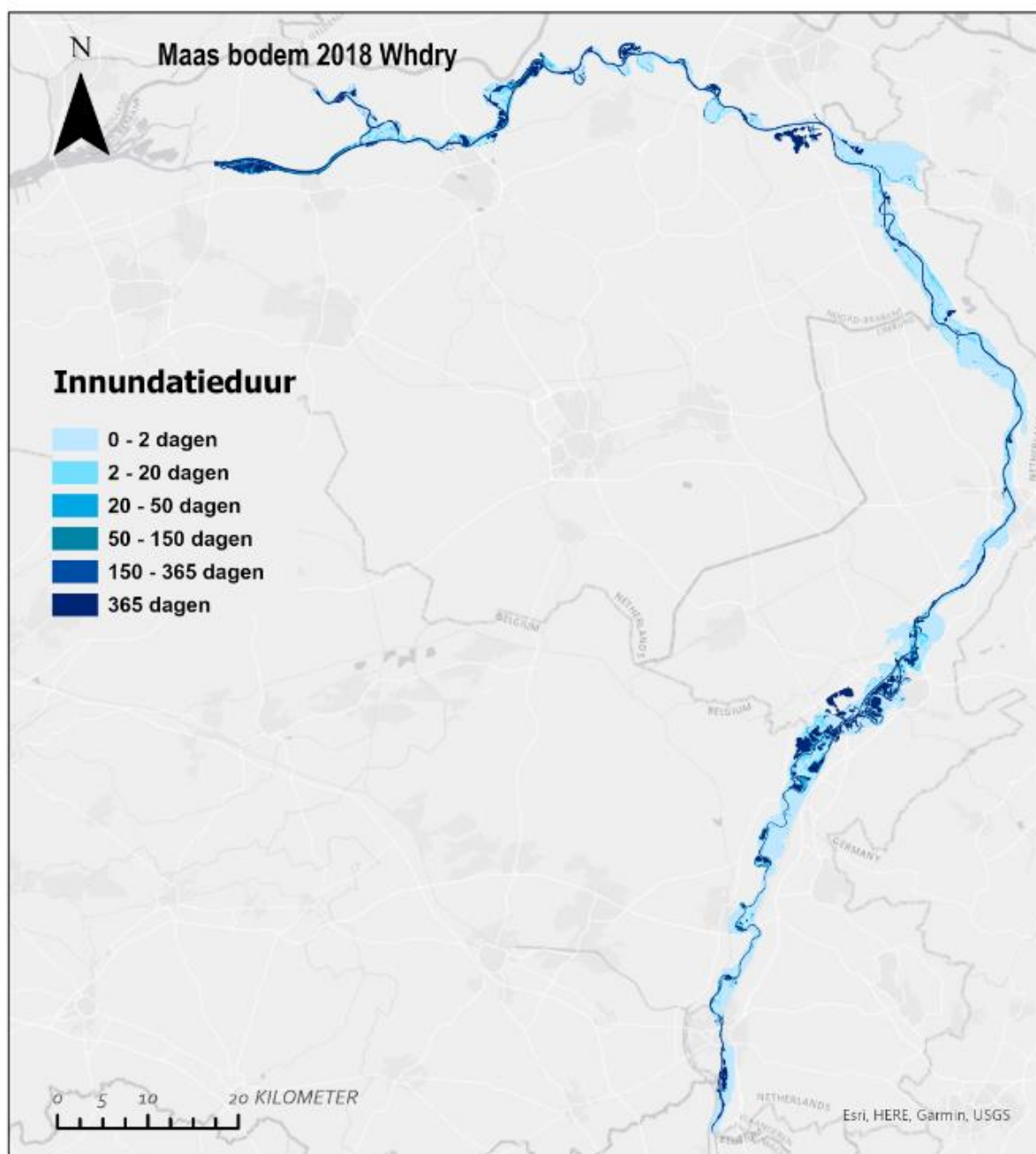
Figuur D.4 Overstromingsduur Rijntakken klimaat en rivierbodempligging 2050 (nulaalternatief IRM)



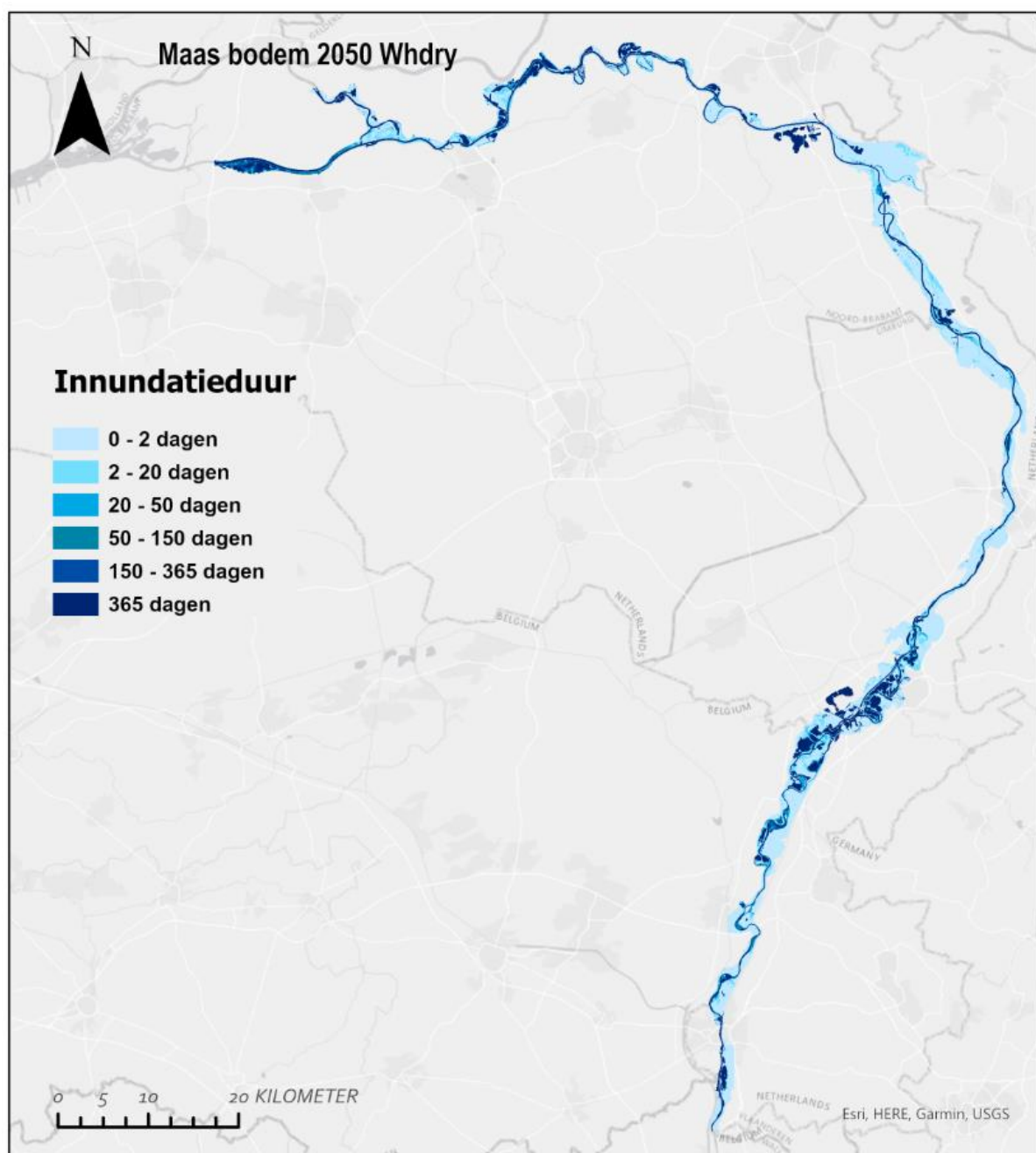
Figuur D.5 Overstromingsduur Maas huidig klimaat en huidige rivierbodempligging (huidige situatie)



Figuur D.6 Overstromingsduur Maas huidig klimaat en rivierbodempligging 2050

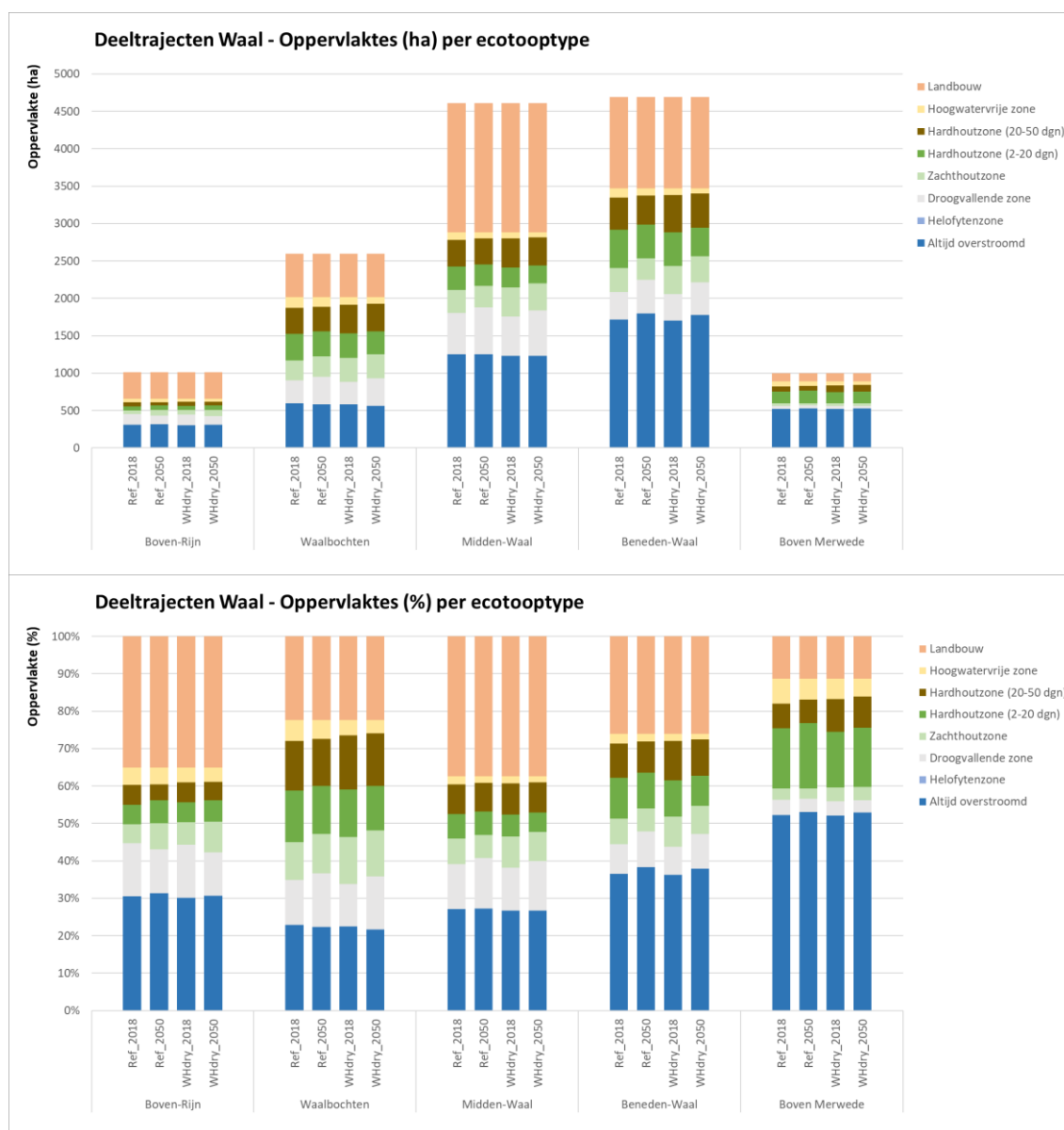


Figuur D.7 Overstromingsduur Maas, klimaat 2050 en huidige rivierbodempligging

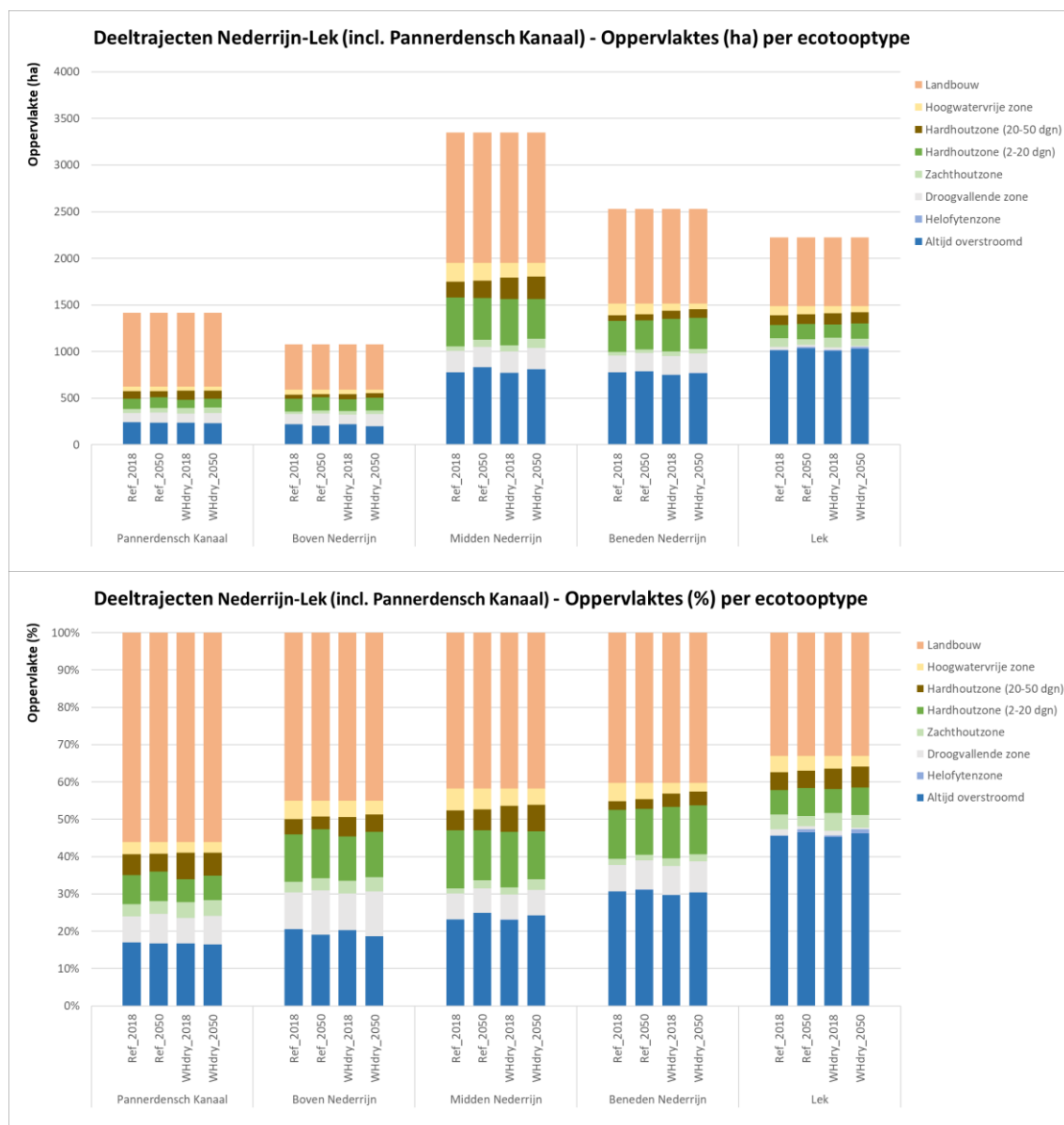


Figuur D.8 Overstromingsduur Maas, klimaat en rivierbodempligging 2050 (nulalternatief IRM)

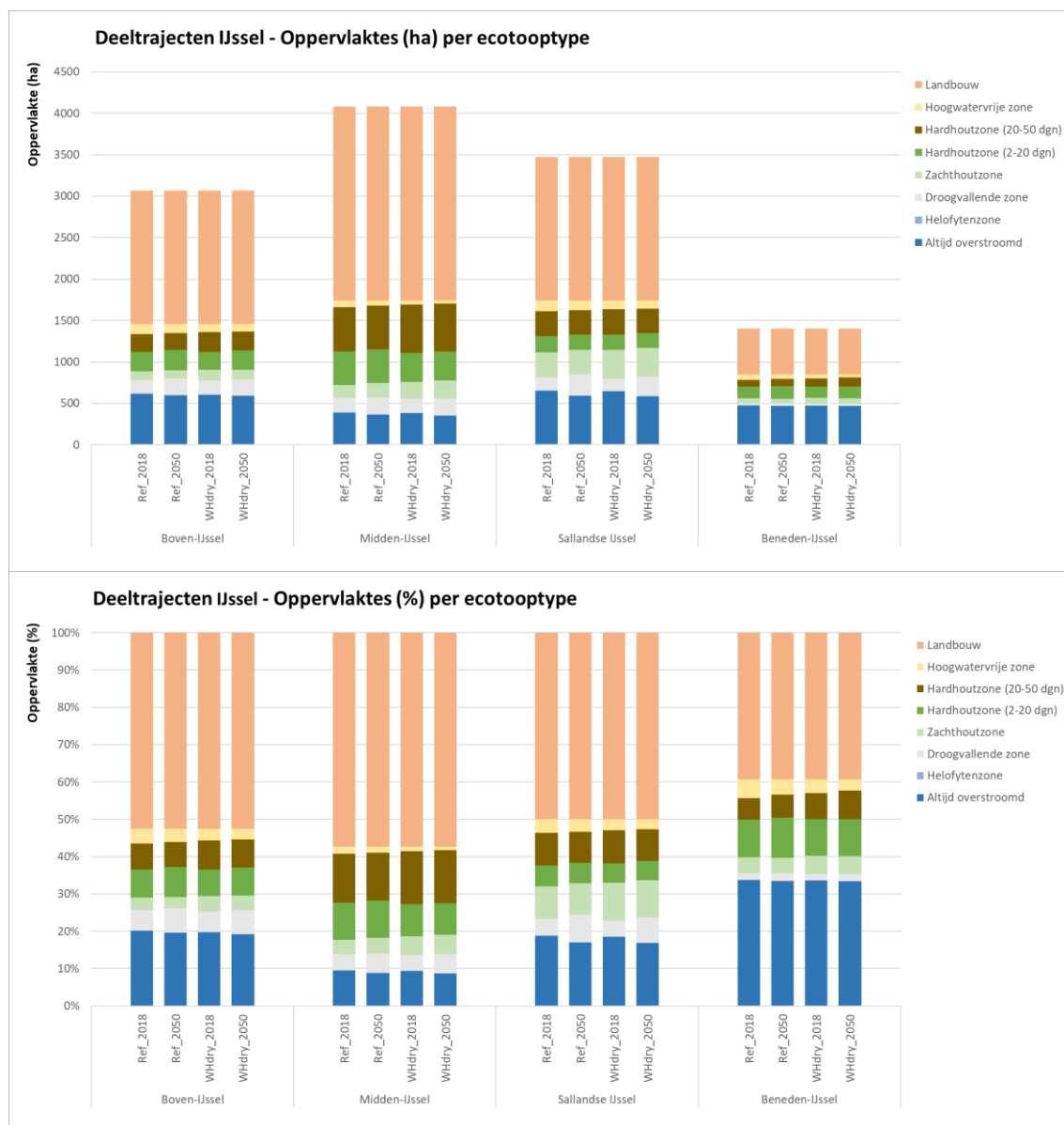
D.2 Potentiële ecotoopverdeling op basis van overstromingsduur



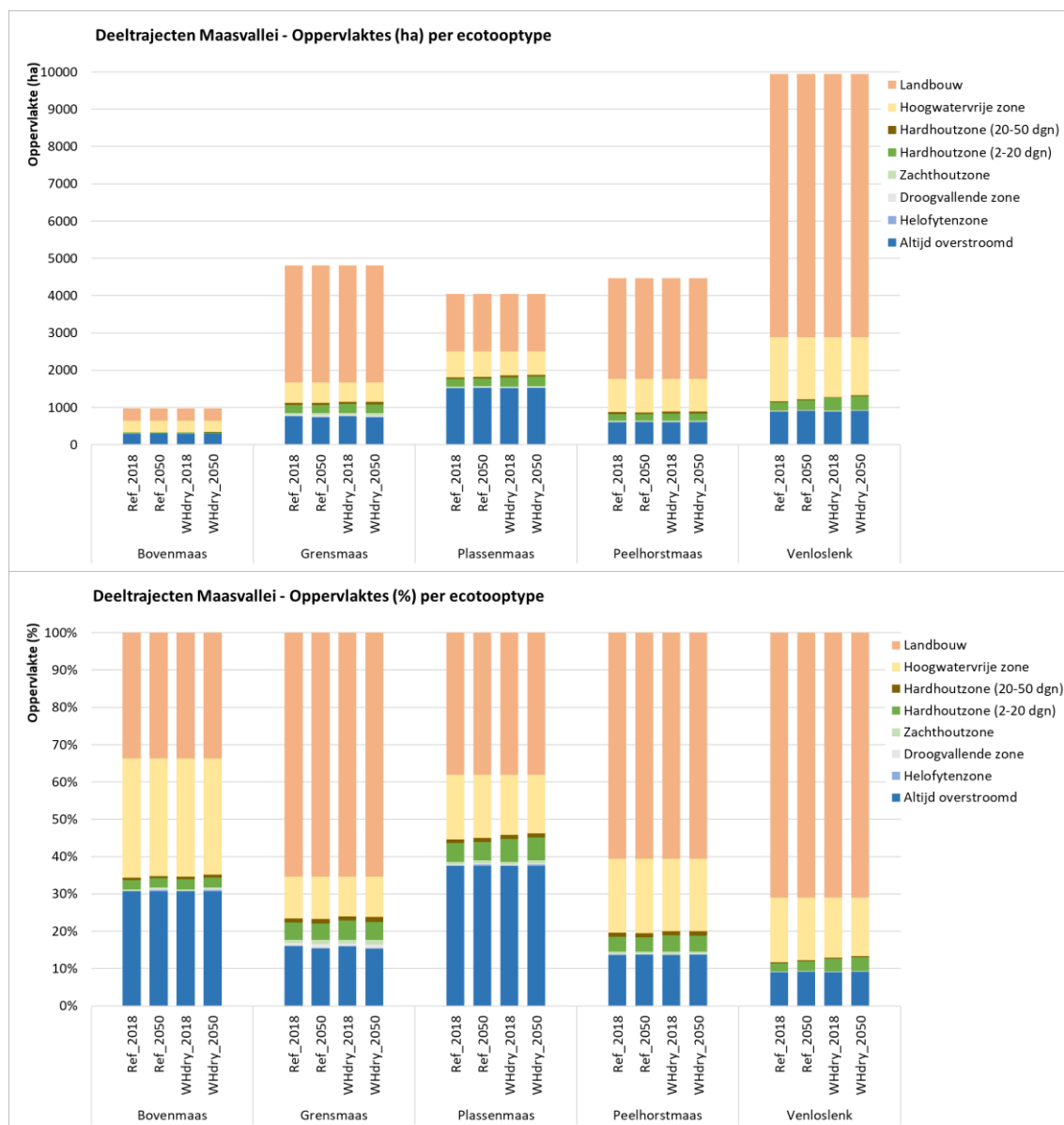
Figuur D.9 Potentiële ecotoopverdeling BovenRijn en Waal



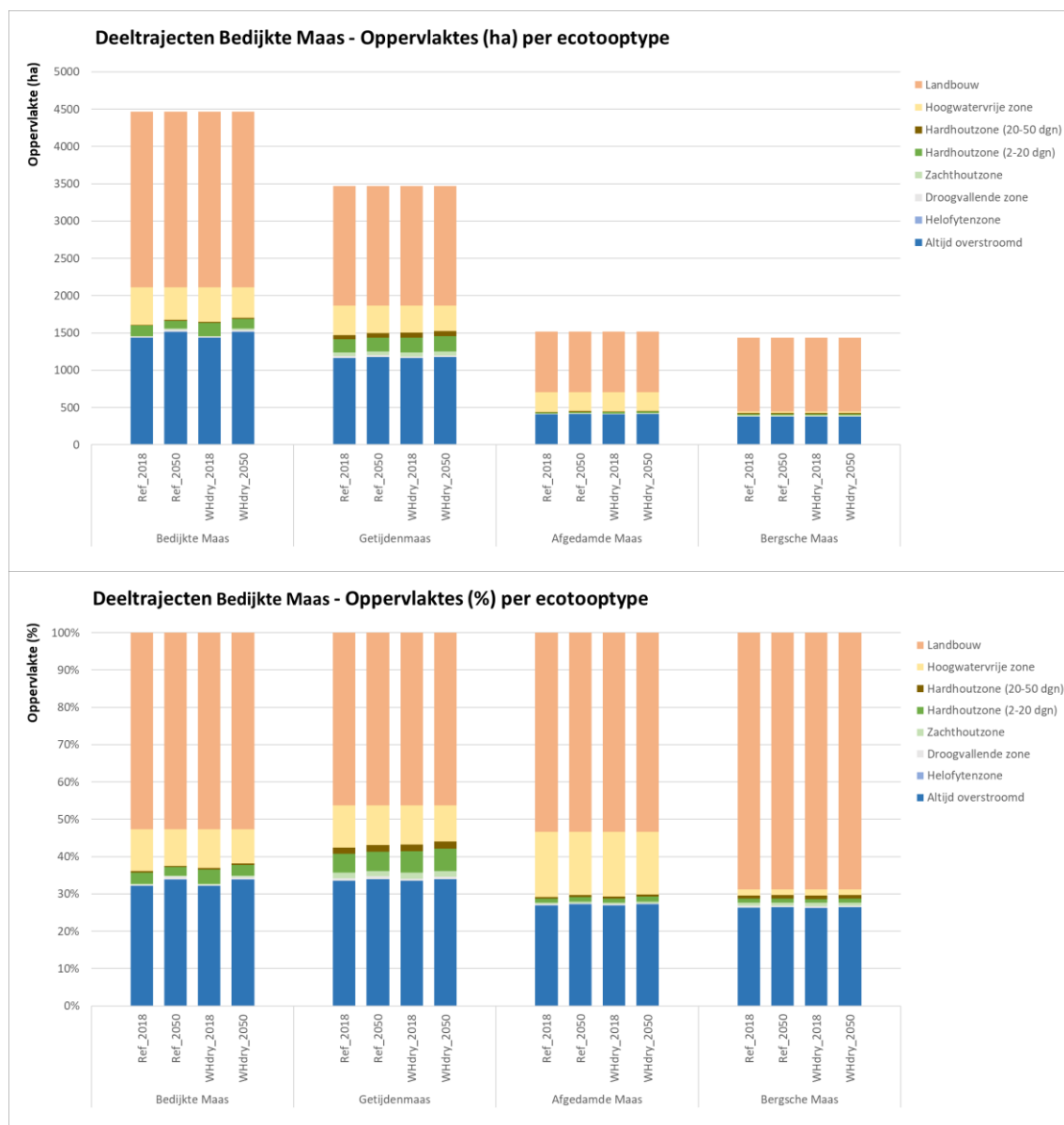
Figuur D.10 Potentiële ecotoopverdeling Pannerdensch Kanaal en Nederrijn-Lek



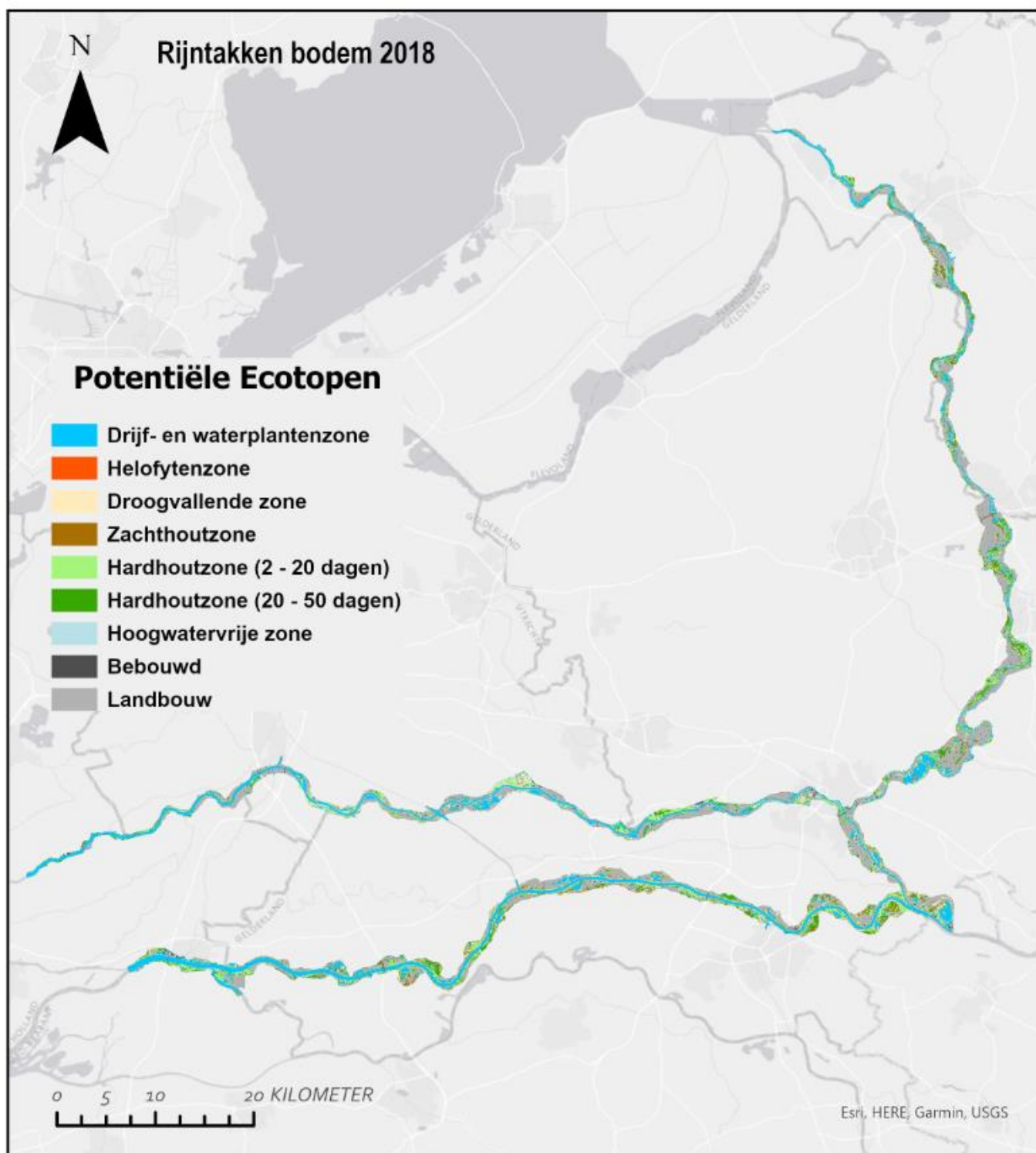
Figuur D.11 Potentiële ecotoopverdeling IJssel



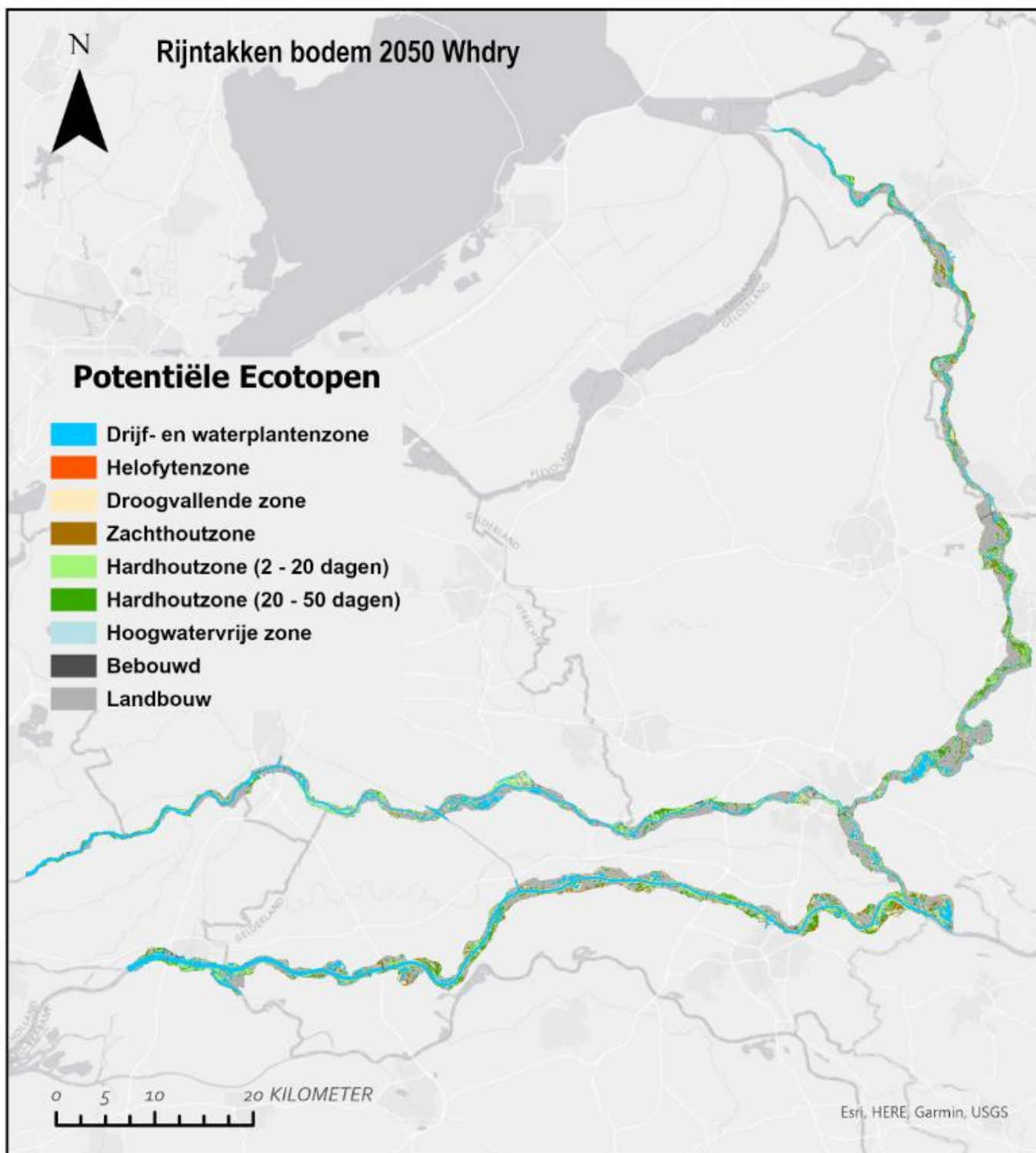
Figuur D.12 Potentiële ecotoopverdeling Maasvallei



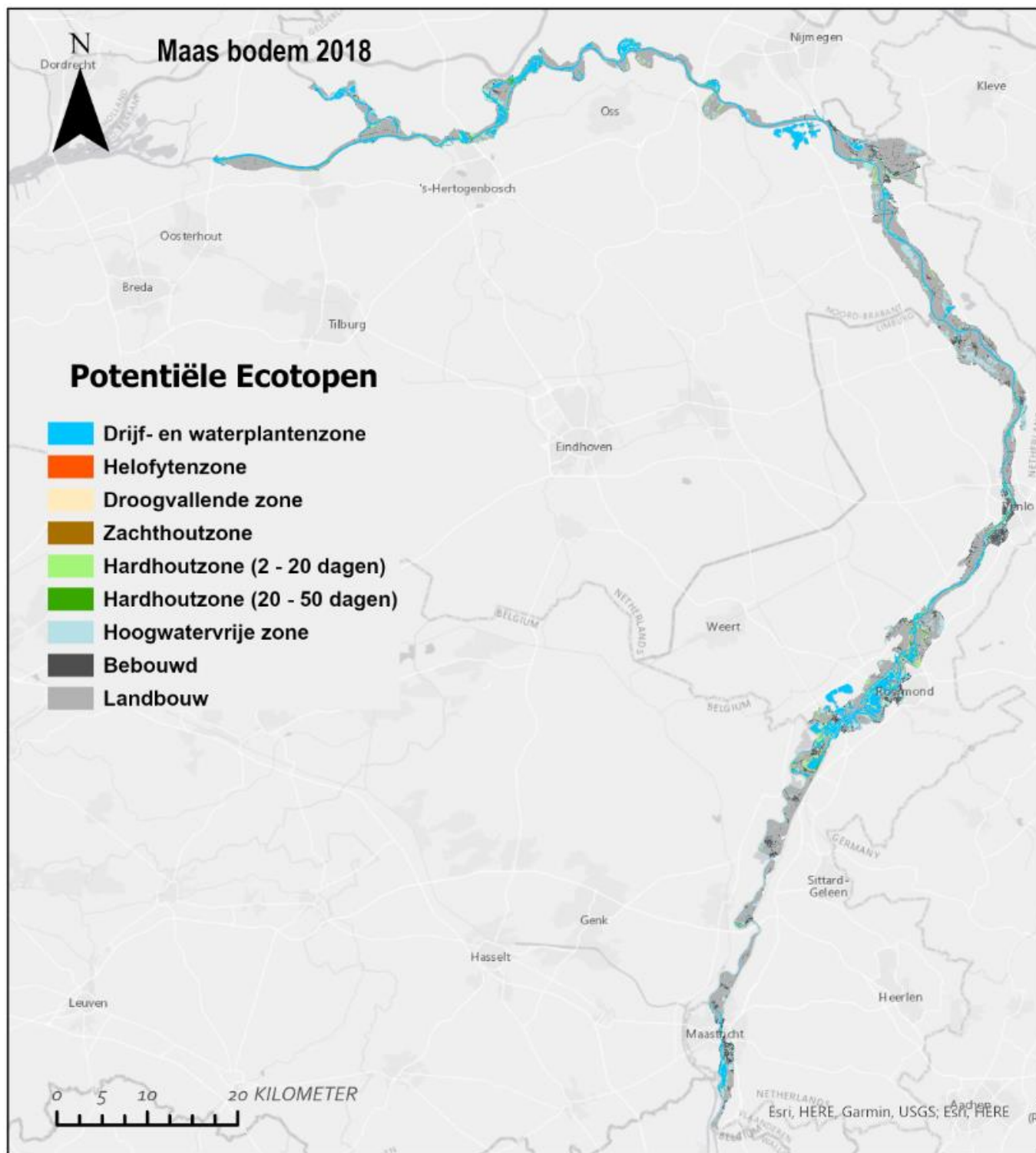
Figuur D.13 Potentiële ecotoopverdeling Bedijkte Maas



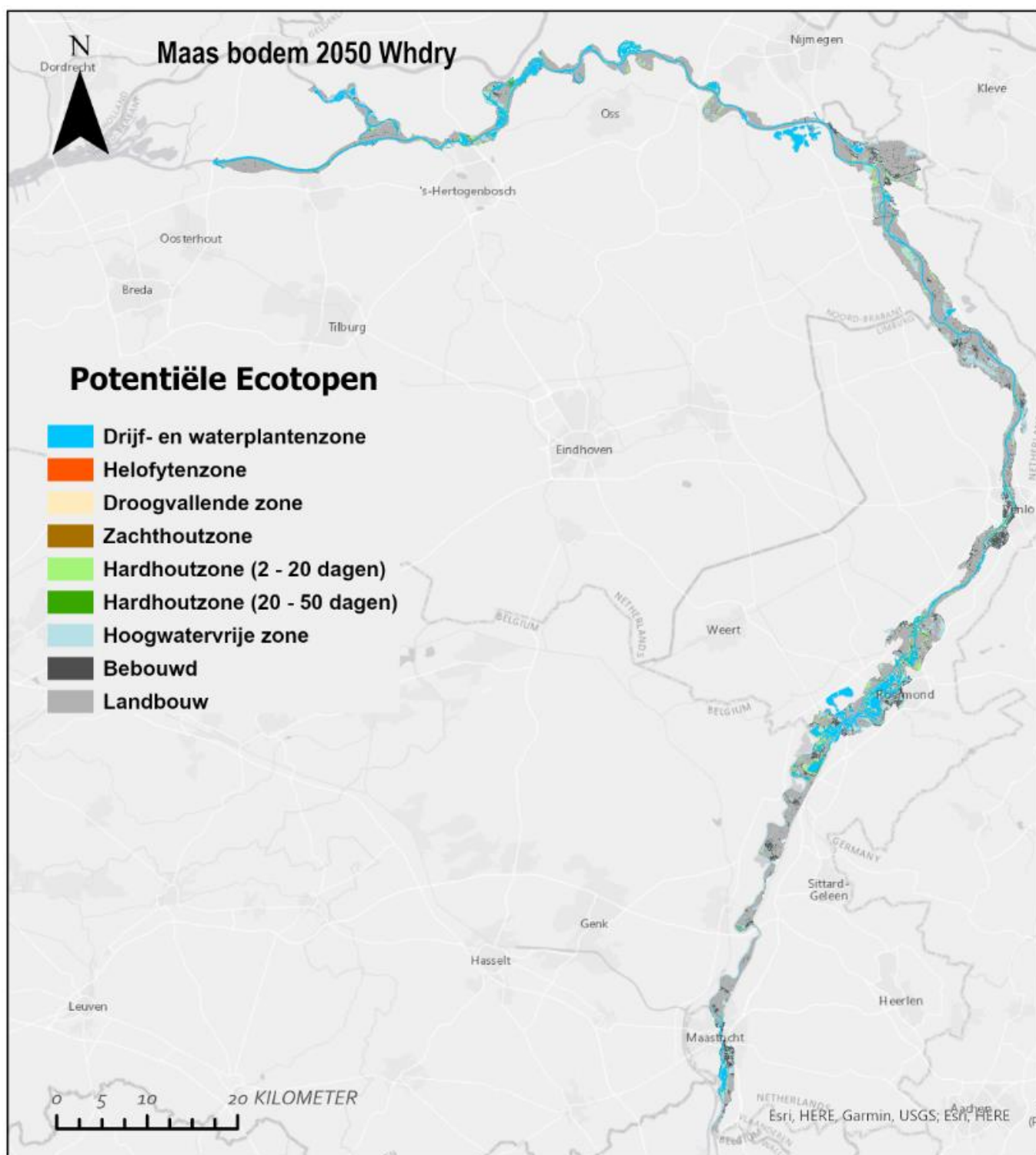
Figuur D.14 Ecotooppotentie Rijntakken, huidige situatie



Figuur D.15 Ecotooppotentie Rijntakken, nulalternatief IRM



Figuur D.16 Ecotooppotentie Maas, huidige situatie



Figuur D.17 Ecotooppotentie Maas, nulalternatief IRM

D.3 Korte beschouwing rekenregels ecotopen op basis van overstromingsduren versus grondwaterstanden

Overstromingsduur

HABITAT gaat uit van vereisten overstromingsduren. In de rekenregels van Van den Berg (2021) worden ook overstromingsduren vermeld. Onderstaande tabel geeft een vergelijking. Wat opvalt is dat riet/moerasruigte volgens van den Berg gedurende 160 tot 220 dagen per jaar overstroomt, terwijl de helofytenzone in HABITAT het gehele jaar door 0 tot 20 cm onder water staat. Voor zachthoutooibos zijn de eisen vergelijkbaar, maar voor hardhoutooibos vereist HABITAT een overstromingsduur van minimaal 2 dagen per jaar, terwijl hardhoutooibos volgens Van den Berg (2021) niet hoeft te overstromen.

Tabel D.1 Beschikbare rekenregels inundatieduur

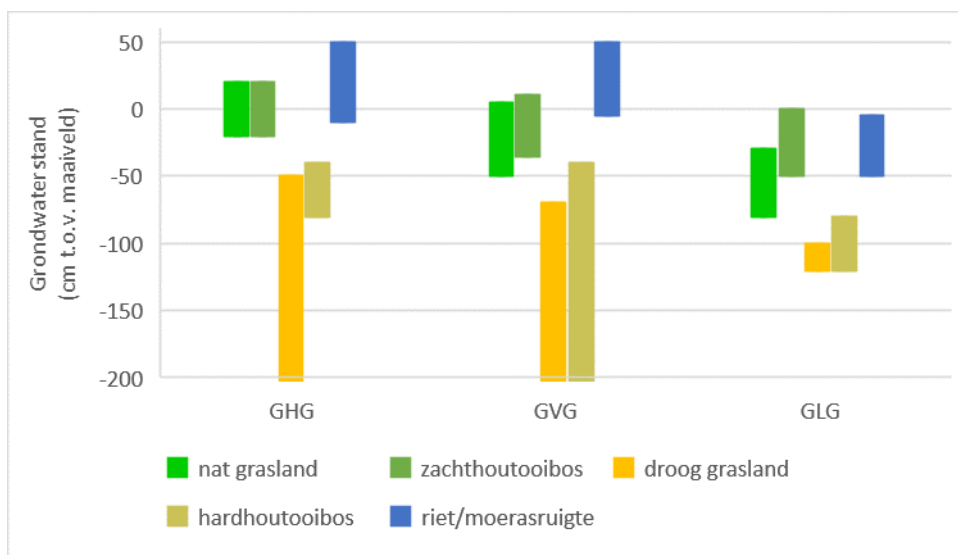
	Van den Berg (2021)		HABITAT		
	Minimum aantal dagen	Maximum aantal dagen	Minimum aantal dagen	Maximum aantal dagen	diepte
drijfplanten				365	>20 cm
riet/moerasruigte (helofyten)	160	220		365	0-20 cm
droogvallende zone		0	150	365	
nat grasland	50	100			
zachthoutooibos	50	134	50	150	
droog grasland	0	10			
hardhoutooibos	0	35	2	50	

Grondwaterstanden

HABITAT bevatte tot nu toe geen rekenregels over de relatie tussen ecotooptypen en grondwaterstanden. Daarvoor is gebruik gemaakt van Van den Berg (2021). Onderstaande figuur geeft een grafische weergave van de rekenregels van Van den Berg (2021). De waarden zijn ook te zien in Tabel D.2.

Tabel D.2 Rekenregels voorgesteld door Van den Berg (2021). De waarden in de tabel zijn grondwaterstanden ten opzichte van maaiveld. Positieve waarden duiden dus op overstromingen.

	GVG (cm t.o.v. maaiveld)		GLG (cm t.o.v. maaiveld)		GHG (cm t.o.v. maaiveld)	
	min	max	min	max	min	max
Zachthoutooibos/struweel	-35	+10	-50	0	-20	+20
Hardhoutooibos/struweel	oneindig	-40	-120	-80	-80	-40
Nat grasland	-50	+5	-80	-30	-20	+20
Droog grasland	oneindig	-70	-120	-100	oneindig	-50
Riet/moerasruigte	-5	+50	-50	-5	-10	+50



Figuur D.18 Grafische weergave rekenregels voorgesteld door Van den Berg (2021). Positieve waarden duiden op overstromingen.

Het volgende valt op:

- Voor de ecotooptypen droog grasland en hardhoutooibos wordt bij de GVG en de GHG niet altijd een ondergrens vermeld. In theorie zou de GVG en de GHG dus oneindig laag kunnen zijn zonder dat dit beperkingen stelt aan de geschiktheid voor droog grasland of hardhoutooibos.
- De GLG kent echter wel voor alle ecotopen een ondergrens. Daardoor conflicteert deze eis voor droog grasland met de eisen die worden gesteld vanuit de GVG en GHG. Voor hardhoutooibos conflicteert de eis van de GLG met die van de GVG. In werkelijkheid kan de GLG immers nooit hoger zijn dan de GVG en de GHG.
- Voor droog grasland geldt volgens de GLG een zeer beperkte bandbreedte: deze moet tussen de 1 m en 1,2 m beneden maaiveld liggen anders zou er geen droog grasland mogelijk zijn. Deze range lijkt onjuist.

Vergelijking overstromingsduur en grondwaterstanden

In voorliggende studie is de ecotooppotentie zowel bepaald op basis van de overstromingsduren (HABITAT) als op basis van de grondwaterstanden (conform Van den Berg, 2021). Dit levert verschillende beelden op. Het belangrijkste verschil is zichtbaar in de arealen droog grasland en hardhoutooibos. Volgens de grondwaterstanden (GVG en vaak ook GHG) zijn grote oppervlakten in de uiterwaarden langs de Rijn en de Maas geschikt voor hardhoutooibos en grasland. Volgens HABITAT zijn deze oppervlakten veel kleiner. Langs de Maas komt dat vooral doordat hardhoutooibos minimaal 2 dagen per jaar moet overstroomen (aan die eis wordt niet voldaan). Langs de Rijntakken komt dit doordat een deel van de uiterwaarden meer dan 50 dagen per jaar overstroomt en dus te nat zijn voor hardhoutooibos.

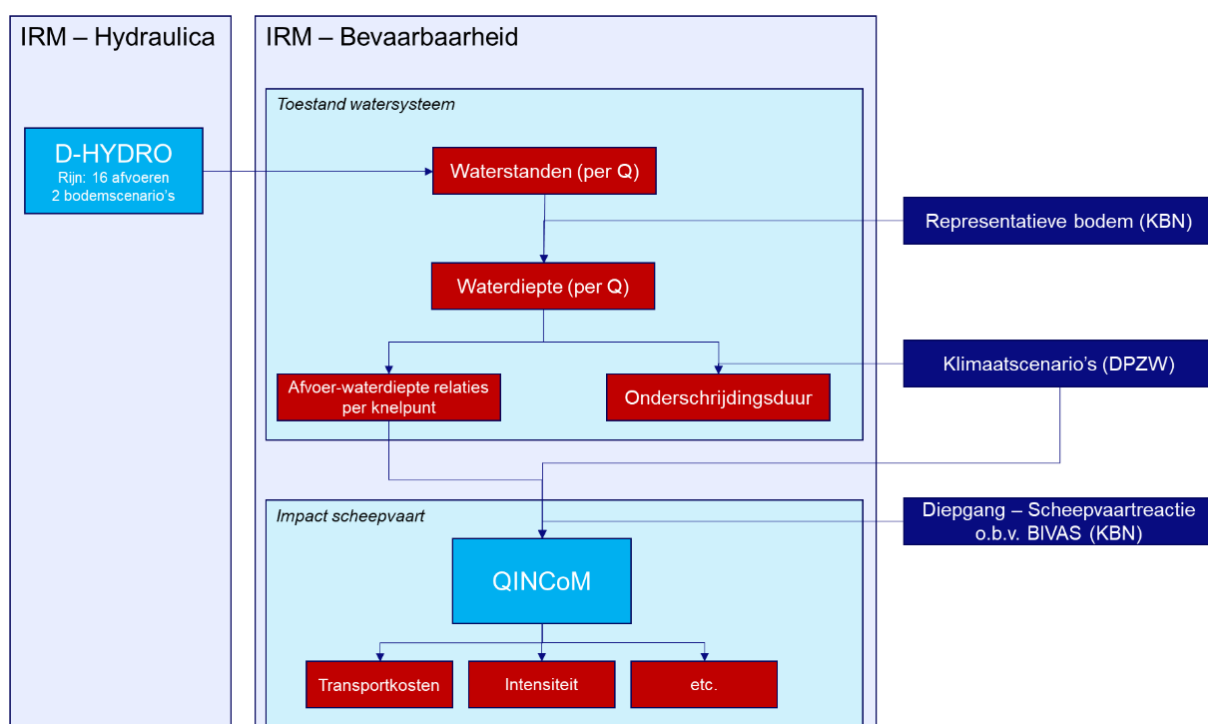
Deze verschillen worden niet alleen veroorzaakt door verschillen in de onderliggende methoden (rekenregels). Ze kunnen mede worden veroorzaakt door het detailniveau waarop de berekeningen worden uitgevoerd. Met name voor de grondwaterstandsmodellering geldt dat een meer gedetailleerd grondwatermodel (gedetailleerdere invoerdata over reliëf, maar ook samenstelling van de ondergrond) een (iets) ander beeld op zou kunnen leveren.

Geadviseerd wordt om te starten met het verbeteren van de kennisregels over natuurpotentie als functie van grondwaterstanden.

E Bijlage bevaarbaarheid

E.1 Methode

Deze bijlage bevat een technische beschrijving van de methode zoals kort beschreven in paragraaf 7.2. De uitgevoerde workflow staat geschetst in Figuur E.1. De waterstanden bij verschillende rivierafvoeren worden berekend met D-HYDRO. Via een representatieve bodemhoogte (overgenomen uit KBN) wordt dit omgerekend naar waterdiepte per gridcel. Per knelpunt worden afvoer-waterdiepterelaties opgesteld. En door de afvoeren te combineren met kans van voorkomen (klimaatscenario's) wordt informatie verkregen over de onderschrijdingsduur van de waterdieptes. In QINCoM wordt deze informatie gebruikt om uitspraken te kunnen doen over vaarkosten en de scheepvaartintensiteit. Enkele aanvullende opmerkingen op de methode staan onder de figuur.



Figuur E.1 Illustratie van de workflow die gehanteerd is voor de beoordeling van bevaarbaarheid

Representatieve bodemhoogte

De berekening van de kleinste waterdiepte in de vaargeul vraagt aandacht: het gebruiken van de maximale bodemhoogte in de vaargeul is gevoelig voor uitschieters. Daarnaast wordt ook bij de MGD (minst gepeilde diepte) een ondiepte helemaal aan de rand van de vaargeul soms geaccepteerd en moet het algoritme hiermee om kunnen gaan. In KBN-HVWN is daarom gebruik gemaakt van een techniek om de bodemhoogte-informatie op te werken naar een rekengrid en hierbij de grote uitschieters in de bodemhoogte te negeren. Voor het bepalen van de vaargeul is een algoritme gebruikt om in dit grid de locatie van een vaargeul met gegeven vaargeulbreedte te zoeken. Als de gewenste waterdiepte niet beschikbaar is wordt bovendien gebruik gemaakt van kennis om ook de breedte enigszins te verminderen. Dit was met name noodzakelijk vanwege de versmallingen (engtes) die ontstaan op de IJssel. Deze methode staat uitgebreid gedocumenteerd in De Jong & Van der Mark (2021).

Voor IRM is gewenst de bovenstaande kennis goed mee te nemen, zonder deze berekeningen opnieuw uit te hoeven voeren. Hiervoor wordt gebruik gemaakt een 'representatieve bodemhoogte' voor ieder punt in de rivier. Deze bodem wordt berekend door analyse van de resultaten van de genoemde grid-analyse. De representatieve bodemhoogte is de waterstand minus waterdiepte bij een afvoer van 700 m³/s in de KBN-resultaten. Deze resultaten zijn ook eerder gebruikt in andere studies (zoals De Jong & Ottevanger, 2021).

Dit betekent wel dat in deze berekeningen gebruik wordt gemaakt van de bodemhoogtescenario's van KBN en niet de aangepaste scenario's zoals toegepast in de hydraulica berekeningen van IRM. In principe zijn beide scenario's gelijk, maar is de trend voor IRM 1 jaar langer voortgezet (32 jaar, i.p.v. 31 jaar). De effecten hiervan zijn vrijwel verwaarloosbaar.

Bepaling onderschrijdingsduur

Voor het bepalen van de onderschrijdingsduur wordt gebruik gemaakt van de afvoerreeks van Lobith van 100 jaar (1911 tot 2011) uit het DPZW. Vanuit deze reeks is geanalyseerd hoeveel dagen per jaar iedere afvoer gemiddeld optreedt.

In de analyse van QINCoM is vanuit deze reeks ook nog een aantal aanvullende statistieken gebruikt, dit betreffen afvoeren met gegeven terugkeertijden (De Jong, 2019). Een jaar met een terugkeertijd van 100 jaar (T100) heeft een kans van optreden van 1:100 per jaar. In de opzet van deze reeks is voor iedere afvoer berekend wat de T10 of T100 condities zouden zijn. Het resultaat is een samengestelde afvoerreeks.

Afvoer-waterdiepterelaties per knelpunt

Ten behoeve van toepassing in de tool QINCoM worden de langsdoorsneden van de waterdiepte (met resultaten per 300 m), samengevat tot een serie knelpunten die relevant zijn voor de berekening van de beschikbare diepgang voor schepen. De gebruikte methode voor het berekenen van de punten is gegeven in onderstaande tabel.

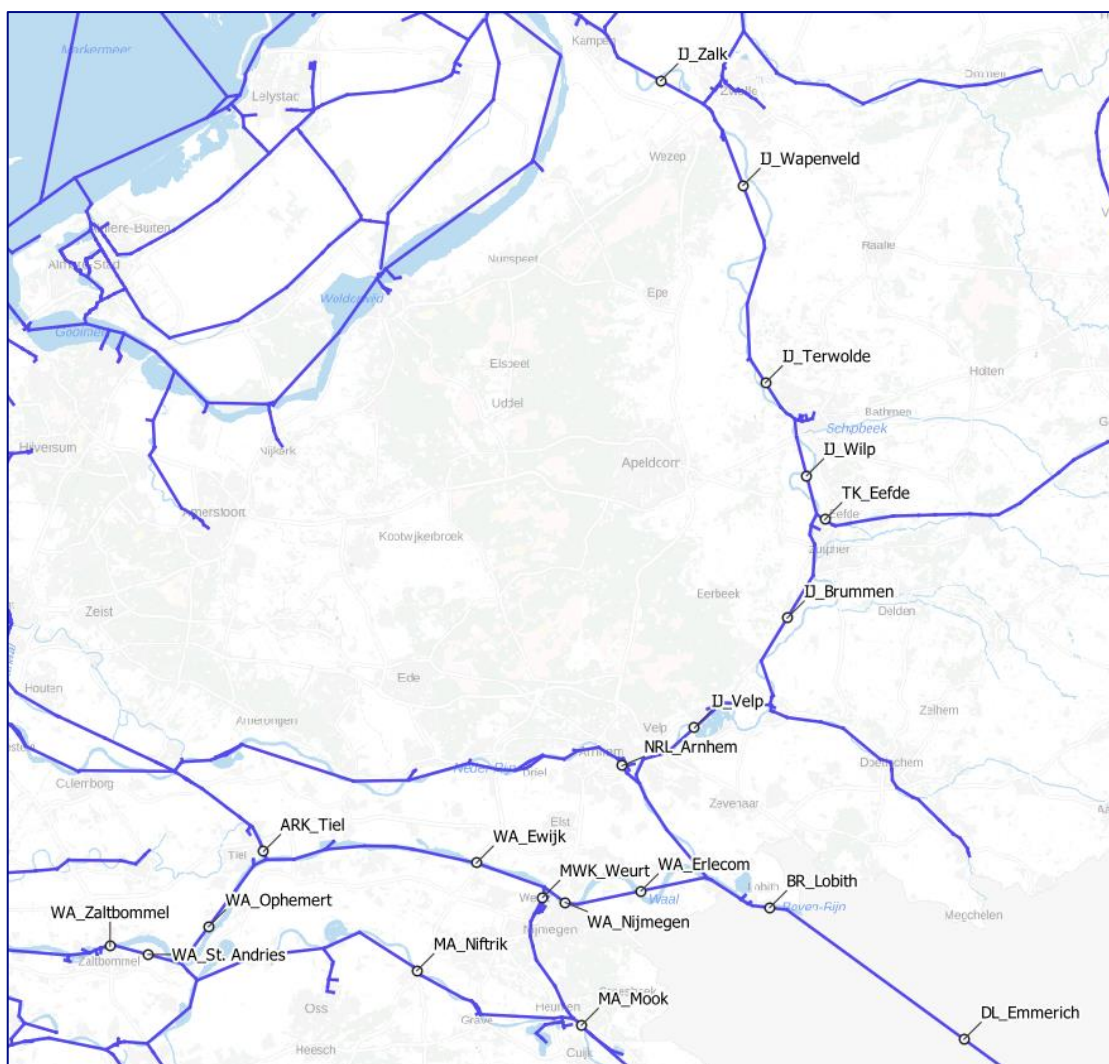
Uit discussies op basis van de conceptresultaten bleek het cruciaal om een accurate kielspeling mee te nemen. Dit is een lastige vraag, omdat duidelijke richtlijnen voor de kielspeling op de rivier ontbreken (zie ook De Jong & Ottevanger, 2021). Op basis van eerdere kennis en inschattingen worden de volgende kielspelingen aangehouden:

- 0,2 m voor alluviale rivier (inclusief ondieptes bij kabels en leidingen);
- 0,4 m voor vaste laag Nijmegen (enkel bij bodem2050);
- 0,7 m bij sluizen met klasse Vb (zie Koedijk, 2020);
- 1,0 m bij sluizen met klasse Via (zie Koedijk, 2020);
- 40% kielspeling op kanalen (geldt ook voor de Maas, zie Koedijk, 2020).

Aanbevolen wordt om uitgangspunten voor de kielspeling, met name bij vaste lagen, nader te onderzoeken.

Tabel E.1 Gebruikte methoden voor het berekenen van waterdieptes bij knelpunten

Naam	Methode voor berekening waterdiepte	Kielspeling (m)
BR_Lobith	Meest ondiepe punt in een radius van 2 km	0.2
WA_Erlecom	Meest ondiepe punt in een radius van 2 km	0.2
WA_Nijmegen	Meest ondiepe punt in een radius van 2 km	0.2 in bodem 2018 0.4 in bodem 2050
WA_Ewijk	Meest ondiepe punt in een radius van 2 km	0.2
WA_Ophemert	Meest ondiepe punt in een radius van 2 km	0.2
WA_St. Andries	Meest ondiepe punt in een radius van 2 km	0.2
WA_Zaltbommel	Meest ondiepe punt in een radius van 2 km	0.2
NRL_Arnhem	Meest ondiepe punt in een radius van 2 km	0.2
MWK_Weurt	Dichtstbijzijnde waterstand minus +1.5 m+NAP (drempelhoogte westkolk)	0.7
ARK_Tiel	Dichtstbijzijnde waterstand minus -2.4 m+NAP (drempelhoogte sluis)	1.0
TK_Eefde	Dichtstbijzijnde waterstand minus -2.3 m+NAP (drempelhoogte nieuwe sluis)	0.7
MA_Niftrik	Constante waterdiepte van 4.5 m (3.2 + 40% kielspeling)	1.28
MA_Mook	Constante waterdiepte van 4.9 m (3.5 + 40% kielspeling)	1.4
IJ_Velp	Meest ondiepe punt in een radius van 2 km	0.2
IJ_Brummen	Meest ondiepe punt in een radius van 2 km	0.2
IJ_Wilp	Meest ondiepe punt in een radius van 2 km	0.2
IJ_Terwolde	Meest ondiepe punt in een radius van 2 km	0.2
IJ_Wapenveld	Meest ondiepe punt in een radius van 2 km	0.2
IJ_Zalk	Meest ondiepe punt in een radius van 2 km	0.2
DL_Emmenich	Gelijk aan de methode in QINCoM (De Jong, 2021)	0.2
DL_Ruhrort	Gelijk aan de methode in QINCoM (De Jong, 2021)	0.2
DL_Kaub	Gelijk aan de methode in QINCoM (De Jong, 2021)	0.2



Figuur E.2 Kaart van alle beschouwde knelpunten. De punten DL_Ruhrort en DL_Kaub liggen verder bovenstrooms op de Rijn en vallen buiten de kaart.

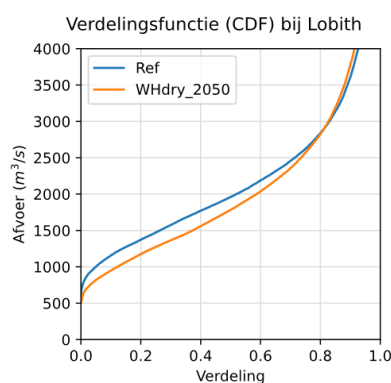
Toepassing QINCoM

De tool QINCoM maakt gebruik van dezelfde rekenmethode als BIVAS. In BIVAS wordt voor ieder van de 400,000 reizen in de IVS90-database van 2014 berekend welke route en diepgang het meest kosten-effectief is gegeven een ingegeven waterdiepte op het netwerk. Omdat de routekeuze hierbij nauwelijks afhankelijk is van de waterdiepte (zie ook de paragraaf 7.2.2) is de informatie uit BIVAS gegroepeerd. Voor deze groepering is een handmatige selectie van knelpunten gemaakt (zie bovenstaande figuur) en is voor iedere reis bepaald welke knelpunten gepasseerd worden in de berekening van BIVAS. Daarnaast is voor iedere reis berekend hoe de lading reduceert bij afnemende diepgang. Dit resulteert in een functie 'diepgang-reactie' per reis (reacties zijn bijvoorbeeld: afnemende vracht, toenemend aantal reizen, toenemende vaarkosten, etc.). Voor schepen die precies dezelfde knelpunten passeren kunnen deze functies bij elkaar opgeteld worden. Hierdoor verkleint het aantal berekeningen tot 213 unieke routes.

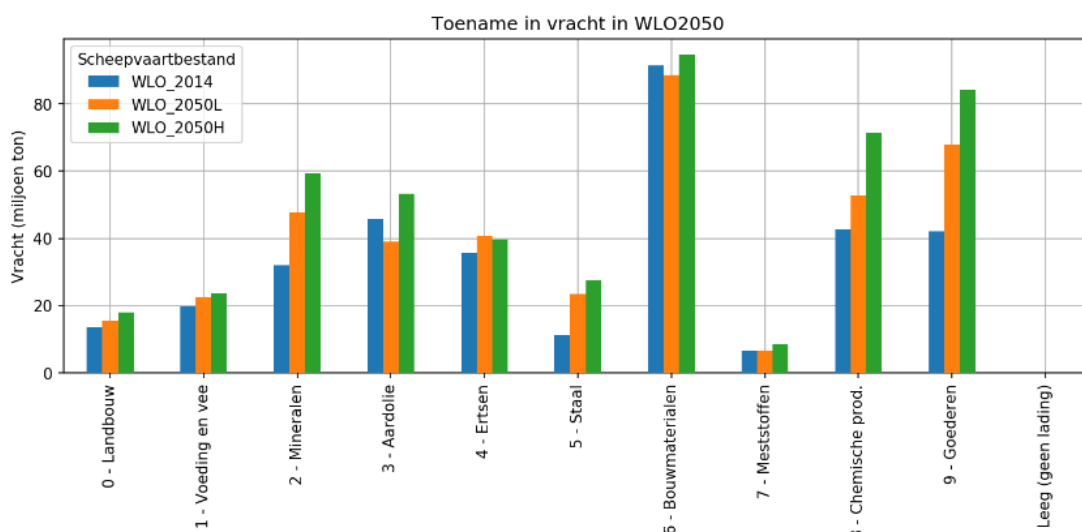
Als onderdeel van de werkzaamheden voor IRM zijn enkele wijzingen doorgevoerd in de diepgang-reactie functies uit de resultaten van KBN. Dit heeft geresulteerd in de dataset KBN_v0.6 en KBN_v0.6_WLO2050H.

Verdere achtergrond van de methode van QINCoM staat beschreven in De Jong (2022).

Als invoer voor QINCoM is gebruik gemaakt van de afvoerverdelingskrommes van scenario Ref en W_{Hdry_2050} zoals weergegeven in Figuur E.3 en de sociaal-economische groei volgens scenario REF_2014 en WLO_2050 zoals weergegeven in Figuur E.4 (zie ook De Jong, 2021).



Figuur E.3 Afvoerverdelingsfuncties behorend bij de referentie (Ref) en het scenario W_{Hdry} in 2050.



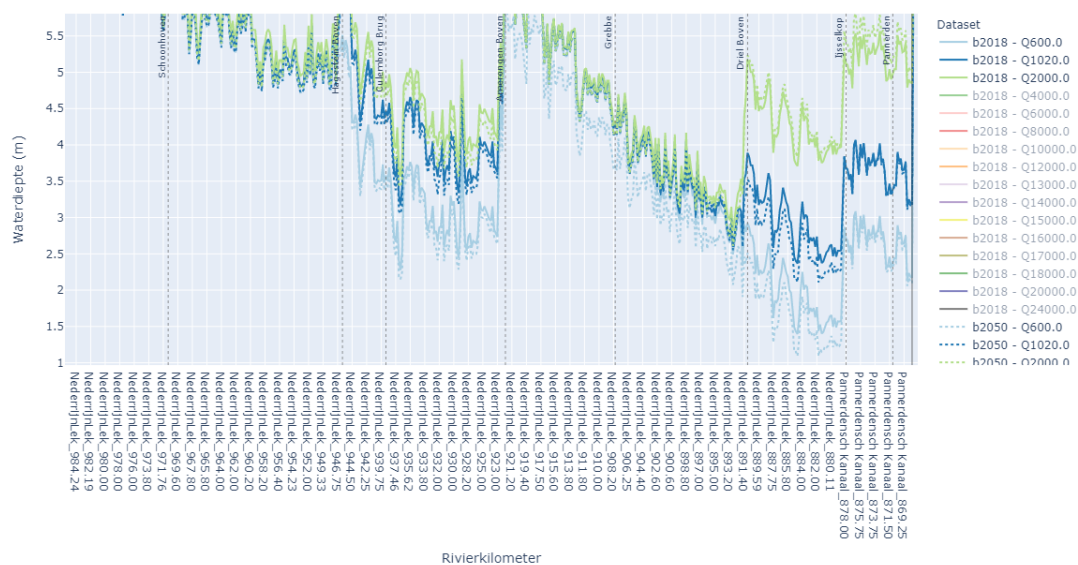
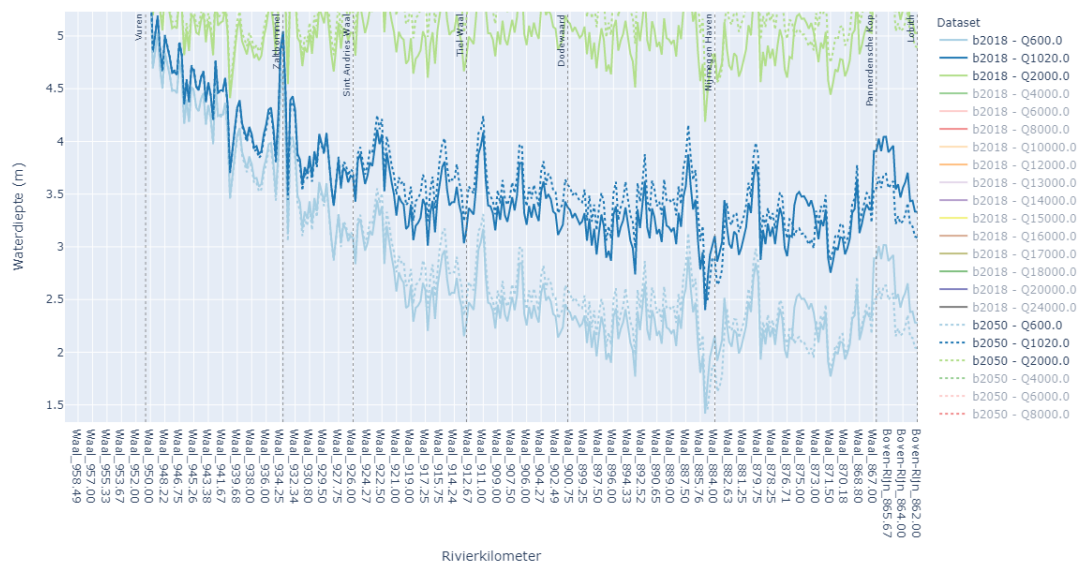
Figuur E.4 Vracht getransporteerd bij verschillende socio-economische scenario's.

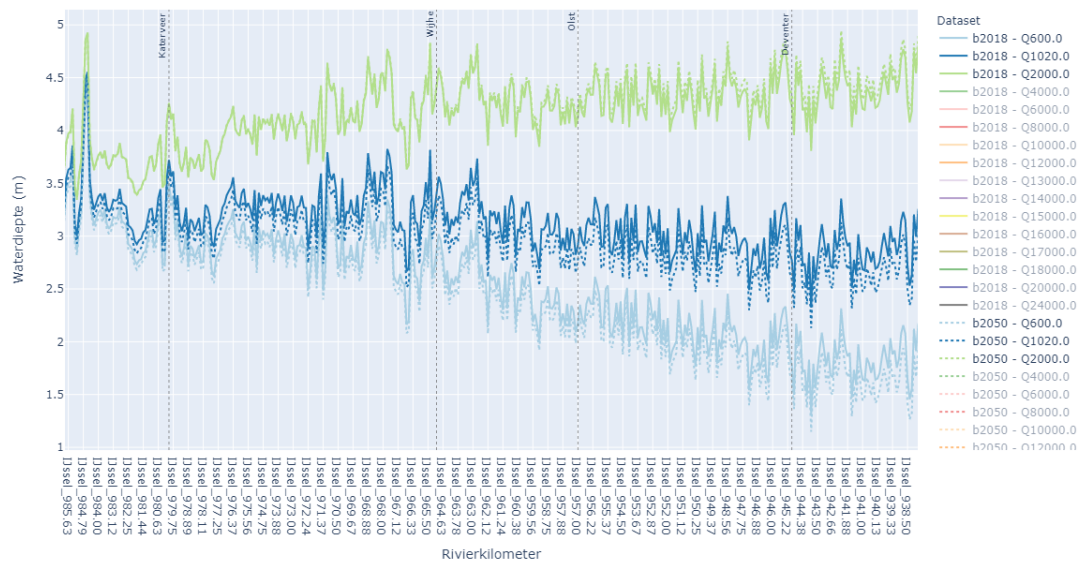
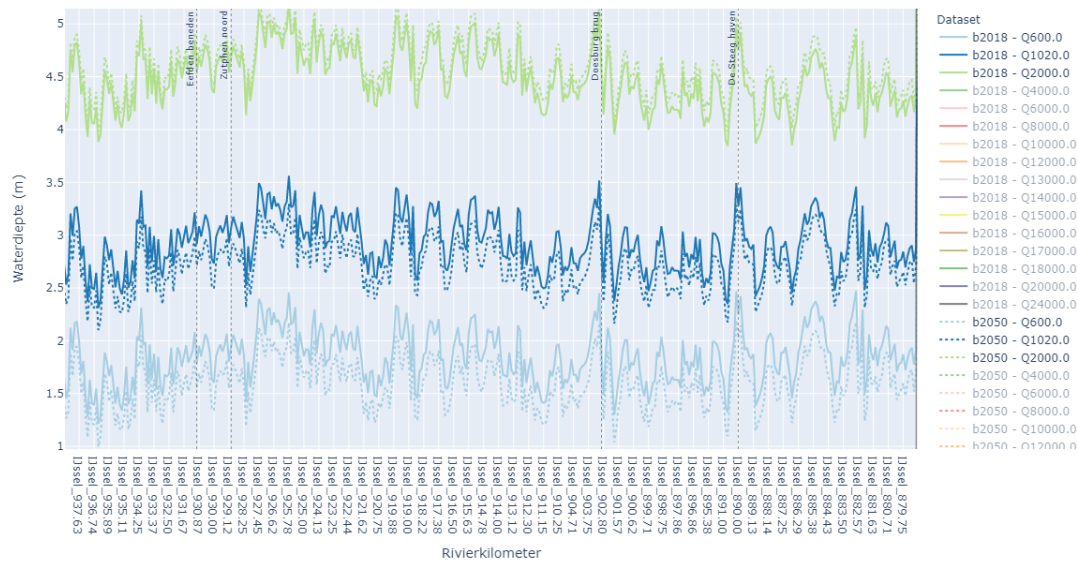
E.2 Overzicht nationale en internationale vaarwegeisen

Tabel E.2 Overzicht van vereiste afmetingen vaarweg per riviervak en deeltraject, opgesteld door RWS-WVL

Riviertak	Deeltraject	Minimum Waterdiepte bij mediane waterstand	Minimum waterdiepte bij laagwater in m	Streefbreedte vaargeul in meter
Bovenrijn-Waal CEMT-klasse: VIc / VII	Spijk-Tiel	> 4,50 m	2,80 bij OLR	150 (na 2020: 170)
	Tiel-Zaltbommel		2,80 - 3,39 bij OLR, Volgt verhanglijn bij mediane afvoer van 2,80 tot 3,39	150 m (na 2020: 170)
	Zaltbommel-Gorinchem		3,39 - 4,50 bij OLR, Volgt verhanglijn bij mediane afvoer van 3,39 tot 4,50	150-200 (Uitlopend breedteprofiel van 150 tot 200)
Merwedes CEMT-klasse: VIc / VII	Boven-Merwede	> 5,40 m	4,50 bij OLR	240
	Beneden-Merwede		4,50 bij OLR	240
	Nieuwe Merwede		4,50 bij OLR	207
Pannerdensch kanaal - Nederrijn - Lek CEMT-klasse: Vb / Via	Pannerden-IJsselkop	> 3,50 m	2,80 bij OLR	80
	IJsselkop-Driel	> 3,50 m	2,80 bij OLR	70
	Driel-Hagestein (gestuwd)	> 4,90 m	4,90 bij stuwpeil	80
	Hagestein-Schoonhoven	> 4,40 m	4,00 bij OLR	80-130 Uitlopend breedte-profiel van 80 tot 130
	Schoonhoven-Krimpen	> 4,40 m	4,00 bij OLR	170
IJssel CEMT-klasse: Va / Vb	IJsselkop-Zutphen (ingang Twentekanal)	> 3,50 m	2,50 bij OLR	50
	Zutphen-Deventer		2,50 bij OLR	60
	Deventer-Wijhe		2,50 bij OLR	65
	Wijhe-Kampen		2,50-3,36 bij OLR, Volgt verhanglijn van 2,50 tot 3,36	65
	Kampen-Ketelmeer		3,50 bij MLW, Volgt verhanglijn van 3,36 tot 3,50	80
	CEMT-klasse: Vb			
Maas(route) CEMT: Va	Ternaaien-Lith	> 4,90 m	4,90 bij MLW (stuwpeil)	Geen minimumbreedte
CEMT: Va	Lith-Heusden	> 4,80 m	4,00 bij MLW	Geen minimumbreedte
CEMT: Via	Bergsche Maas	> 4,80 m	4,00 bij OLR	166
CEMT: VIc	Amer	> 5,40 m	4,50 bij OLR	188

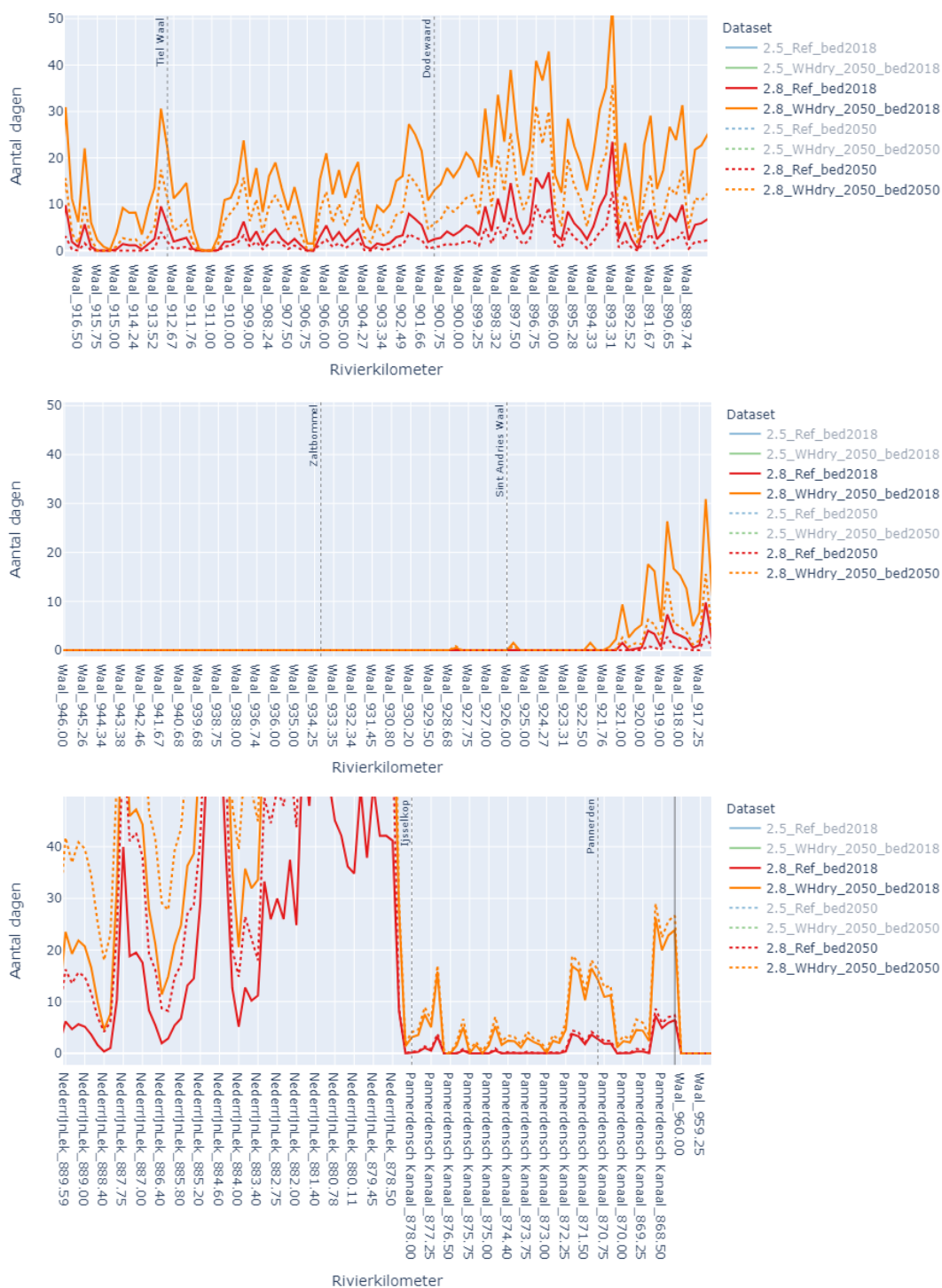
E.3.1 Waterdiepte langs de verschillende riviertakken bij verschillende afvoeren
Deze bijlage bevat aanvullende figuren bij paragraaf 7.3.1.1.

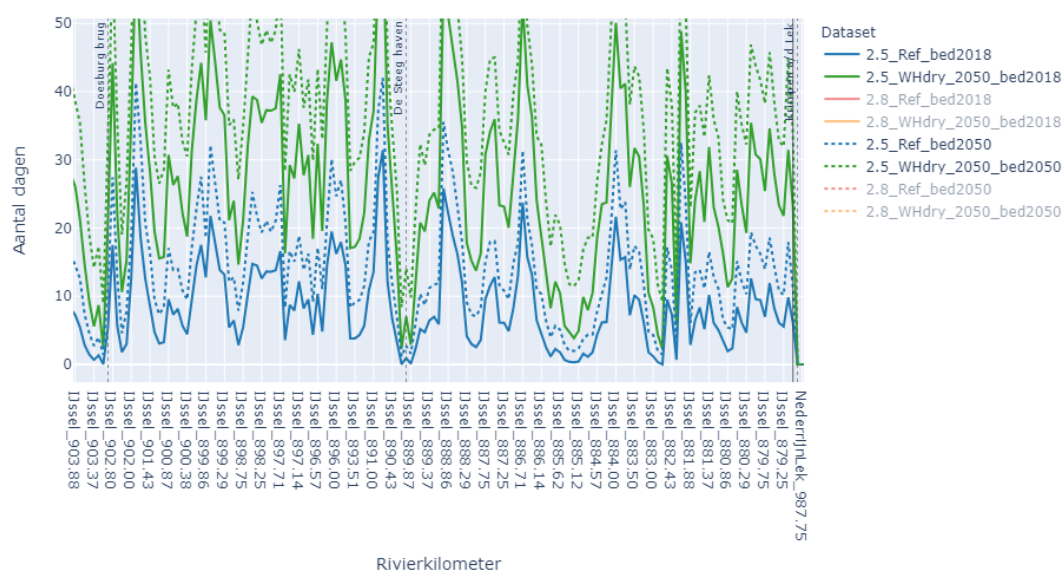
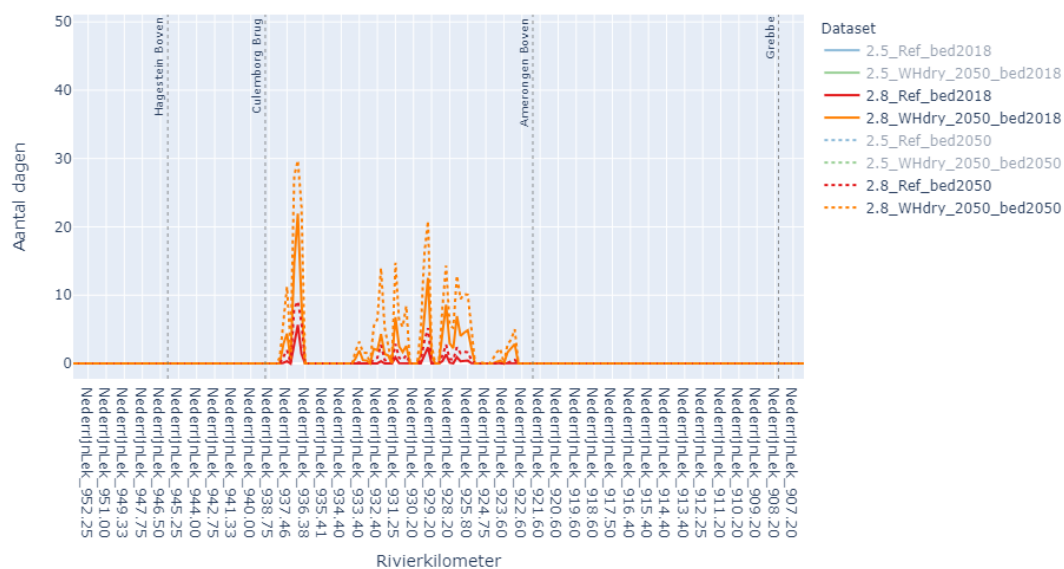
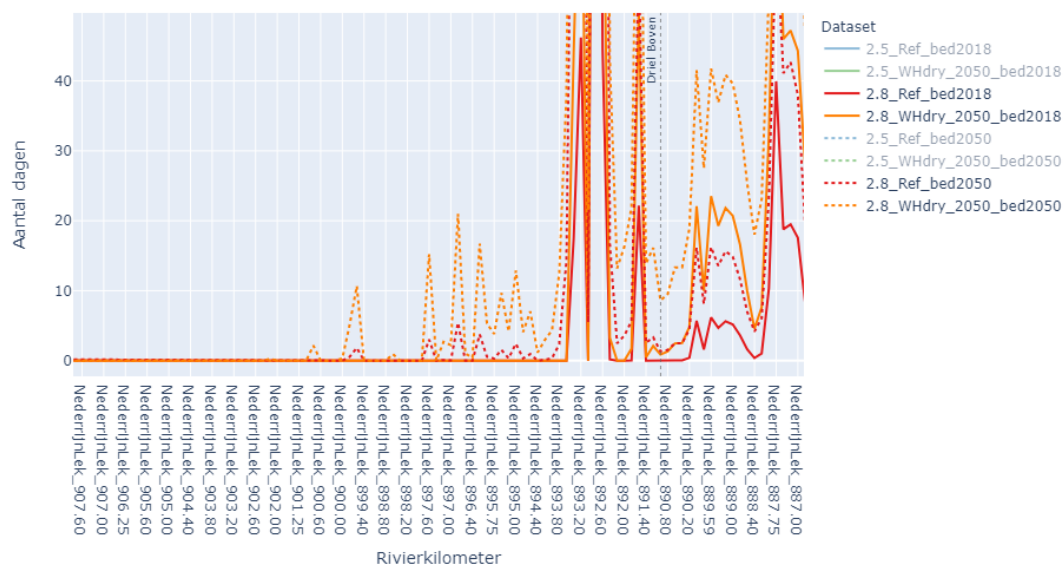


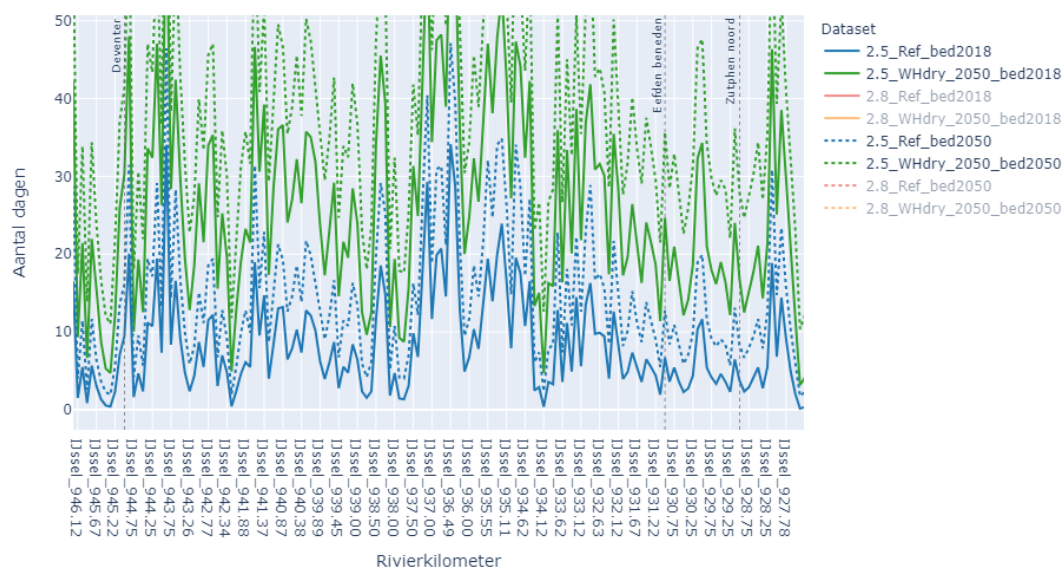
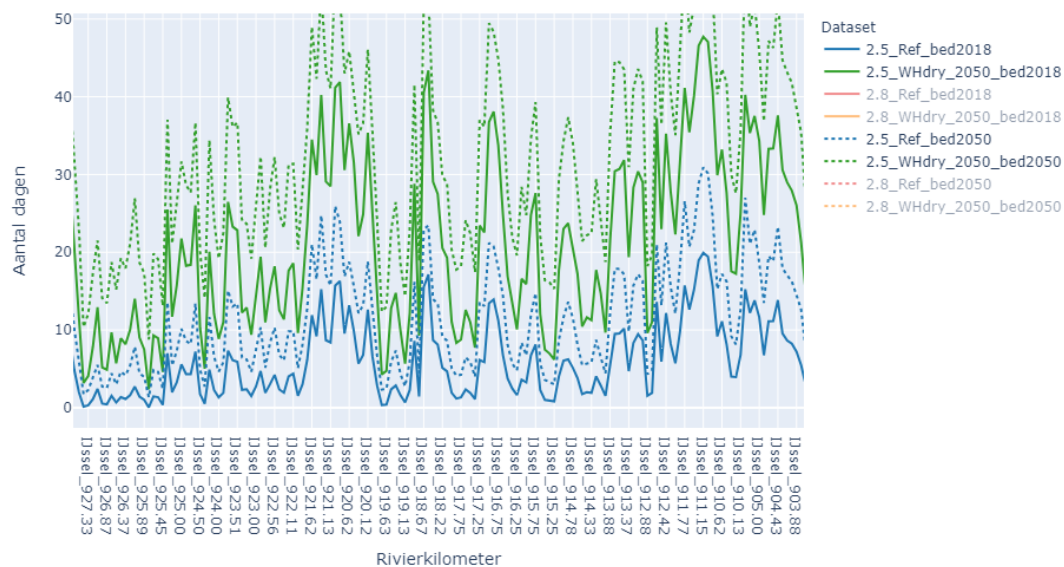


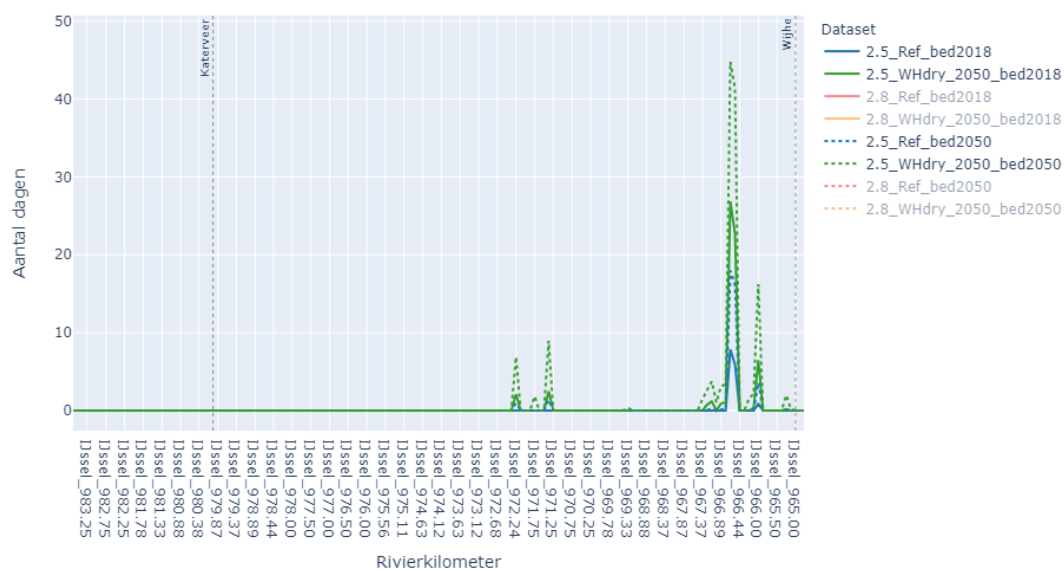
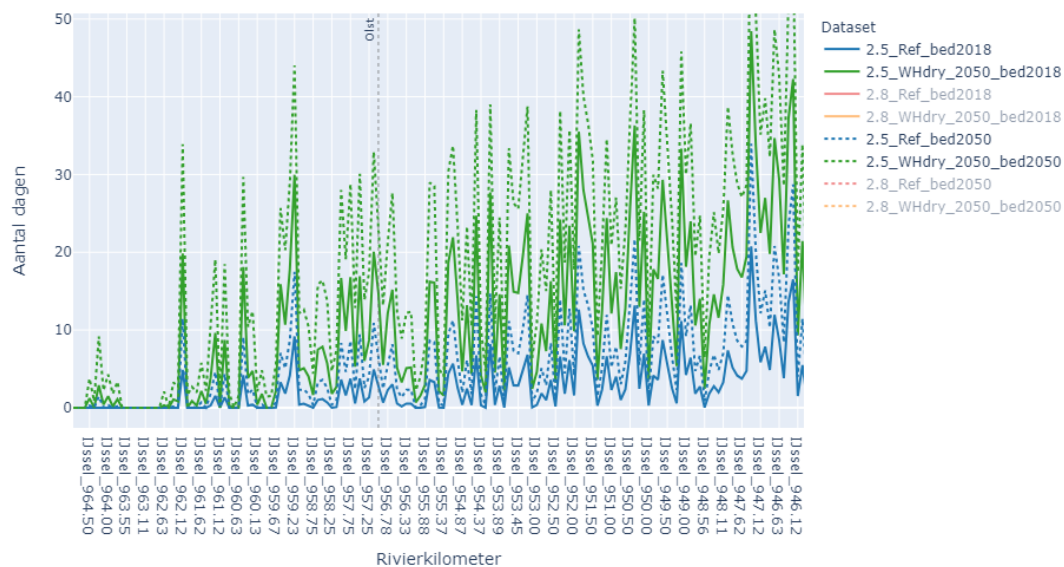
E.3.2 Beschikbaarheid van gewenste waterdiepte

Deze figuren tonen hoeveel dagen per jaar niet kan worden voldaan aan de gewenste vaardiepte. Het zijn aanvullende figuren bij paragraaf 7.3.1.2.





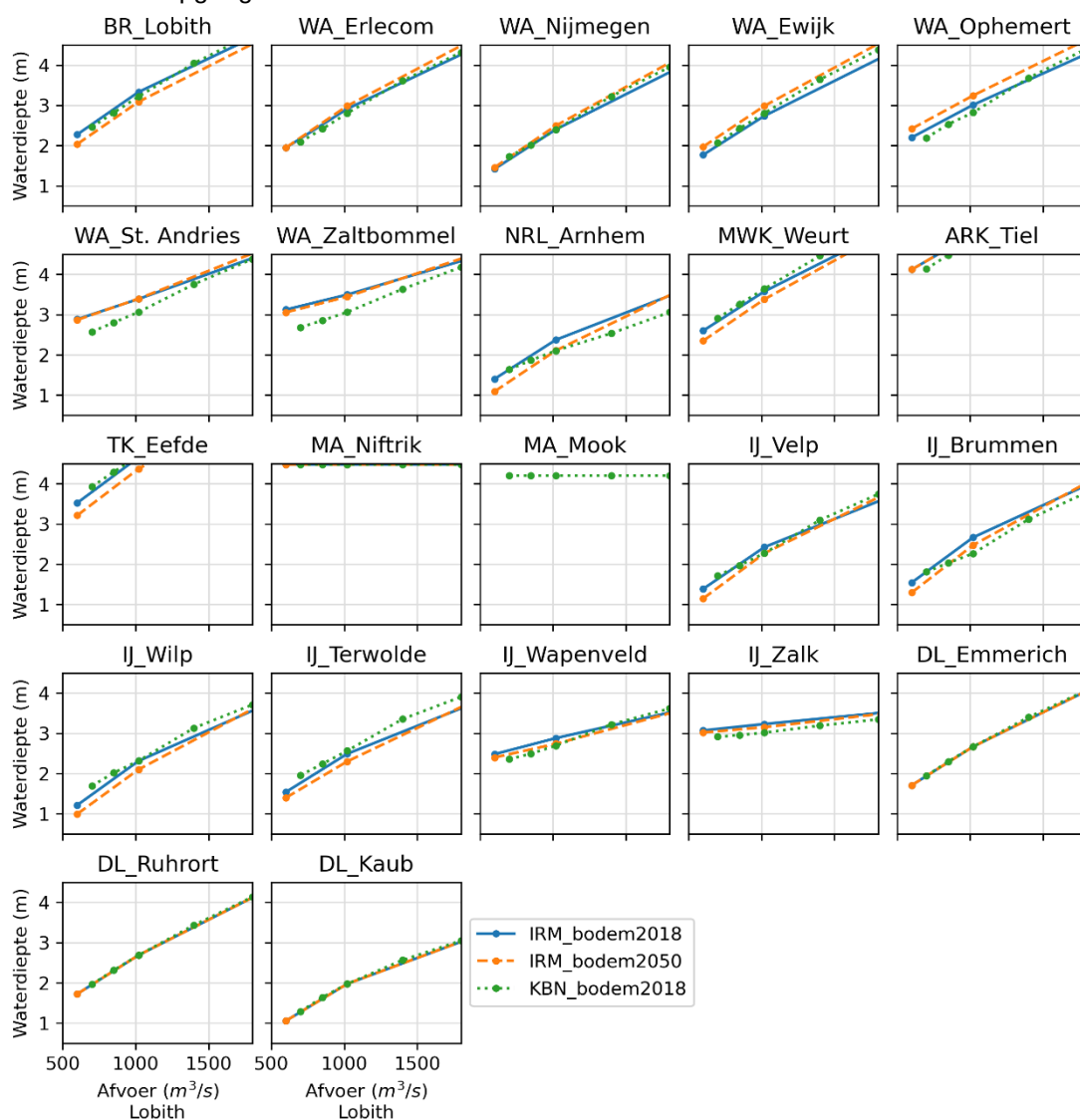




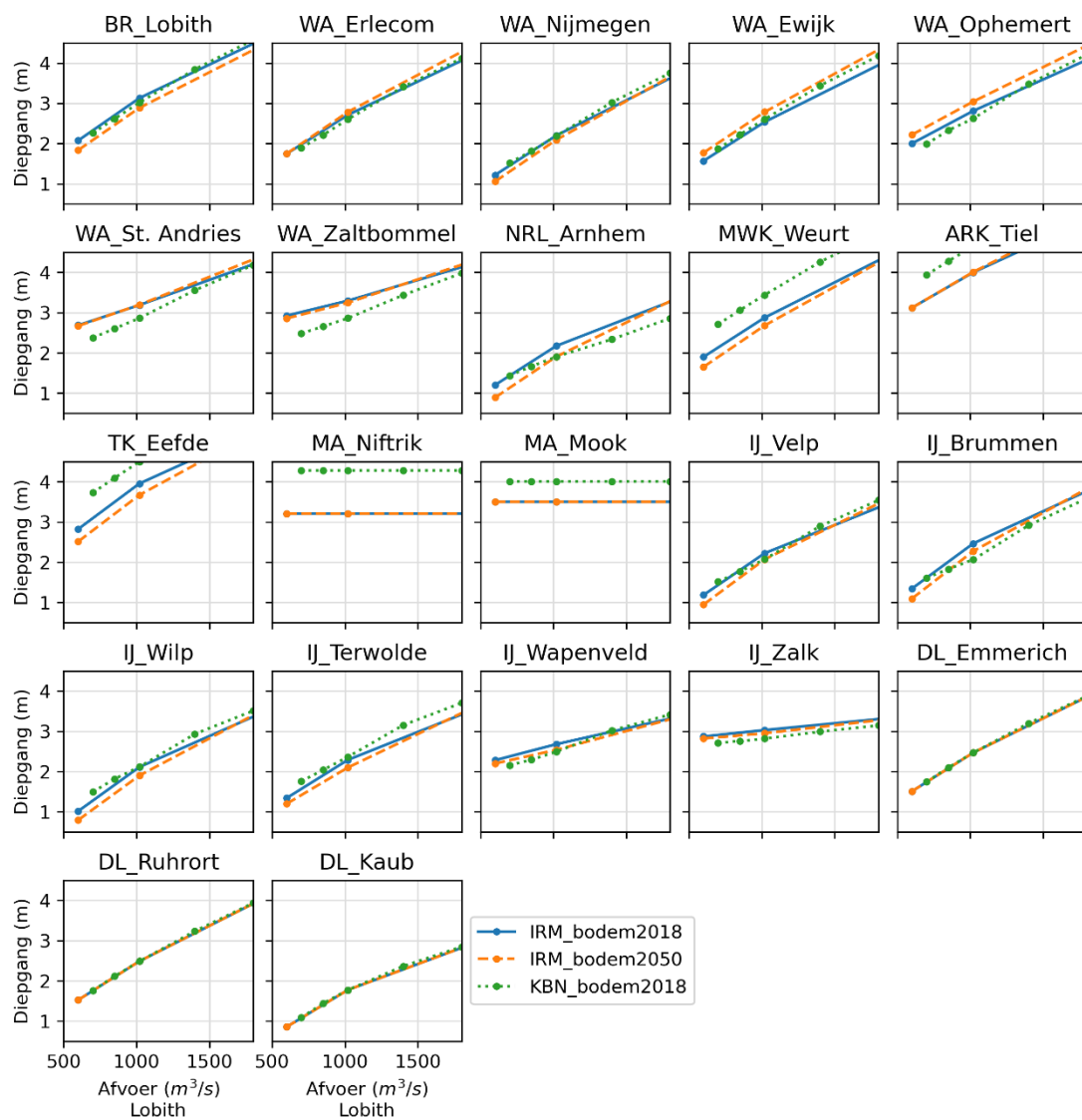
E.3.3

Afvoer-Waterdiepte relaties voor QINCoM

Onderstaande figuren geven de afvoer-waterdiepterelaties en afvoer-diepgangrelaties voor toepassing in QINCoM. In de definitieve berekeningen is gebruik gemaakt van de afvoer-diepgangrelaties.



Figuur E.5 Afvoer-waterdiepte relatie per knelpunt



Figuur E.6 Afvoer-diepgangrelatie per knelpunt

E.4 Resultaten scheepvaart

Tabel E.3 Afname in vrachtpotentieel per jaar ten gevolge van laagwater op de rivieren

Vrachtpotentieel per jaar (mln. ton)			Totaal			Afname		
			Heel NL	Waal	IJssel	Heel NL	Waal	IJssel
WLO_scenario	Bodemscenario	Klimaatscenario						
REF2014	bodem2018	Zonder droogtebeperkingen	845	320	28			
		Ref (gemiddeld)	777	259	24	-68	-61	-3
		Ref (T1)	831	307	27	-14	-13	0
		Ref (T2)	786	267	25	-59	-53	-3
		Ref (T10)	717	207	21	-128	-113	-7
		Ref (T100)	618	125	14	-227	-195	-13
		W _{Hdry} _2050 (gemiddeld)	752	238	23	-94	-82	-5
		W _{Hdry} _2050 (T1)	821	298	27	-24	-22	-1
		W _{Hdry} _2050 (T2)	758	243	23	-87	-77	-4
		W _{Hdry} _2050 (T10)	684	180	18	-162	-140	-9
		W _{Hdry} _2050 (T100)	582	98	11	-263	-222	-17
	bodem2050	Zonder droogtebeperkingen	845	320	28			
		Ref (gemiddeld)	777	258	24	-69	-62	-4
		Ref (T1)	832	308	27	-13	-12	0
		Ref (T2)	787	266	25	-59	-54	-3
		Ref (T10)	715	203	20	-130	-117	-7
		Ref (T100)	611	117	13	-234	-203	-15
		W _{Hdry} _2050 (gemiddeld)	750	235	22	-95	-85	-5
		W _{Hdry} _2050 (T1)	822	298	27	-23	-22	-1
		W _{Hdry} _2050 (T2)	757	241	23	-88	-79	-5
		W _{Hdry} _2050 (T10)	680	175	18	-165	-145	-10
		W _{Hdry} _2050 (T100)	576	90	9	-270	-230	-18
WLO2050H	bodem2018	Zonder droogtebeperkingen	1203	487	32			
		Ref (gemiddeld)	1100	392	28	-104	-95	-4
		Ref (T1)	1181	467	31	-22	-21	0
		Ref (T2)	1113	404	29	-90	-84	-3
		Ref (T10)	1011	312	24	-193	-176	-8

Vrachtpotentieel per jaar (mln. ton)			Totaal			Afname		
			Heel NL	Waal	IJssel	Heel NL	Waal	IJssel
		Ref (T100)	867	187	16	-337	-300	-16
		W _{Hdry} _2050 (gemiddeld)	1063	359	26	-141	-128	-6
		W _{Hdry} _2050 (T1)	1165	452	31	-38	-36	-1
		W _{Hdry} _2050 (T2)	1072	367	27	-131	-120	-5
		W _{Hdry} _2050 (T10)	962	270	21	-241	-217	-11
		W _{Hdry} _2050 (T100)	816	146	13	-387	-341	-19
	bodem2050	Zonder droogtebeperkingen	1203	487	32			
		Ref (gemiddeld)	1099	390	28	-105	-97	-4
		Ref (T1)	1182	468	31	-21	-20	0
		Ref (T2)	1113	403	29	-90	-84	-3
		Ref (T10)	1007	306	23	-197	-181	-8
		Ref (T100)	856	174	14	-347	-313	-17
		W _{Hdry} _2050 (gemiddeld)	1060	356	26	-143	-131	-6
		W _{Hdry} _2050 (T1)	1166	453	31	-37	-35	-1
		W _{Hdry} _2050 (T2)	1070	364	26	-133	-123	-5
		W _{Hdry} _2050 (T10)	956	263	20	-247	-224	-12
		W _{Hdry} _2050 (T100)	806	134	11	-397	-353	-21

Tabel E.4 Toename in reizen per jaar ten gevolge van laagwater op de riviere

Reizen per jaar (x1000)			Totaal			Toename		
			Heel NL	Waal	IJssel	Heel NL	Waal	IJssel
WLO_scenario	Bodemscenario	Klimaatscenario						
REF2014	bodem2018	Zonder droogtebeperkingen	399	104	19			
		Ref (gemiddeld)	409	113	20	9.9	8.9	0.6
		Ref (T1)	399	104	19	0.1	0.1	0.0
		Ref (T2)	403	107	19	3.8	3.5	0.2
		Ref (T10)	423	126	20	24.3	21.8	1.3
		Ref (T100)	499	191	27	100.4	87.5	7.9
		W _{Hdry} _2050 (gemiddeld)	424	126	21	25.1	22.0	1.9
		W _{Hdry} _2050 (T1)	399	104	19	0.4	0.4	0.0
		W _{Hdry} _2050 (T2)	412	116	20	12.8	11.6	0.7
		W _{Hdry} _2050 (T10)	464	160	24	64.6	56.2	5.3
		W _{Hdry} _2050 (T100)	594	266	41	194.9	162.5	22.0
	bodem2050	Zonder droogtebeperkingen	399	104	19			
		Ref (gemiddeld)	410	114	20	11.6	10.5	0.9
		Ref (T1)	399	104	19	0.1	0.1	0.0
		Ref (T2)	403	108	19	4.2	3.9	0.2
		Ref (T10)	427	130	21	28.3	25.7	2.1
		Ref (T100)	520	210	32	121.2	106.1	13.2
		W _{Hdry} _2050 (gemiddeld)	428	130	22	29.6	26.1	3.0
		W _{Hdry} _2050 (T1)	399	104	19	0.4	0.4	0.0
		W _{Hdry} _2050 (T2)	414	117	20	14.7	13.5	1.0
		W _{Hdry} _2050 (T10)	477	172	28	78.1	68.2	8.9
		W _{Hdry} _2050 (T100)	619	290	48	220.4	186.1	29.3
WLO2050H	bodem2018	Zonder droogtebeperkingen	539	157	22			
		Ref (gemiddeld)	554	171	23	14.9	13.8	0.7
		Ref (T1)	539	157	22	0.1	0.1	0.0
		Ref (T2)	545	162	22	5.8	5.5	0.2
		Ref (T10)	575	191	24	36.3	33.6	1.5

Reizen per jaar (x1000)			Totaal			Toename		
			Heel NL	Waal	IJssel	Heel NL	Waal	IJssel
		Ref (T100)	688	291	31	148.9	134.6	9.1
		W _{Hdry_2050} (gemiddeld)	576	191	24	37.2	33.7	2.2
		W _{Hdry_2050} (T1)	540	157	22	0.6	0.6	0.0
		W _{Hdry_2050} (T2)	558	175	23	19.3	17.9	0.8
		W _{Hdry_2050} (T10)	635	243	28	95.7	86.4	6.0
		W _{Hdry_2050} (T100)	822	404	47	283.0	247.0	25.0
	bodem2050	Zonder droogtebeperkingen	539	157	22			
		Ref (gemiddeld)	556	173	23	17.4	16.1	1.1
		Ref (T1)	539	157	22	0.1	0.1	0.0
		Ref (T2)	545	163	22	6.4	6.0	0.3
		Ref (T10)	582	196	25	42.6	39.5	2.5
		Ref (T100)	719	319	37	179.5	162.2	15.4
		W _{Hdry_2050} (gemiddeld)	583	197	26	43.9	39.9	3.5
		W _{Hdry_2050} (T1)	540	157	22	0.6	0.6	0.0
		W _{Hdry_2050} (T2)	561	178	23	22.2	20.8	1.2
		W _{Hdry_2050} (T10)	655	261	32	115.5	104.1	10.3
		W _{Hdry_2050} (T100)	859	438	56	319.9	281.1	33.6

Tabel E.5 Toename in vaarkosten per jaar (mln euro) ten gevolge van laagwater op de rivieren

			Totaal			Toename		
			Heel NL	Waal	IJssel	Heel NL	Waal	IJssel
WLO_scenario	Bodemscenario	Klimaatscenario						
REF2014	bodem2018	Zonder droogtebeperkingen	2325	1225	93			
		Ref (gemiddeld)	2418	1313	96	94	88	3
		Ref (T1)	2326	1226	93	1	1	0
		Ref (T2)	2366	1264	94	41	39	1
		Ref (T10)	2554	1440	100	229	215	8
		Ref (T100)	3156	1996	131	831	771	38
		W _{Hdry} _2050 (gemiddeld)	2538	1423	102	214	199	9
		W _{Hdry} _2050 (T1)	2330	1230	93	5	5	0
		W _{Hdry} _2050 (T2)	2449	1341	97	124	117	4
		W _{Hdry} _2050 (T10)	2854	1716	118	530	491	25
		W _{Hdry} _2050 (T100)	3714	2489	177	1389	1265	84
	bodem2050	Zonder droogtebeperkingen	2325	1225	93			
		Ref (gemiddeld)	2427	1321	97	102	97	4
		Ref (T1)	2326	1226	93	1	1	0
		Ref (T2)	2368	1266	94	43	42	1
		Ref (T10)	2576	1462	103	251	238	11
		Ref (T100)	3250	2088	146	926	863	53
		W _{Hdry} _2050 (gemiddeld)	2560	1444	105	235	220	13
		W _{Hdry} _2050 (T1)	2330	1230	93	5	5	0
		W _{Hdry} _2050 (T2)	2460	1353	98	135	128	5
		W _{Hdry} _2050 (T10)	2914	1773	128	589	548	35
		W _{Hdry} _2050 (T100)	3820	2595	196	1496	1371	103
WLO2050H	bodem2018	Zonder droogtebeperkingen	3648	2026	108			
		Ref (gemiddeld)	3790	2161	112	142	135	4
		Ref (T1)	3650	2028	108	2	2	0
		Ref (T2)	3711	2086	109	63	60	1
		Ref (T10)	3994	2356	117	346	330	9
		Ref (T100)	4897	3206	151	1249	1180	43
		W _{Hdry} _2050 (gemiddeld)	3969	2330	118	321	304	11
		W _{Hdry} _2050 (T1)	3656	2034	108	8	8	0
		W _{Hdry} _2050 (T2)	3836	2205	112	188	179	5
		W _{Hdry} _2050 (T10)	4444	2777	136	796	751	28
		W _{Hdry} _2050 (T100)	5721	3957	203	2073	1931	95

		Totaal			Toename		
		Heel NL	Waal	IJssel	Heel NL	Waal	IJssel
bodem2050	Zonder droogtebeperkingen	3648	2026	108			
	Ref (gemiddeld)	3803	2174	113	155	148	5
	Ref (T1)	3650	2028	108	2	2	0
	Ref (T2)	3714	2090	110	66	64	2
	Ref (T10)	4029	2390	120	381	364	12
	Ref (T100)	5041	3345	169	1393	1319	61
	W _{Hdry} _2050 (gemiddeld)	4002	2362	122	354	336	15
	W _{Hdry} _2050 (T1)	3656	2034	108	8	8	0
	W _{Hdry} _2050 (T2)	3853	2223	114	205	197	6
	W _{Hdry} _2050 (T10)	4534	2864	148	886	838	40
	W _{Hdry} _2050 (T100)	5880	4114	226	2232	2088	118

E.5 Vergelijking KBN

Een deel van de resultaten kan vergeleken worden met de resultaten uit Klimaatbestendige Netwerken (KBN). In onderstaande tabel zijn deze resultaten gecombineerd weergegeven. Als we de resultaten van KBN en IRM met elkaar vergelijken valt op dat de toename van de kosten door droogte in IRM hoger is. De verklaring hiervoor is dat in KBN geen rekening gehouden is met ondiepte knelpunten in het buitenland en met name de scheepvaart onrealistisch diep kan laden. Doordat in IRM wel rekening wordt gehouden met de ondieptes verder bovenstrooms op de Rijn is de toename in de vaarkosten groter. Dezelfde conclusie werd ook getrokken bij de opzet van de tool QINCoM, daarom zijn ook deze resultaten aan de tabel toegevoegd.

Tabel: Vergelijking van de vaarkosten (mln. euro) van KBN, QINCoM en IRM

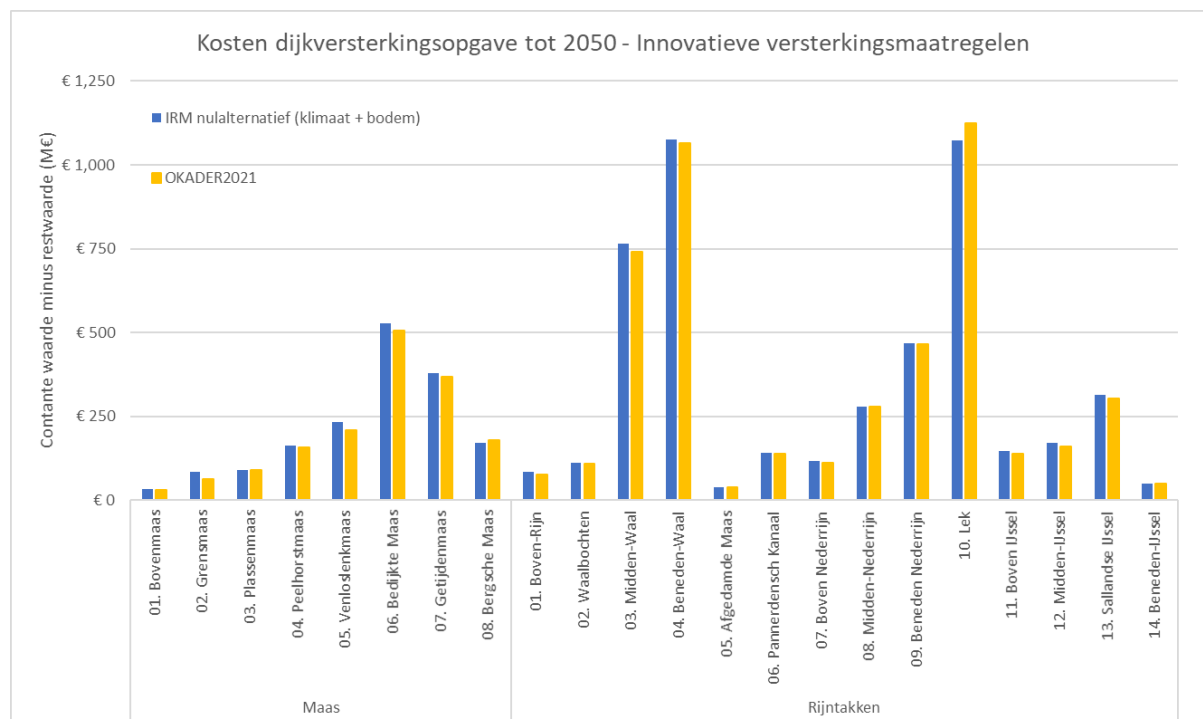
	Zonder droogte	Gemiddelde toename door droogtebeperkingen	Toename bij T2-droogte	Toename bij T10-droogte	Toename bij T100-droogte
Resultaten KBN (Figuur 5.4 van De Jong, 2021)	2325	47	23	126	408
Resultaten QINCoM (Figuur 4.8 van de Jong, 2022)	N/A	+/- 90	+/- 30	N/A	+/- 780
Resultaten IRM (deze rapportage, Tabel 7.6)	2325	93	41	229	831

F Bijlage waterveiligheid – vergelijking eerdere berekeningen

Als onderdeel van de actualisatie van OKADER versie 2021.1 zijn er voor de Maas en de Rijntakken (inclusief IJVD), sommen gemaakt (OKADER2021). Dit zijn de meest recente sommen om de IRM resultaten mee te vergelijken. Echter, een belangrijk verschil is dat de analyses gebruik maken van waterstandsberekeningen die zijn uitgevoerd met verschillende modellen (WAQUA versus D-HYDRO), die tot andere resultaten leiden.

Over het grootste deel van de IRM trajecten resulteert de som op basis van de IRM-randvoorwaarden in een grotere versterkingsopgave en hogere bijbehorende kosten (zie Figuur F.1 en verder). Dit verschil is voor een belangrijk deel terug te voeren tot de overgang van 5^e generatie WAQUA (WBI2017) naar 6^{de} generatie D-HYDRO model t.b.v. BOI2023. Het laatst genoemde model berekent hogere waterstanden. De verschillen tussen deze modellen worden op dit moment nader onderzocht en gerapporteerd in Kusters (2022) (Rijn) en Van der Deijl (2022) (Maas).

In de benedenloop van de Maas (Bergsche Maas) en Rijntakken (Lek en Beneden-IJssel) zien we het omgekeerde. Hier vallen de versterkingsopgave en kosten die daarmee gemoeid zijn, volgens de OKADER2021-som juist hoger uit. Dit verschil berust op een verschil in gebruikte randvoorwaarden voor deze overgangsgebieden. In de hydraulica voor het nulalternatief is de invloed van zeespiegelstijging maar beperkt meegenomen. De hydraulische resultaten gebruikt bij de OKADER2021 som door HKV is in het overgangsgebied, benedenstrooms van Hagestein, gebruik gemaakt van Qh-relaties waarin onder andere zeewaterstanden, wind, faalkans van Maeslandkering als stochasten zijn meegenomen. In de IRM resultaten zijn de benedenstroomse Qh-relaties afgeleid op basis van de hoogste waterstand bij een gemiddeld getij. Dit resulteert in een lagere waterstand in het overgangsgebied.

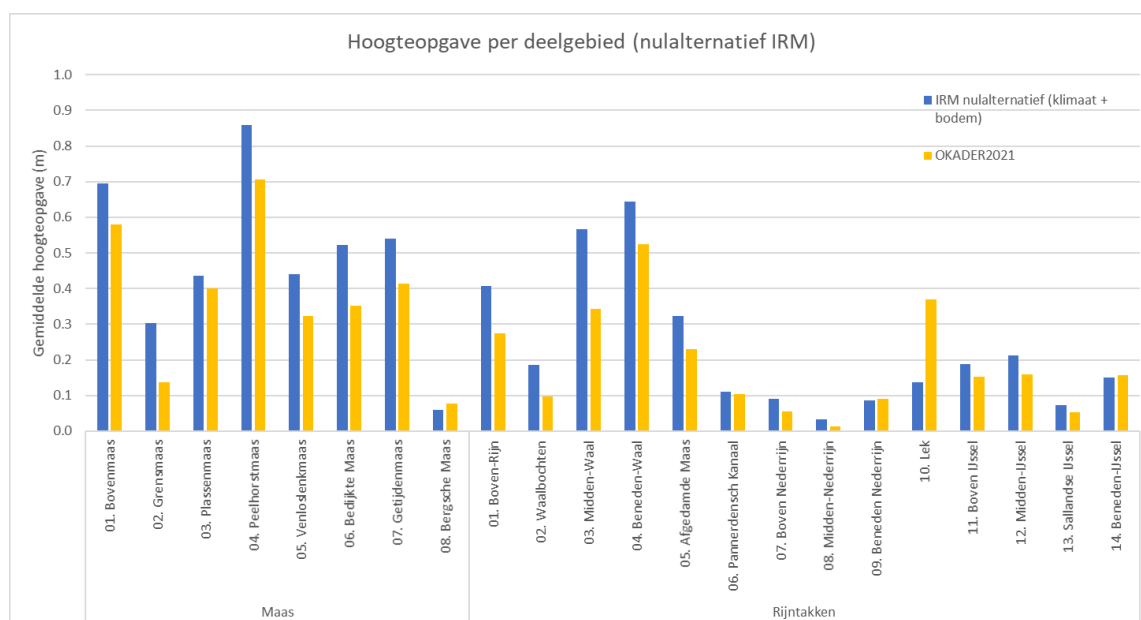


Figuur F.1 Verschil in dijkversterkingskosten berekend voor het nulalternatief IRM en OKADER2021.

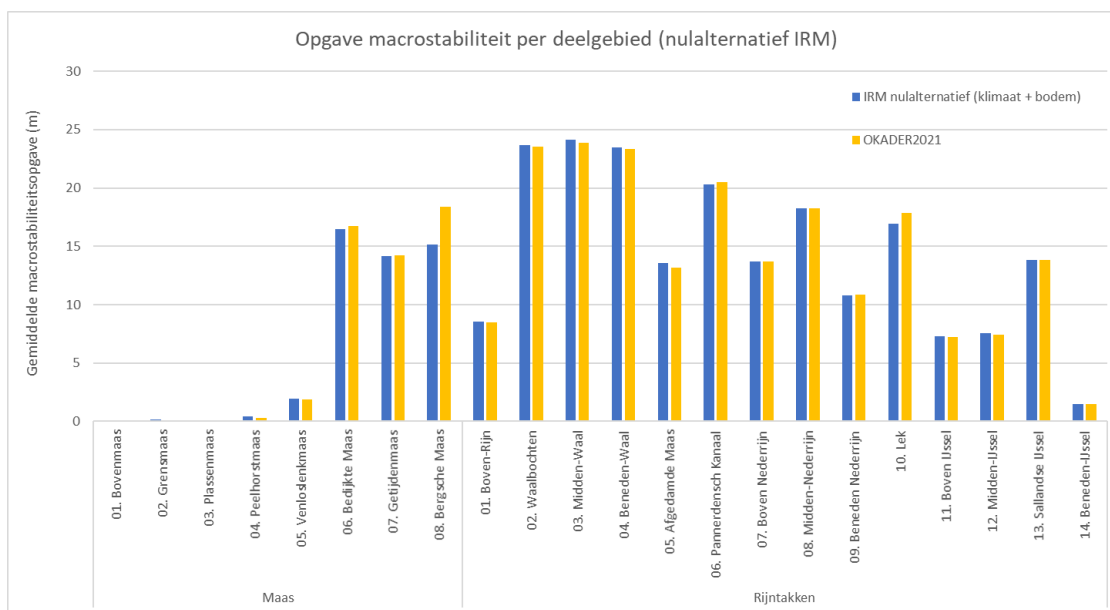
Tabel F.1 Verschil in versterkingskosten bepaald met het D-HYDRO model (dit rapport) en WAQUA (OKADER2021).

Berekening	Rijntakken	Maas
Bodem 2050 + klimaat (D-HYDRO)	4840 M€	1683 M€
OKADER 2021 (WAQUA)	4802 M€	1604 M€
Vershil	38 M€	79 M€

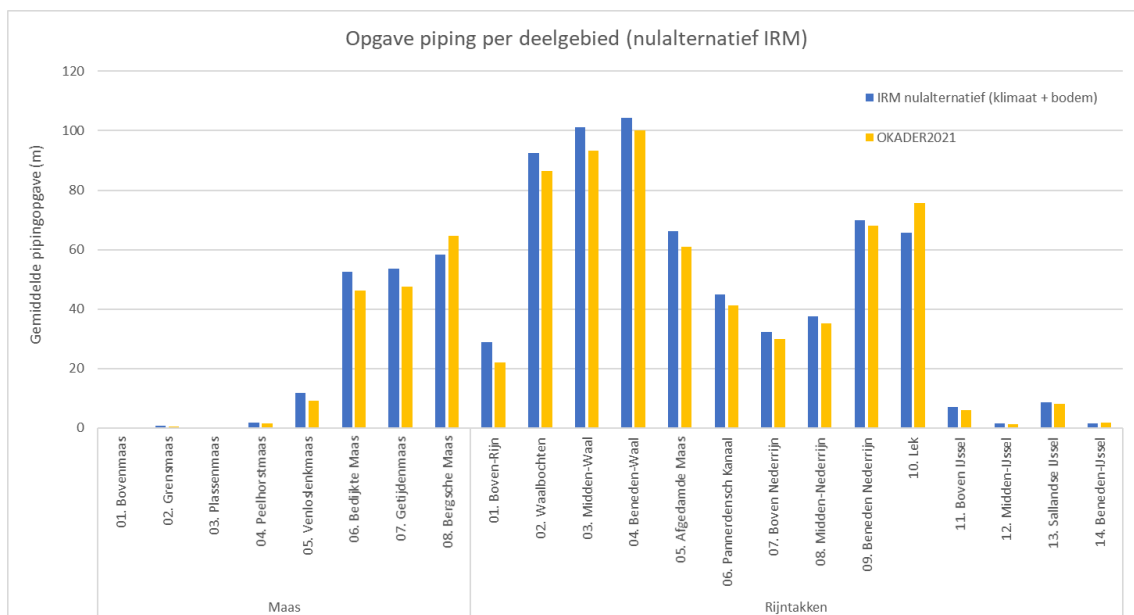
In de figuren Figuur F.2, Figuur F.3 en Figuur F.4 worden de huidige IRM modelresultaten vergeleken met de eerder uitgevoerde OKADER2021-som. De grootste verschillen in de versterkingsopgave zijn terug te vinden in de hoogteopgave en in mindere mate in de macrostabiliteit en pipingopgave. Dit komt door het feit dat de versterkingsopgaven voor macrostabiliteit en piping weinig gevoelig zijn voor kleine waterstandsverschillen.



Figuur F.2 Vergelijking resultaten hoogteopgave voor IRM nulalternatief en OKADER2021 simulatie.



Figuur F.3 Vergelijking resultaten macrostabiliteitsopgave voor IRM nulalternatief en OKADER2021 simulatie.



Figuur F.4 Vergelijking resultaten pipingopgave voor IRM nulalternatief en OKADER2021 simulatie.

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