

Effectbepaling IRM - Gevoeligheidsanalyse voor verandering in rivierbodempligging Rijntakken

Doorgaande erosie tot 2050, huidige bodempligging vasthouden of ophoging naar de ligging van rond het jaar 2000



Effectbepaling IRM - Gevoeligheidsanalyse voor verandering in rivierbodemplugging Rijntakken

Doorgaande erosie tot 2050, huidige bodemplugging vasthouden of ophoging naar de ligging van rond het jaar 2000

Auteur(s)

Nathalie Asselman

Bart Maas

Marjolein Mens

Peter de Grave

Remi van der Wijk

Eveline van der Deijl

Effectbepaling IRM - Gevoeligheidsanalyse voor verandering in rivierbodempligging Rijntakken

Doorgaande erosie tot 2050, huidige bodempligging vasthouden of ophoging naar de ligging van rond het jaar 2000

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	
Referenties	-
Trefwoorden	Integraal Rivier Management, IRM, hoogwaterveiligheid, natuur, zoetwaterbeschikbaarheid, bevaarbaarheid, rivierbodempligging

Documentgegevens

Versie	0.3
Datum	20-12-2022
Projectnummer	11208036-004
Document ID	11208036-004-ZWS-0005
Pagina's	81
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Nathalie Asselman	
	Bart Maas	
	Marjolein Mens	
	Peter de Grave	
	Remi van der Wijk	

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/ rivierbodempligging 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. Ofwel, de situatie die naar verwachting ontstaat als er géén Integraal Riviermanagement plaatsvindt. De effecten van het nulalternatief voor het zichtjaar 2050 op de belangrijkste functies van het rivierengebied (natuur, zoetwatervoorziening, bevaarbaarheid en hoogwaterveiligheid) zijn onderzocht door Asselman et al. (2022). In het rapport staat ook de huidige situatie (huidige rivierbodempligging) beschreven. Aanvullend is de vraag gesteld wat de effecten op de vier functies zijn indien de rivierbodem integraal wordt opgehoogd naar een situatie vergelijkbaar met het jaar 2000.

Dit rapport

Dit rapport beschrijft de effecten van een hogere rivierbodempligging in de Rijntakken op de vier hierboven genoemde functies¹. Bij de analyses is aangenomen dat de rivierbodem wordt terug gebracht naar de ligging van rond het jaar 2000. Om de resultaten te kunnen duiden is per functie een vergelijking gemaakt van de effecten bij doorgaande bodemerosie (nulalternatief IRM), bij het vasthouden van de huidige bodempligging (2018) en bij ophoging van de rivierbodem naar de ligging van rond het jaar 2000. De vergelijking wordt gemaakt voor zichtjaar 2050. Daarbij is uit gegaan van snelle klimaatverandering (scenario $W_{\text{Hdry}}/W+$) en sterke economische groei conform het Deltascenario Stoom. Het rapport vormt een aanvulling op het rapport over de effectbepaling van het nulalternatief van Asselman et al. (2022).

Verandering in rivierbodempligging

Bij het nulalternatief IRM is uitgegaan van de verwachte veranderingen in rivierbodempligging volgens Stoff (2019). Als gevolg van doorgaande erosie op de bovenloop van de Rijntakken is aangenomen dat de bodem op de Boven-Waal in 2050 ongeveer 0,5 m lager ligt dan nu. Op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel zijn de veranderingen iets kleiner: maximaal ongeveer 0,3 m respectievelijk 0,1 m lager dan nu.

Wanneer de rivierbodem wordt teruggebracht naar de ligging van rond het jaar 2000, dan moet de Boven-Waal met ongeveer 0,3 m worden opgehoogd. De ophoging op de Waal neemt geleidelijk af naar 0 m op de Beneden-Waal. Op het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel bedraagt de vereiste ophoging dan maximaal zo'n 0,2 m en 0,05 m. Op de overige riviertrajecten zijn de veranderingen kleiner dan 0,05 m.

Effecten van rivierbodemerosie op waterstanden

Voor een range aan afvoeren, variërend van 600 m³/s tot 24.000 m³/s te Lobith, is met het hydraulische D-HYDRO-model verkend hoe de waterstanden veranderen als gevolg van de veranderde ligging van het zomerbed. Ook is gekeken naar het effect op de afvoerverdeling bij laag- en bij hoogwater.

¹ Voor de Maas zijn geen aanvullende analyses uitgevoerd

Nulalternatief IRM (doorgaande rivierbodemerrosie)

Op de Rijntakken leidt de ongelijke rivierbodemerrosie in het splitsingspuntengebied bij lage afvoeren tot een verandering in de afvoerverdeling. De afvoer over de Waal neemt met ongeveer 25 m³/s 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 0,35 m lagere waterstanden, want hier is de waterstands daling door de bodemerrosie groter dan de stijging door de relatief grotere afvoer naar deze riviertak. 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 het jaar 2050 in een middenpositie te staan.

Huidige bodemligging handhaven

Wanneer de huidige bodemligging wordt gehandhaafd blijven de waterstanden en de afvoerverdeling bij laagwater gelijk aan de huidige situatie. Omdat in het jaar 2050 voor hoogwater wordt overgegaan naar een beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling behorend bij een afvoer van 17.000 m³/s te Lobith komt regelwerk Pannerden bijna helemaal dicht te staan; het regelwerk bij de Hondsbroeksche Pleij staat dan wel in een middenpositie. Het regelbereik is bij in het nulalternatief dus groter dan wanneer de huidige bodemligging wordt gehandhaafd. Dit geldt vooral voor regelwerk Pannerden.

2000-bodemligging

Het ophogen van de rivierbodem leidt eveneens tot een verschuiving van de afvoerverdeling bij laagwater, maar tegengesteld aan de verandering bij het nulalternatief: de afvoer op de Waal neemt bij lage afvoeren met ongeveer 15 m³/s af, ten gunste van de IJssel. De hogere bodemligging en de verschuiving in de afvoerverdeling leiden, bij lage afvoeren, tot ongeveer 0,15 m hogere waterstanden op de IJssel. Op de Boven-Waal wordt de waterstand ook ongeveer 0,15 m hoger. Dit komt door de hogere bodemligging. Verder benedenstrooms op de Waal (vanaf Tiel) dalen de waterstanden juist, omdat er minder water wordt afgevoerd over de Waal. Bij hogere afvoeren zijn de verschillen minder groot.

Wanneer de rivierbodem wordt opgehoogd naar de situatie rond het jaar 2000, dan is het met de huidige regelwerken niet mogelijk om de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling bij hoogwater te realiseren. Zelfs wanneer regelwerk Pannerden helemaal dicht wordt gezet, stroomt er nog steeds ongeveer 30 m³/s te veel water naar het Pannerdensch Kanaal.

Natuur

In de effectbepaling voor buitendijkse natuur is onderzocht welke veranderingen in *potentiële*² 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). Met het instrumentarium voor de BasisRivierbodemLigging (BRL) is verkend in hoeverre het meestromen van nevengeulen wordt beïnvloed.

² 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).

Nulalternatief IRM (doorgaande rivierbodemerrosie)

De berekende veranderingen in overstromingsduur zijn zeer klein. Want waar doorgaande erosie van het zomerbed in 2050 leidt tot een beperkte afname van de overstromingsduur, neemt door klimaatverandering de kans op hoogwater juist toe. Deze effecten heffen elkaar vrijwel op. Klimaatverandering heeft niet veel impact op veranderingen in de GVG. Doorgaande erosie van het zomerbed leidt wel tot lagere (voorjaars)grondwaterstanden langs de bovenloop van de vrij-afstromende Rijntakken. Doordat de uiterwaarden in deze gebieden nu ook al vrijwel uitsluitend geschikt zijn voor de drogere ecotooptypen, leidt dit niet tot significante veranderingen in de potentiële ecotoopverdeling.

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

Huidige bodemligging handhaven

Wanneer de huidige bodemligging wordt gehandhaafd, dan zal de overstromingsduur als gevolg van klimaatverandering iets toenemen. Deze toename is echter beperkt en heeft nauwelijks effect op de potentiële ecotoopverdeling. De voorjaarsgrondwaterstanden zullen ongeveer gelijk blijven aan die in de huidige situatie. Dit betekent dat veel uiterwaarden ook bij deze rivierbodemligging vooral geschikt zijn voor drogere ecotooptypen.

2000-bodemligging

Ophoging van de rivierbodem leidt tot een (beperkte) toename van de overstromingsduur. Dit leidt tot zeer kleine veranderingen in de potentiële ecotoopverdeling. In gebieden die nu een natuurfunctie hebben neemt met name het areaal aan iets frequenter overstromend hardhoutoibos iets toe.

Ophoging van de rivierbodem leidt ook tot hogere (voorjaars)grondwaterstanden (maximaal 0,15 m hoger dan bij de huidige rivierbodemligging, maximaal 0,4 m hoger dan bij het nulalternatief). Hierdoor neemt in de lagere delen van uiterwaarden (nabij nevengeulen en in gebieden die eerder zijn verlaagd) de potentie voor nattere ecotooptypen toe. Het gaat hierbij echter om zeer kleine arealen.

Herstel van de rivierbodemligging naar de situatie van rond het jaar 2000 leidt tot een iets betere doorstroming van nevengeulen op de Boven-Waal, Pannerdensch Kanaal en Boven-IJssel. De situatie wordt echter iets slechter dan nu, omdat de hogere rivierbodemligging onvoldoende is om het effect van klimaatverandering (W_{Hdry}) te compenseren.

De drie onderzochte alternatieven voor de rivierbodemligging in 2050 leiden tot zeer kleine verschuivingen in de potentiële ecotoopverdeling. De enige manier om aan de doelen van de PAGW te kunnen voldoen is door landbouwgebied een natuurbestemming te geven en de zomerkades door te steken of te verwijderen.

Zoetwaterbeschikbaarheid

Het effect van het nulalternatief IRM op een aantal belangrijke indicatoren voor de zoetwatervoorziening is berekend met het model QWAST. Omdat veranderingen in rivierbodemligging vooral effect hebben op watertekorten in Noord-Nederland (zie Asselman et al., 2022) is in dit rapport vooral het effect voor deze regio in beeld gebracht.

Nulalternatief IRM (doorgaande rivierbodemerrosie)

Bij het nulalternatief IRM zal als gevolg van klimaatverandering en verschuiving van de afvoerdeling door rivierbodemerrosie gemiddeld eens in de 8 à 9 jaar sprake zijn van een watertekort in Noord-Nederland dat gelijk is aan 10% van de watervraag. De grotere watertekorten treffen deels de beregende landbouw in Noord-Nederland.

In het Stoom-scenario neemt het landbouwisico bij de huidige bodemligging toe met 8,9 miljoen euro per jaar. Bij doorgaande rivierbodemerisatie (bodem2050) kan dit oplopen tot 10,4 miljoen euro per jaar. Ongeveer 18% hiervan is toe te schrijven aan de gevolgen van de rivierbodemerisatie op de afvoerdeling.

Het kritieke waterpeil voor watertoevoer naar de Twentekanalen wordt bij het nulalternatief eens in de 5 jaar, gedurende een periode van meer dan 50 dagen, onderschreden.

Huidige bodemligging handhaven

Bij de huidige rivierbodemligging en het huidige klimaat is gemiddeld eens in de 50 jaar sprake van een watertekort in Noord-Nederland van 10% van de watervraag. Echter, door klimaatverandering en veranderingen in watervraag, zal dit, ook wanneer de huidige bodemligging gehandhaafd wordt, toenemen tot eens in de 12 jaar. Het landbouwisico neemt (ten opzichte van de huidige situatie) toe tot 8,9 miljoen euro per jaar.

Het kritieke waterpeil voor watertoevoer naar de Twentekanalen wordt bij handhaving van de huidige rivierbodemligging eens in de 10 jaar, gedurende een periode van meer dan 50 dagen, onderschreden.

2000-bodemligging

Wanneer de rivierbodem wordt opgehoogd naar het niveau van het jaar 2000, dan zal eens in de 14 jaar niet worden voldaan aan 10% of meer van de watervraag. Het gemiddelde watertekort per jaar kan worden teruggebracht van 4,2% (bodem2050) naar 2,7% (bodem2000). Met betrekking tot de watertekorten in Noord-Nederland wordt geconcludeerd dat klimaatverandering en socio-economische ontwikkelingen het meeste effect hebben op de kans op een watertekort in Noord-Nederland. De kans op een watertekort van 10% van de watervraag is met de huidige bodemligging en het huidige klimaat 1:50 per jaar en bij scenario Stoom2050 neemt dat toe tot 1:14 jaar.

Bij ophoging van de bodem tot de ligging in het jaar 2000 blijft de toename van het landbouwisico beperkt tot 7,8 miljoen euro per jaar. Ophoging van de bodem resulteert dus in een afname van het landbouwisico met ongeveer 2,6 miljoen euro per jaar ten opzichte van het nulalternatief IRM. Handhaving van de huidige bodemligging zou het risico met 1,6 miljoen euro per jaar verminderen.

Bij een hogere rivierbodemligging, zoals die van het jaar 2000, zal minder vaak sprake zijn van langdurige overschrijding van het kritieke waterpeil voor watertoevoer naar de Twentekanalen. De kans op overschrijding van dit kritieke peil gedurende een periode van 50 dagen of meer neemt af naar eens in de 10 à 20 jaar (ten opzichte van eens in de 5 jaar bij het nulalternatief).

Bevaarbaarheid

Voor de bevaarbaarheid van de rivieren zijn de waterdieptes bij verschillende rivierafvoeren berekend en is gekeken in hoeverre deze voldoen aan de vanuit scheepvaart gewenste waterdieptes. De gewenste waterdieptes zijn overgenomen uit nationale en internationale vaarwegeisen. Voor de Boven-Rijn, de 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.

Nulalternatief (doorgaande rivierbodemerisatie)

Bij het nulalternatief wordt de vanuit de scheepvaart vereiste 2,8 m waterdiepte op de Waal gedurende 73 dagen overschreden. Ongeveer 40% van de lengte van de Boven-Waal voldoet niet aan de vereiste waterdiepte bij OLA. Het grootste knelpunt op de Waal verschuift van de alluviale ondiepte in de binnenbocht net benedenstreams 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-Rijn³. De bevaarbaarheid van deze beide trajecten neemt hierdoor sterk af.

Door het gecombineerde effect van klimaatverandering en rivierbodemerrosie neemt het aantal benodigde vaarbewegingen (om dezelfde hoeveelheid goederen te transporteren met dezelfde vlootsamenstelling) toe. Dit leidt tot een toename van de vaarkosten van 2,42 miljard euro bij de huidige bodemligging en het huidige klimaat tot 2,56 miljard euro bij het nulalternatief IRM. Hierbij is uitgegaan van een grotere benodigde kielspeling boven de vaste laag. Door sociaal-economische ontwikkelingen zullen de aantallen vaarbewegingen en de vaarkosten naar verwachting nog veel sterker toenemen.

Huidige bodemligging handhaven

Klimaatverandering (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 bij handhaving van de huidige bodemligging toch 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 met de huidige bodemligging en het huidige klimaat over zo'n 5% van de totale trajectlengte niet voldaan aan de minimaal vereiste waterdiepte; in klimaatscenario W_{Hdry} neemt dit in 2050 (bij handhaving van de huidige bodemligging) toe tot bijna 50%. De vaarkosten zouden in dat geval ongeveer 2,54 miljard euro bedragen.

2000-bodemligging

Bij de 2000-bodemligging stroomt bij lage rivierafvoeren juist minder water naar de Waal. Hierdoor neemt de vaardiepte op deze tak, in vergelijking met de huidige bodemligging, met ongeveer 15 cm af. Het percentage van de lengte van de Boven-Waal dat niet aan de vereiste waterdiepte voldoet neemt toe tot meer dan 60%. Dit leidt vraagt een groter aantal vaarbewegingen op de Waal. Op landelijk niveau nemen de vaarkosten toe tot 2,56 miljard euro. Dit is vergelijkbaar met de kosten in het nulalternatief, maar hoger dan wanneer de huidige bodemligging zou worden vast gehouden.

Waterveiligheid

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 aan de wettelijke beschermingsnorm te voldoen. Op grond van de berekende versterkingsopgave levert OKADER een schatting van de kosten van de versterking op basis van gegevens uit KOSWAT.

Nulalternatief IRM

Om in 2050 aan de wettelijke normen te voldoen zijn forse dijkverhogingen en dijkversterkingen nodig. De mate van benodigde dijkversterking (de 'opgave') wordt voornamelijk bepaald door de strengere normen en nieuwe inzichten in de faalmechanismen piping en macro-instabiliteit.

³ 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.

De noodzakelijke verbreding van de dijkbasis die nodig is om te voldoen aan de eisen voor macrostabiliteit, varieert van enkele meters 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 Midden-IJssel tot meer dan 100 m op de Beneden-Waal.

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 varieert van 0,05 m op de Midden-Nederrijn tot 0,6 m op de Midden- en Beneden-Waal.

De kosten voor benodigde dijkversterking tot het jaar 2050 worden geraamd op 4,84 miljard euro (exclusief de IJssel-Vechtdelta).

Huidige bodemligging handhaven

Veranderingen in rivierbodemligging 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).

Wanneer de huidige rivierbodemligging zou worden vastgehouden bedragen de dijkversterkingskosten 4,85 miljard euro.

2000-bodemligging

Door de rivierbodem over forse lengtes op te hogen naar de ligging van rond het jaar 2000 worden de hoogwaterstanden iets hoger. Dit resulteert in een toename van de versterkingsopgave om in 2050 aan de norm te voldoen. Deze toename is echter relatief klein. Zo neemt de hoogteopgave met maximaal ongeveer 5 cm toe. De versterkingskosten worden geraamd op 4,86 miljard euro, ongeveer 24 miljoen euro meer dan in het nulalternatief. In lijn met de conclusies uit Asselman et al. (2022) kan geconcludeerd worden dat de dijkversterkingsopgave grotendeels wordt bepaald door het op orde brengen voor de nieuwe normering in combinatie met klimaatverandering. De verandering in rivierbodemligging speelt slechts een heel kleine rol.

Overige effecten rivierbodemeris

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. Op dit moment is de afdeklaag boven een groot aantal kabels en leidingen al onvoldoende. Bij doorgaande erosie wordt die nog dunner. De kabels en leidingen waarover nu voldoende informatie voorhanden is komen echter niet bloot te liggen. Het aantal locaties waar zich problemen met de stabiliteit van oevers, kribben en/of kunstwerken zouden kunnen voordoen, kan bij doorgaande bodemeris beperkt toenemen.

Ophoging van de bodem leidt tot een iets dikkere afdeklaag boven kabels en leidingen. Het effect op het aantal locaties waar niet aan de vereiste dikte wordt voldaan is echter beperkt: bij ophoging van de rivierbodem is het oppervlak waarbij sprake is van onvoldoende afdeklaag boven kabels en leidingen vergelijkbaar met dat in de huidige situatie. De ophoging is onvoldoende om aan de gestelde eisen te voldoen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	12
1.1	Aanleiding	12
1.2	Doel	13
1.3	Leeswijzer	13
2	Doorgerekende IRM alternatieven	14
2.1	Inleiding	14
2.2	Alternatieve rivierbodempliggingen	14
2.2.1	Huidige situatie (2018)	14
2.2.2	Bodempligging 2050 - Nulalternatief IRM	14
2.2.3	Bodempligging 2000	16
2.3	Deltascenario's	18
3	Methode	20
3.1	Inleiding	20
3.2	Gebruikte modellen en instrumenten	20
3.3	BasisRivierbodemLigging (BRL)	22
3.4	Uitgevoerde berekeningen	23
4	Hydraulica	24
4.1	Inleiding	24
4.2	Methode	24
4.3	Resultaten	24
4.3.1	Afvoerverdeling bij hoogwater	24
4.3.2	Afvoerverdeling bij laagwater	25
4.3.3	Waterstanden	28
4.4	Conclusies	31
5	Natuur	32
5.1	Inleiding	32
5.2	Methode	32
5.3	Resultaten	33
5.3.1	Overstromingsduur	33
5.3.2	Veranderingen in potentiële ecotoopverdeling op basis van overstromingsduur	35
5.3.3	Veranderingen in potentiële ecotoopverdeling op basis van grondwaterstanden	36
5.3.4	Aanvullende bevindingen BRL	39
5.4	Conclusies	42

6	Zoetwaterbeschikbaarheid	43
6.1	Inleiding	43
6.2	Methode	43
6.3	Resultaten	46
6.3.1	Watertekorten Noord-Nederland	46
6.3.2	Toevoer Twentekanalen	47
6.3.3	Watertekorten en landbouwschade voor verschillende bodemliggingen	49
6.4	Conclusies	51
7	Effectbepaling bevaarbaarheid	53
7.1	Inleiding	53
7.2	Methode	53
7.3	Resultaten	53
7.3.1	Toestand watersysteem	53
7.3.1.1	Waterdiepte bij OLA	54
7.3.1.2	Beschikbaarheid vereiste waterdiepte	56
7.3.1.3	Bereikbaarheid havens, kades en sluisen	57
7.3.2	Impact scheepvaart	57
7.3.2.1	Afname vrachtpotentieel	57
7.3.2.2	Toename vaarkosten	59
7.3.3	Aanvullende bevindingen BRL	63
7.4	Conclusies	65
8	Waterveiligheid	66
8.1	Inleiding	66
8.2	Methode	66
8.3	Resultaten	66
8.3.1	Afvoerverdeling en Waterstanden	66
8.3.2	Versterkingsopgave	67
8.3.3	Kosten dijkversterking	70
8.4	Conclusies	71
9	Overige effecten van een verandering in rivierbodempligging	72
9.1	Inleiding	72
9.2	Voldoende dekking boven infrastructuur	72
9.3	Stabiliteit van oevers, kribben en kunstwerken	74
10	Conclusies	76
11	Referenties	80

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

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; duurzaam te beheren en voorbereid op de toekomst. De resultaten van deze samenwerking worden 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 (1) de rivierbodemplugging & sedimenthuishouding en (2) de afvoercapaciteit van het riviersysteem.

Een belangrijk onderdeel bij de totstandkoming van de POW vormt het 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 het continueren van het huidige (ongewijzigde) beleid en zogenaamde autonome ontwikkelingen.

Asselman et al. (2022) hebben de effecten van het nulalternatief IRM op de functies natuur, zoetwaterbeschikbaarheid, bevaarbaarheid en waterveiligheid bepaald. Om de effecten die werden berekend voor het nulalternatief IRM beter te kunnen duiden, is ook de huidige situatie in beeld gebracht. Met andere woorden: alle berekeningen zijn uitgevoerd voor zowel de huidige situatie (huidig klimaat en huidige rivierbodemplugging) als voor de in 2050 bij het nulalternatief IRM (situatie 2050 als gevolg van 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 rivierbodemerose danwel door klimaatverandering, zijn twee extra berekeningen uitgevoerd, waarbij alleen de rivierbodemplugging of alleen het klimaat is aangepast.

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 (scenario $W+W_{\text{dry}}$) met sterke economische groei. Het effect van het minder extreme Deltascenario Rust is door Asselman et al. (2022) bepaald op basis van deskundigenoordeel. Het scenario Rust combineert gematigde klimaatverandering (G/G_L) met een krimpende bevolking en bescheiden economische groei.

Om meer inzicht te krijgen in de effecten van een andere rivierbodemplugging op de functies natuur, zoetwaterbeschikbaarheid, bevaarbaarheid en waterveiligheid, is Deltares gevraagd om een alternatieve rivierbodemplugging door te rekenen voor de Rijntakken. Die bodemplugging is ongeveer de bodemplugging van het jaar 2000. Het zomerbed ligt bij die bodemplugging in de bovenloop van de Rijntakken enkele decimeters hoger dan in de huidige situatie. De berekeningen zijn uitgevoerd voor het Deltascenario Stoom. De effecten voor het scenario Rust zijn deels in beeld gebracht op basis van berekeningen, aangevuld met *expert judgement*. Er zijn geen aanvullende berekeningen uitgevoerd voor de Maas.

1.2 Doel

Het doel van dit rapport is tweeledig:

- 1 Het kwantificeren van de effecten van een hogere rivierbodemplugging op de Rijntakken (min of meer overeenkomend met de situatie uit het jaar 2000) op de functies natuur, zoetwaterbeschikbaarheid, bevaarbaarheid en waterveiligheid.
- 2 Het doen van een kwantitatieve vergelijking van de effecten op deze vier functies bij verschillende rivierbodempluggingen (gebaseerd op de gemeten danwel verwachte ligging in de jaren 2000 – 2018 – 2050) en klimaatscenario's (W_{Hdry} en G_L).

Resultaten van deze analyse kunnen gebruikt worden in de besluitvorming voor het VKA van de POW IRM.

1.3 Leeswijzer

Na deze inleiding volgt in hoofdstuk 2 een korte beschrijving van de doorgerekende alternatieven (rivierbodemplugging) en klimaatscenario's. Enige informatie over de gebruikte methode is te vinden in hoofdstuk 3. Voor een uitgebreidere beschrijving wordt verwezen naar Asselman et al. (2022) en De Jong et al. (2022). De effecten van de onderzochte rivierbodempluggingen 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 op de functies bevaarbaarheid en waterveiligheid. In hoofdstuk 9 wordt kort ingegaan op overige effecten van een verandering in rivierbodemplugging. De belangrijkste conclusies staan samengevat in hoofdstuk 10.

2 Doorgerekende IRM alternatieven

2.1 Inleiding

In het rapport over de effectbepaling van het nulalternatief IRM (Asselman et al., 2022) zijn voor twee rivierbodempliggingen de effecten doorgerekend voor natuur, zoetwaterbeschikbaarheid, bevaarbaarheid en waterveiligheid. De doorgerekende rivierbodempliggingen hebben betrekking op de huidige ligging (situatie 2018) en de verwachte toekomstige bodempligging in 2050. Voor de 2050-bodempligging in het nulalternatief is uitgegaan van doorgaande rivierbodemerrosie op de bovenloop van de Rijntakken (Boven-Waal, Pannerdensch Kanaal en Boven-IJssel) en grote delen van de Maas.

Omdat in IRM ook gekeken wordt naar mogelijkheden om het zomerbed op de bovenloop van de Rijntakken te verhogen, is in voorliggende studie eveneens gekeken naar een hogere rivierbodempligging op de Rijntakken, ongeveer overeenkomend met die in het jaar 2000.

Concreet betekent dit dat effecten zijn gekwantificeerd voor de rivierbodempligging behorend bij de jaren:

- 2050: verwachte toekomstige situatie voor Rijntakken en Maas, waarbij de bodem op veel plaatsen lager ligt dan nu. Te beschouwen als een soort 'ondergrens-bodem';
- 2018: huidige situatie, Rijntakken en Maas;
- 2000: hogere bodempligging bovenloop Rijntakken, geen analyses voor de Maas. Te beschouwen als een soort 'bovengrens-bodem'.

Bij de berekeningen voor het nulalternatief is uitgegaan van het Deltascenario Stoom, dat snelle klimaatverandering (scenario W+/W_{Hdry}) combineert met sterke economische groei. Dit scenario vormt ook de basis bij de effectbepaling voor de 2000-bodempligging.

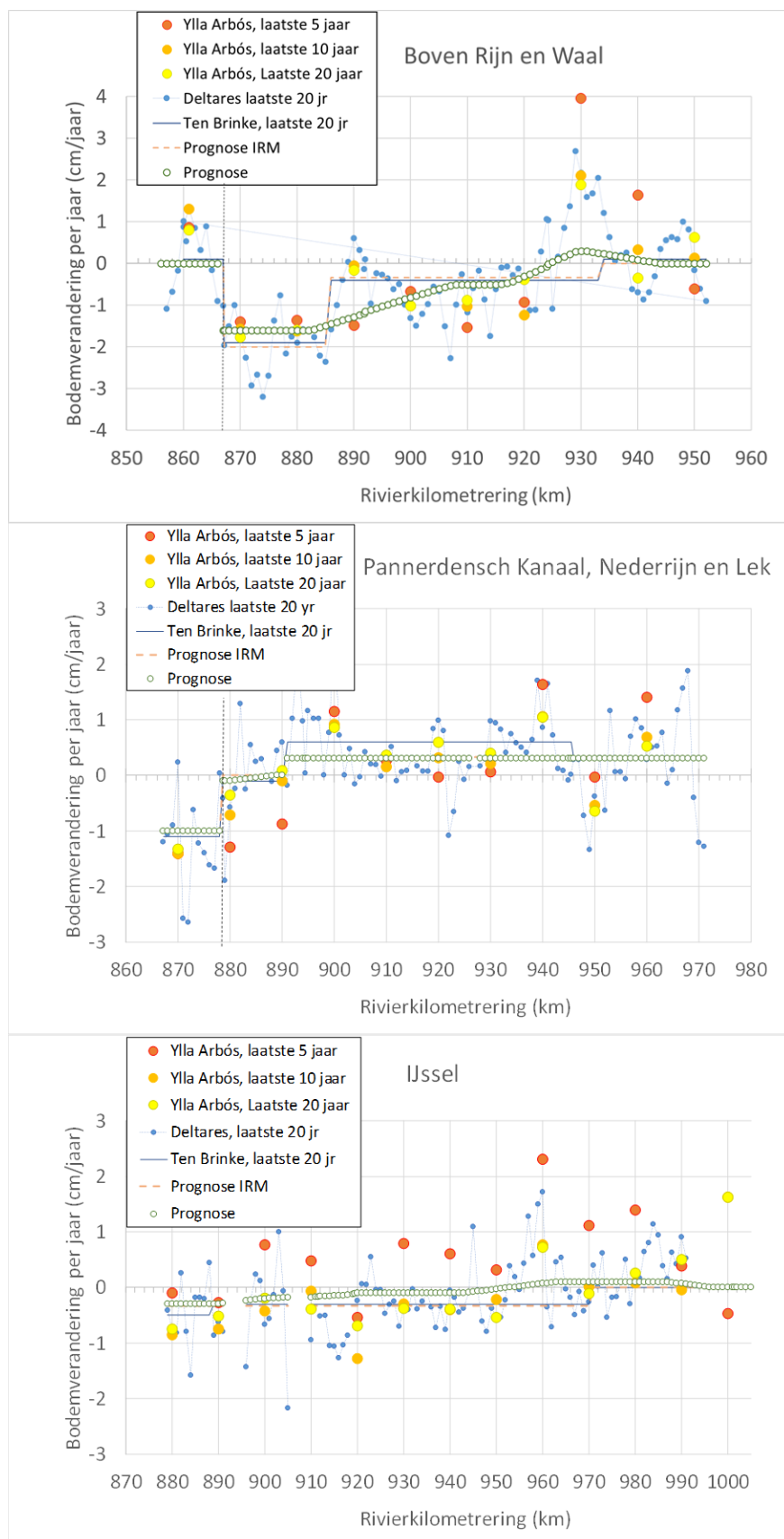
2.2 Alternatieve rivierbodempliggingen

2.2.1 Huidige situatie (2018)

Voor de huidige situatie is gebruik gemaakt van de rivierbodempligging in het jaar 2018, zoals die ook is gebruikt in de D-Hydro modellen voor de Rijntakken en de Maas die zijn ontwikkeld voor BOI. Voor meer informatie over deze modellen wordt verwezen naar Kusters (2022) en Van der Deijl et al. (2022). Een beknopte beschrijving is te vinden in Asselman et al. (2022).

2.2.2 Bodempligging 2050 - Nulalternatief IRM

Voor de bodempligging in 2050 is gebruik gemaakt van de erosietrends zoals afgeleid door Sloff (2019). De geprognoseerde veranderingen in rivierbodempligging tussen 2018 en 2050 zijn voor de Rijntakken te zien in Figuur 2.1. De schatting van Sloff (2019) 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). Sedimentatie op en delfstofwinning uit uiterwaarden is buiten beschouwing gelaten. Ofwel: de hoogteligging van de uiterwaarden is constant verondersteld.



Figuur 2.1 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 is dit vermenigvuldigd met 31 jaar (bron: Sloff, 2019).

2.2.3 Bodemligging 2000

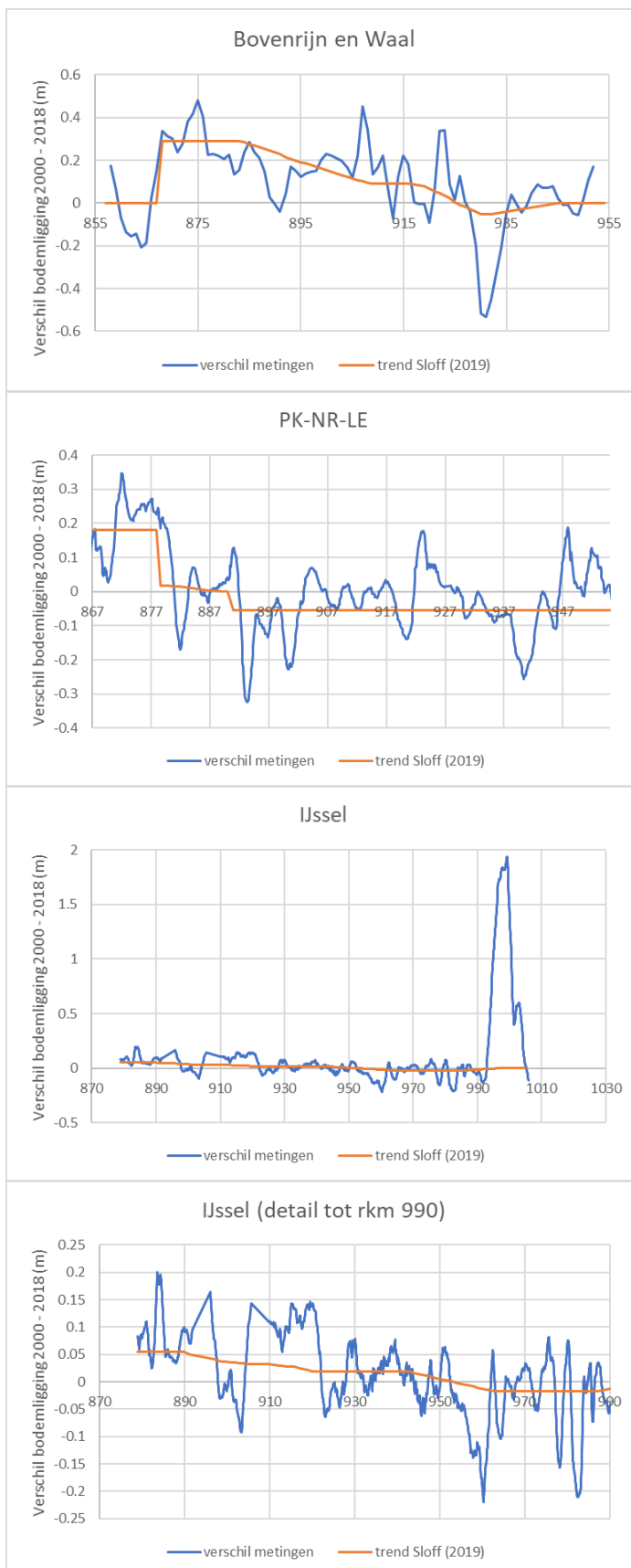
Voor het IRM-alternatief waarbij wordt uitgegaan van de bodemligging uit het jaar 2000 kan onderzoekstechnisch, voor het uitvoeren van de hydraulische berekeningen, gekozen worden uit de volgende opties:

1. Gebruik maken van de bodemligging zoals destijds verwerkt in Baseline. Deze optie heeft als voordeel dat de bodemligging exact overeenkomt met die uit het jaar 2000. Een nadeel is echter dat bewuste ingrepen uit het verleden (zoals zomerbedverdiepingen) ongedaan worden gemaakt en dat ook toevallig aanwezige aanzandingen of erosiekuilen worden hersteld.
2. De sedert 2000 gemeten veranderingen in bodemligging worden weer opgeteld bij/afgetrokken van de 2018 bodemligging. Dit levert vrijwel dezelfde bodemligging op als in optie 1, met dezelfde voor- en nadelen.
3. De trend zoals afgeleid door Sloff (2019) wordt gebruikt om de ligging rond het jaar 2000 af te leiden. Dit levert een bodemligging op die niet exact overeenkomt met de ligging in het jaar 2000, maar die wel geïnspireerd is op de ligging uit dat jaar. Het voordeel van deze optie is dat de manier waarop de ondergrensbodem (2050) en de bovengrensbodem (2000) zijn bepaald, vergelijkbaar is. In beide gevallen wordt gekeken naar gemiddelde veranderingen over langere riviertrajecten en worden kleinschalige veranderingen uitgesmeerd.

De laatste optie levert mogelijk een realistischer beeld op als wordt gekeken naar de mogelijke maatregelen om de rivierbodem op te hogen (grootschalige suppleties, langsdammen, etc.). Optie 1 of 2 zouden kunnen leiden tot een grote ruimtelijke variatie in suppletiehoeveelheden. Op de Nederrijn-Lek zou in dat geval zelfs sprake zijn van een afwisseling van suppleties en verdiepingen.

Besloten is om de bodemligging die representatief is voor het jaar 2000 af te leiden op basis van de trends volgens Sloff (2019). Die trends zijn weergegeven in Figuur 2.2. Voor de IJssel zijn twee figuren gemaakt, omdat de enorme verandering door van de zomerbedverdieping bij Kampen de figuur lastig leesbaar maakt (overige veranderingen in rivierbodempligging vallen hierbij in het niet).

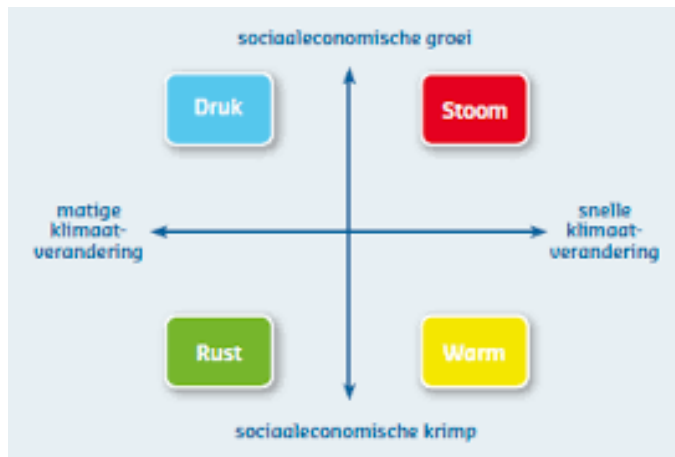
De grootste aanpassing aan de rivierbodempligging betreft de Boven-Waal. Hier wordt de bodem 0,3 m opgehoogd. Op het Pannerdensch Kanaal bedraagt de noodzakelijke ophoging 0,18 m. Op de bovenloop van de IJssel wordt de bodem met 0,05 m verhoogd. Aangenomen is dat de zomerbedverdieping op de benedenloop van de IJssel niet wordt opgevuld. Bovenstrooms van stuwpaand Driel op de Nederrijn-Lek wordt de bodemhoogte vrijwel gelijk gehouden. Benedenstrooms op de Nederrijn-Lek wordt de bodem met ongeveer 0,05 m verlaagd.



Figuur 2.2 Opgelegde aanpassing van de rivierbodempligging voor het jaar 2000 (ten opzichte van de situatie in het jaar 2018). De veranderingen zoals bepaald met behulp van metingen zijn geplot ter vergelijking. Een positieve waarde betekent dat de bodem in 2000 hoger ligt dan in 2018.

2.3 Deltascenario's

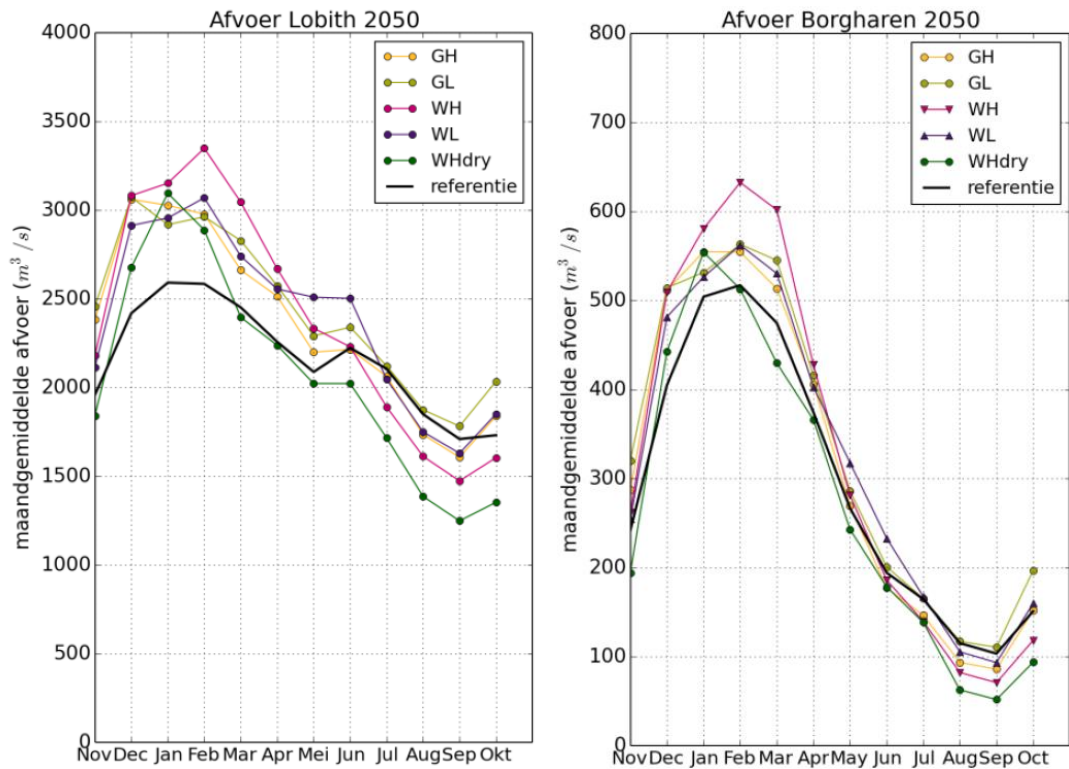
Het Deltaprogramma werkt met vier scenario's: Druk, Stoom, Rust en Warm (zie Figuur 2.3). Het scenario Stoom is het meest extreme scenario. Het gaat uit van snelle klimaatverandering en sterke economische groei. Het scenario Rust is het meest gematigde scenario. Dit scenario combineert langzame klimaatverandering met een bescheiden economische groei en een afname van het aantal inwoners.



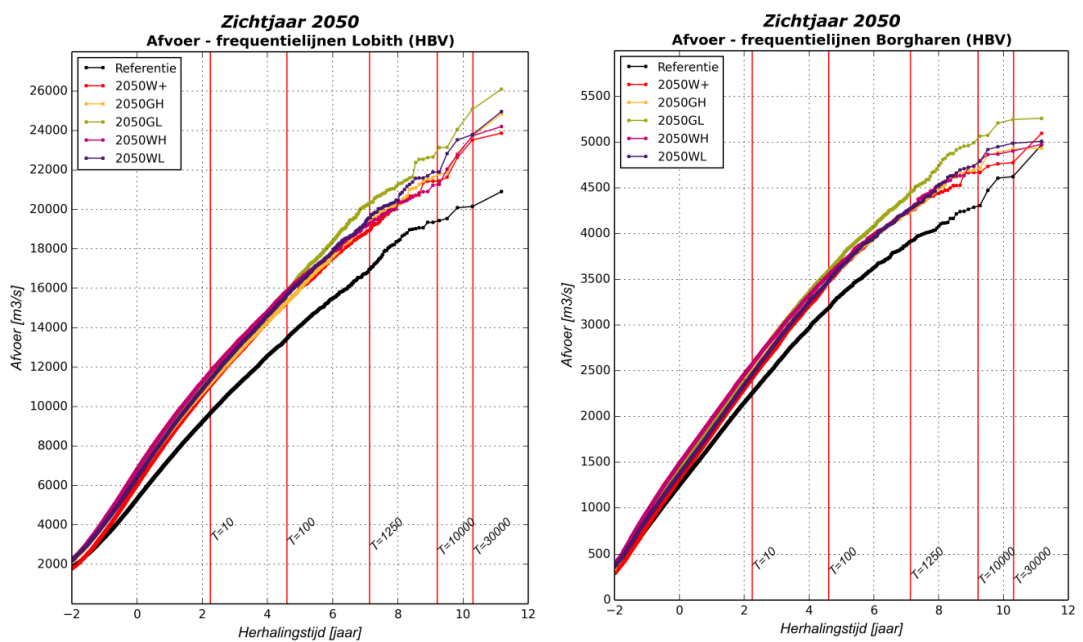
Figuur 2.3 Assenkruis; schematische weergave van de Deltascenario's

De effecten van de verschillende klimaatscenario's op de gemiddelde rivierafvoer per maand is te zien in Figuur 2.4. Het volgende valt op:

- De gemiddelde afvoer in de winter wordt hoger, maar de kans op zeer hoge afvoeren is bij W_{dry} iets kleiner dan bij het gematigde klimaatscenario G_L , zie ook Figuur 2.5 (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).
- De voorjaarsafvoer (en daarmee de voorjaarswaterstanden) veranderen bij het scenario W_{dry} 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_{dry} scenario sterk af. Bij het G_L -scenario is geen afname, of zelfs een zeer beperkte toename, te zien.



Figuur 2.4 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 2.5 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)

Bij het bepalen van de effecten van het nulalternatief IRM en bij die van een bodemligging 2000 – beide in 2050 – wordt uitgegaan van het Deltascenario Stoom (klimaatscenario W_{Hdry}).

3 Methode

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). Bij deze methode wordt vooral gebruik gemaakt 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).

De BRL is gebruikt om, waar mogelijk, aanvullende effecten in beeld te brengen. In het kader van de BRL is voor een aantal rivierfuncties in beeld gebracht welke eisen deze aan de rivierbodempligging stellen. Deze eisen vormen de kern van een instrument dat gebruikt wordt om te bepalen of de bodempligging voldoet aan de gestelde eisen of dat op een of meer locaties sprake is van een functiespecifieke over- of onderschrijding. Met het signaleringsinstrument dat ontwikkeld is voor de BRL wordt op kaartbeelden en in statistieken weergegeven in hoeverre de onderzochte bodempligging aan de gestelde eisen voldoet.

3.2 Gebruikte modellen en instrumenten

De methode zoals voorgesteld door Asselman (2021) maakt gebruik van de modellen en instrumenten zoals te zien in het overzicht in Figuur 3.1. Hieronder volgt een korte beschrijving.

Waterstanden en afvoerverdeling

De effectbepaling start met het in beeld brengen van de effecten van veranderingen in inrichting van de rivier, rivierbodempligging en klimaat op de afvoerverdeling en de waterstanden. 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). Voor het nulalternatief IRM is in de schematisatie van deze modellen een aantal aanpassingen doorgevoerd. Voor de Rijntakken is de rivierverruimingsmaatregel rivierklimaatpark IJsselpoort toegevoegd. Voor een aantal berekeningen is ook de rivierbodempligging aangepast, zodat deze overeenkomt met de verwachte ligging in 2050, danwel in 2000 (zie ook Figuur 2.1 en Figuur 2.2). Met de hydraulische modellen is een reeks aan rivierafvoeren doorgerekend. De uitkomsten van de D-HYDRO-modellen (waterstanden en 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 rivierafvoeren te Lobith (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 van regelbereik naar twee kanten.

Bevaarbaarheid

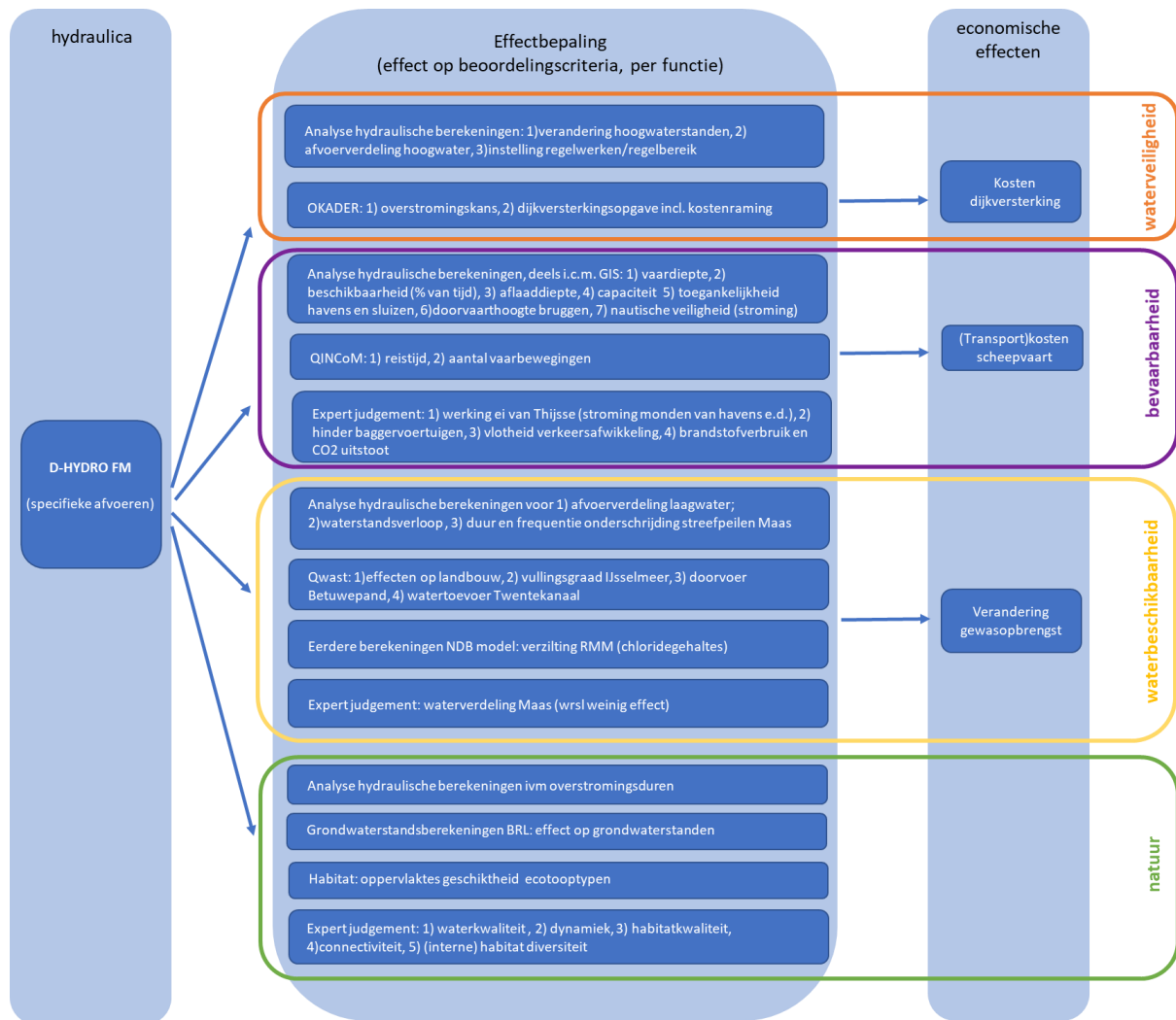
Na een nabewerking in GIS zijn de berekende waterstanden gebruikt om waterdieptes te berekenen. Dit vormde de belangrijkste invoer voor de effectbepaling bevaarbaarheid. Voor alle riviertakken is gekeken waar en hoe vaak niet aan de vereiste waterdiepte kan worden voldaan. Met behulp van QINCoM is gekeken 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 een beeld te krijgen van veranderingen in gewasopbrengst en landbouwschade. De met D-Hydro berekende 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 Twentekanalen.

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. Door de uitkomsten hiervan te vergelijken met de doelen van de PAGW wordt een beeld verkregen van de haalbaarheid van deze doelen, bij de verschillende mogelijke rivierbodempliggingen. 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 ecotootypen zijn overgenomen uit Van den Berg (2021).



Figuur 3.1 Overzicht van gebruikte modellen en tools

3.3 BasisRivierbodempligging (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 opbouw van de BRL-bodem en de wijze waarop de BRL is toegepast binnen de effectbepaling nulalternatief IRM voor het zichtjaar 2050. Voor de bodempligging 2000 is dezelfde aanpak gebruikt waarbij de bodem van 2000 is opgebouwd op basis van het verschil in de modelbodempliggingen en waarbij de eisen bovendien zijn aangepast op basis van het verschil in de laagwaterstand.

Voor de effectbepaling IRM is de BRL gebruikt om voor alle functies de effecten te bepalen. Bij de aanvullende analyses voor de bodemligging uit het jaar 2000 is voor een beperkt aantal functies gecontroleerd of bij de bodemliggingen uit het jaar 2000, huidig (2021) en 2050 sprake zou kunnen zijn van knelpunten (voor de andere functies leverde de analyses van de BRL geen aanvullende inzichten op):

- **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 feitelijk of de geul 345 dagen per jaar meestroomt in plaats van de vereiste 335 dagen per jaar; een benadering.
- **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 bodemligging 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 ersosielimietlijnen mogen niet worden overschreden;
 - **Dekking infrastructuur:** om schade aan kabels, leidingen en tunnels te voorkomen wordt gecontroleerd of de afdeklaag voldoende dik is.

3.4 Uitgevoerde berekeningen

Voor het onderhavige rapport zijn alleen nog nieuwe effectberekeningen gedaan voor de rivierbodemligging die min of meer overeenkomt met de ligging in het jaar 2000, maar met het klimaat van 2050. De situatie voor de huidige rivierbodemligging (2018) en de effecten van de verwachte ligging in 2050 bij het nulalternatief IRM zijn overgenomen uit Asselman et al. (2022).

De berekeningen zijn uitsluitend uitgevoerd voor de Rijntakken. Voor de Maas zijn geen alternatieve rivierbodemliggingen verkend.

Dit rapport behelst geen morfologische effectbepaling, omdat de rivierbodemligging hard is opgelegd in het hydraulische model. Wanneer bekend is hoe de rivierbodemligging zal worden beïnvloed/ verhoogd, kunnen morfologische berekeningen worden uitgevoerd om de morfologische effecten van de voorgestelde maatregelen (suppletie, langsdammen, etc.) nader te analyseren. Dit maakt echter geen deel uit van voorliggend onderzoek.

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 een verandering in rivierbodempligging.

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van de hydraulische modelberekeningen voor een bodempligging die gebaseerd is op de ligging in het jaar 2000 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

Omdat de nieuwe hydraulische berekeningen een aanvulling zijn op Asselman et al. (2022) zijn de daarin gebruikte uitgangspunten ook hier gebruikt. Deze uitgangspunten staan beschreven in hoofdstuk 4 en bijlage C.1 in het rapport van Asselman et al. (2022).

De volgende stappen zijn doorlopen:

- Allereerst is het zomerbed in het D-HYDRO model aangepast, zodat de hoogteligging overeenkomt met de ligging rond het jaar 2000 (zie hoofdstuk 2).
- Vervolgens zijn de regelwerken bij de splitsingspunten afgeregeld op de beleidsmatig vastgestelde verdeling behorend bij een afvoer van 17.000 m³/s te Lobith, waarbij de Nederrijn-Lek wordt ontzien.
- Modelsimulaties zijn uitgevoerd voor 16 afvoerniveaus, variërend van 600 m³/s tot 24.000 m³/s te Lobith.
- Voor de analyse van de resultaten is gekeken naar veranderingen in de afvoerverdeling, en waterstanden per rivierkilometer.

4.3 Resultaten

4.3.1 Afvoerverdeling bij hoogwater

Om tot een gewenste afvoerverdeling te komen dienen de regelwerken Pannerden en Hondsbroeksche Pleij (HP) opnieuw afgeregeld te worden voor de bodempligging uit het jaar 2000. Hierbij wordt, net zoals in het rapport van Asselman et al. (2022), uitgegaan van de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling (BVA) behorend bij een afvoer van 17.000 m³/s te Lobith, waarbij de Lek wordt ontzien. De resultaten van de hoogte van de regelwerken en afvoerverdeling staan in Tabel 4.1 tot en met Tabel 4.3.

Wanneer IRM besluit om de huidige bodempligging vast te houden (bodem 2018), dan zal regelwerk Pannerden ver dicht staan (maximale hoogte NAP +17 m, hoogte in het model NAP +16,7 m). Wanneer de erosie niet wordt gestopt (bodem 2050), dan komt regelwerk Pannerden meer in een middenpositie te staan, met regelbereik naar twee kanten. Wanneer wordt besloten om de bodem op te hogen zoals is aangenomen bij de 2000-bodem, dan komt regelwerk Pannerden helemaal dicht te staan. Er stroomt dan echter nog steeds te veel water naar het Pannerdensch Kanaal. Zoals te zien is in Tabel 4.3, stroomt er bij een afvoer van 17.000 m³/s te Lobith ongeveer 30 m³/s teveel naar het Pannerdensch Kanaal.

Om de BVA te kunnen realiseren zouden de regelwerken moeten worden aangepast, of zou de Boven-Waal moeten worden verruimd. Wanneer enkel de rivierbodembodem wordt opgehoogd naar de situatie rond het jaar 2000, dan is het met de huidige regelwerken niet mogelijk om de BVA te realiseren.

Tabel 4.1 Hoogte (m +NAP) van de regelwerken in het D-Hydromodel bij verschillende rivierbodempliggingen. Het IRM-model is afgeregeld op de BVA bij 17.000 m³/s.

Naam regelwerk	Regelbereik	IRM bodem 2050	IRM bodem 2018	IRM bodem 2000
Pannerden	12,00 – 17,00	15,82	16,71	17,00
Hondsbroeksche Pleij	11,00 – 15,20	13,70	13,61	13,18

Tabel 4.2 Afvoer per riviertak (m³/s) bij verschillende rivierbodempliggingen

Rijntakken	BVA 17.000 "Lek ontzien"	IRM bodem 2050	IRM bodem 2018	IRM bodem 2000
Bovenrijn	17.000	17.000	17.000	17.000
Waal	10.970	10.970	10.970	10.938
Pannerdensch Kanaal	6.030	6.030	6.030	6.062
Neder-Rijn	3.376	3.376	3.376	3.376
IJssel	2.654	2.654	2.654	2.686

Tabel 4.3 Verschil tussen de gemiddelde afvoer per riviertak en de volgens de Beleidsmatig Vastgestelde Afvoerverdeling gewenste afvoer (in m³/s)

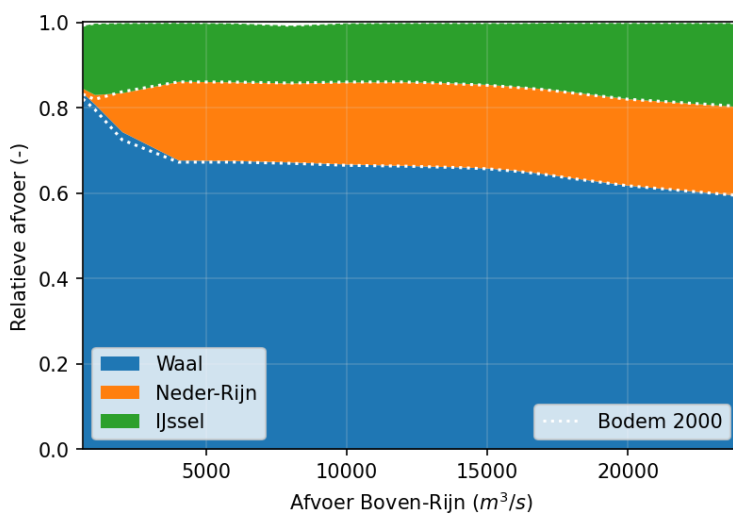
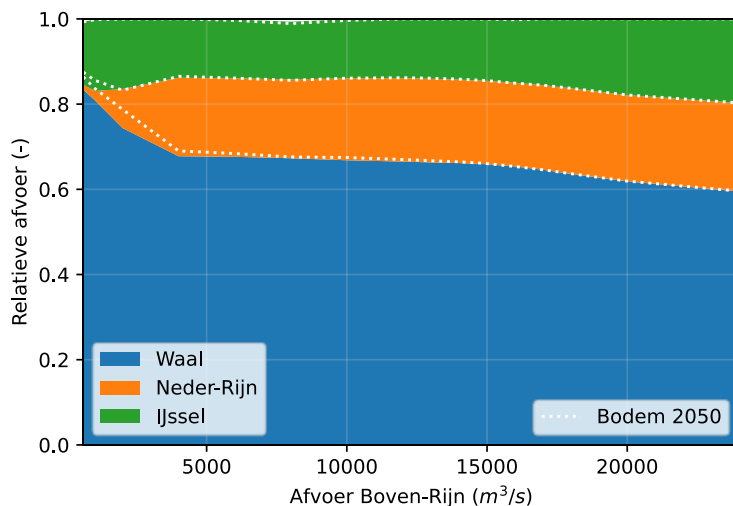
Rijntakken	IRM bodem 2000
Bovenrijn	0
Waal	-32
Pannerdensch Kanaal	+32
Neder-Rijn	0
IJssel	+32

4.3.2 Afvoerverdeling bij laagwater

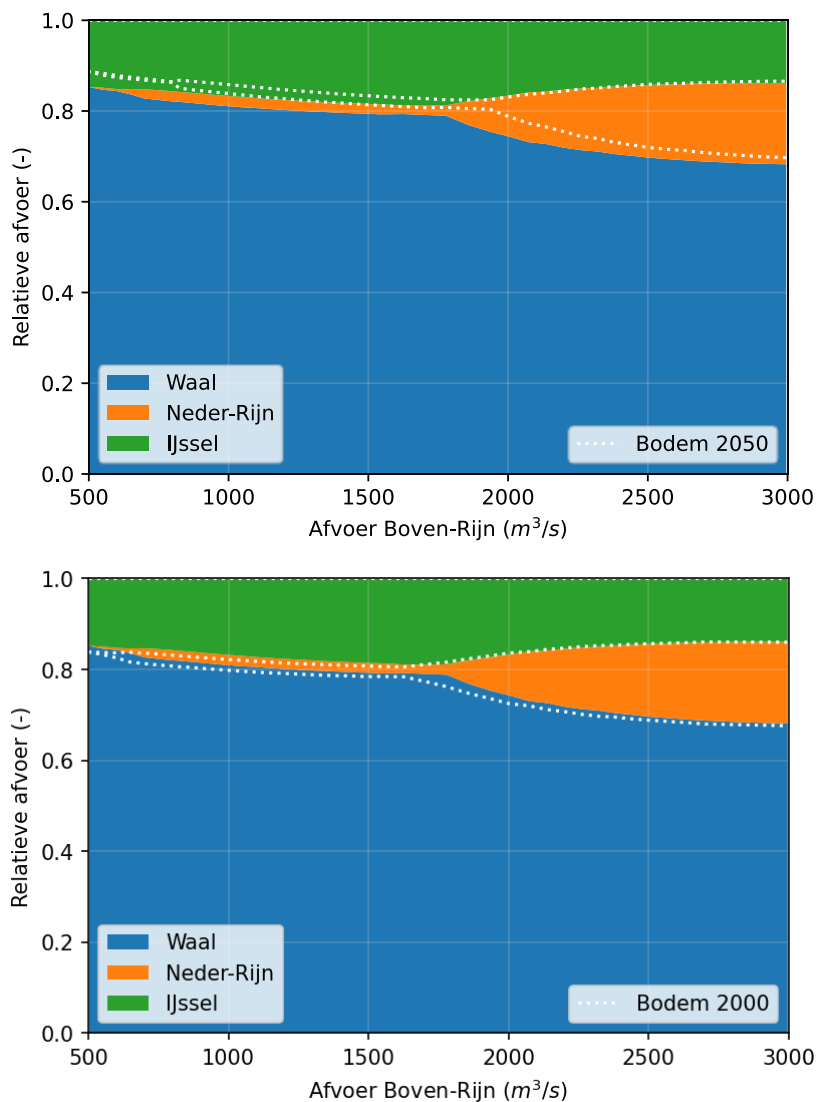
Een verandering in rivierbodempligging heeft ook effect op de afvoerverdeling bij laagwater. De verandering in de afvoerverdeling bij de 2000-bodem ten opzichte van de huidige bodempligging (2018) is (voor het hele afvoerbereik) te zien in Figuur 4.1. Voor de lage rivierafvoeren zijn de verschillen te zien in Figuur 4.2.

Het volgende valt op:

- De verandering in afvoerverdeling is het grootst bij lage tot middelhoge afvoeren (tot 5.000 m³/s).
- Bij doorgaande bodemerosie neemt de afvoer naar de Waal toe ten koste van de afvoer naar de het Pannerdensch Kanaal. Bij de bodempligging die in het nulalternatief IRM wordt verwacht in 2050 bedraagt deze verschuiving bij zeer lage afvoeren (~1000 m³/s) ongeveer 25 m³/s ten opzichte van de huidige verdeling.
- Wanneer de bodem wordt opgehoogd tot ongeveer de ligging rond het jaar 2000, dan neemt de afvoer naar het Pannerdensch Kanaal toe. Dit gaat ten koste van de afvoer naar de Waal. Bij de 2000-bodem bedraagt de verschuiving bij zeer lage afvoeren ongeveer 15 m³/s ten opzichte van de huidige verdeling.



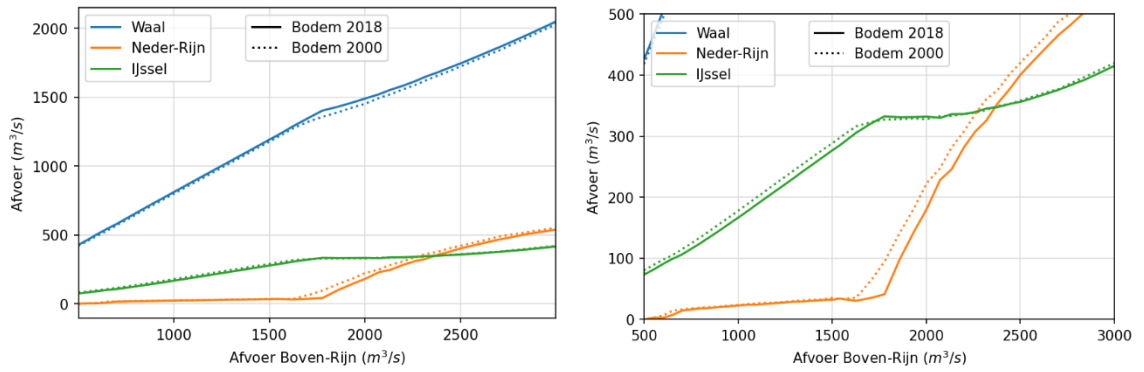
Figuur 4.1 Relatieve afvoerverdeling op de totale afvoer bij Lobith. De afvoerverdeling bij de huidige bodem is weergegeven in gekleurde vlakken. De verschuiving als gevolg van doorgaande bodemerosie (2050 bodem, boven) of als gevolg van het ophogen van de bodem (2000 bodem, onder) is weergegeven met witte stippellijnen.



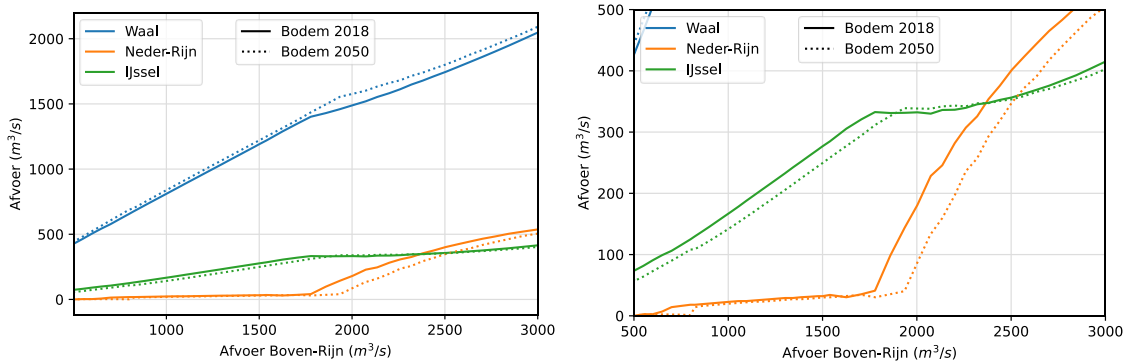
Figuur 4.2 Relatieve afvoerverdeling voor het lage afvoerbereik. De verdeling bij de huidige bodem is weergegeven in gekleurde vlakken. De verschuiving als gevolg van doorgaande bodemerosie (2050 bodem, boven) of als gevolg van het ophogen van de bodem (2000 bodem, onder) is weergegeven met witte stippellijnen.

De verdeling op de IJsselkop verandert binnen het bereik van de lage afvoeren. Dit wordt veroorzaakt door het sluitprotocol van stuw Driel. Het punt waarop stuw Driel deels geopend wordt, verschuift bij de hogere rivierbodempligging uit het jaar 2000 van 1.800 m³/s naar 1.650 m³/s. Ofwel: door de hogere rivierbodempligging zullen de stuwen op de Nederrijn in het huidige stuwprogramma eerder (bij lagere rivierafvoeren) openen (de stuwen zijn dus minder lang gesloten). Hierdoor zal er tussen de afvoeren 1.650 m³/s en 2.500 m³/s iets meer water door de Nederrijn stromen wat zorgt voor een lichte afname van afvoer door de Waal en IJssel (Figuur 4.3).

Bij doorgaande bodemerosie (bodem 2050) is juist het omgekeerde effect zichtbaar. Door de lagere rivierbodempligging wordt stuw Driel pas bij steeds hogere rivierafvoeren geopend, c.q. staat deze langer dicht (zie Figuur 4.4).



Figuur 4.3 Afvoer per riviertak bij verschillende afvoeren te Lobith bij de huidige bodemligging (2018) en bij een hogere bodemligging (die van 2000). 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).



Figuur 4.4 Afvoer per riviertak bij verschillende afvoeren te Lobith bij de huidige bodemligging (2018) en bij doorgaande rivierbodemerisatie (2050). 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).

4.3.3 Waterstanden

De waterstanden in de Rijntakken zijn voor 16 verschillende afvoeren doorgerekend, dat wil zeggen: nog zonder enig klimaateffect. Dit is gedaan voor de huidige bodemligging (2018), voor een hogere bodemligging (die van 2000) en voor een lagere bodemligging (nulalternatief IRM 2050). De verschillen in berekende waterstanden tussen de huidige bodemligging en de hogere ligging gebaseerd op het jaar 2000 zijn te zien in Figuur 4.7 en in meer detail in Figuur 4.8. De verschillen in waterstanden bij de huidige bodemligging en de verwachte bodemligging in 2050 zijn te zien in Figuur 4.5 en Figuur 4.6.

Ophoging van de bodem (2000) leidt tot hogere waterstanden. Uitzondering hierop is het gedeelte van de Nederrijn-Lek tussen stuwcomplex Driel en Hagestein. Hier ligt de bodem in de 2000-situatie 5 cm lager dan in de 2018-situatie, wat leidt tot iets lagere waterstanden. De lagere bodemligging (2050) leidt tot lagere waterstanden.

Over het algemeen volgen de waterstanden de verandering van het bodemprofiel. Het grootste effect van de verandering van het bodemprofiel is terug te zien bij de lagere rivierafvoeren ($\leq 6.000 \text{ m}^3/\text{s}$). De algemeen zichtbare trend is: hoe groter de afvoer, hoe kleiner het effect van een andere bodemligging op de waterstand.

Hieronder beschrijven we de belangrijkste verschillen per riviertak.

Boven-Rijn – Waal

2050-bodem vergeleken met huidige bodemligging

Doorgaande rivierbodemerrosie (bodem 2050) leidt op het bovenstroomse deel van de Waal tot 0,4 m hogere waterstanden (Figuur 4.6). In het benedenstroomse deel van de Waal worden de waterstanden juist iets hoger. Dit komt door de verandering in bodemligging, maar ook doordat de Waal in dit geval meer afvoer gaat trekken.

2000-bodem vergeleken met huidige bodemligging

Op de Boven-Rijn en een groot deel van de Waal (tot sluis Sint Andries, rkm WL_925) is bij de 2000-bodem sprake van een hogere rivierbodemligging (maximaal 0,3 m hoger dan in 2018, zie Figuur 4.8). Dit leidt in het bovenstroomse deel van de Waal tot hogere waterstanden (maximaal bijna 0,2 m hoger bij lage afvoeren).

Vanaf rkm WL_904 is echter sprake van een lagere waterstand. Bij lage afvoeren is de daling beperkt tot een aantal centimeters. De daling wordt veroorzaakt door een lokaal iets lagere bodemligging in combinatie met een verschuiving van de afvoerverdeling (minder water naar de Waal). De grootste waterstands daling in de benedenstroomse trajecten treedt op bij een afvoer van 2.000 m³/s te Lobith en bedraagt maximaal -0,1 m. Deze afname wordt veroorzaakt door het openen van stuw Driel waardoor de afvoer over de Nederrijn toeneemt; ten koste van de afvoer over de Waal.

Pannerdensch Kanaal en Nederrijn-Lek

2050-bodem vergeleken met huidige bodemligging

Bij de 2050-bodemligging worden de waterstanden op het Pannerdensch Kanaal meer dan 0,3 m lager (Figuur 4.6). Dit komt doordat de bodem lager ligt, maar ook door de verschuiving in de afvoerverdeling (er stroomt minder water naar het Pannerdensch Kanaal en meer naar de Waal). Bij de 2050-bodem worden de waterstanden op de Nederrijn-Lek bij bijna alle afvoeren lager. Ook dit komt vooral door een verschuiving in de afvoerverdeling.

2000-bodem vergeleken met huidige bodemligging

Ophoging van de rivierbodem (2000-bodem) leidt tot maximaal bijna 0,2 m hogere waterstanden op het Pannerdensch Kanaal (Figuur 4.8). Dit komt doordat de bodem is opgehoogd en doordat er meer water naar het Pannerdensch Kanaal stroomt.

De 2000-bodem leidt tussen stuwcomplex Driel en Hagestein tot een 0,05 m lagere bodemligging. Bij veel afvoeren is echter een hogere waterstand te zien. Dit komt door veranderingen in de afvoerverdeling (er stroomt meer water naar de Nederrijn-Lek).

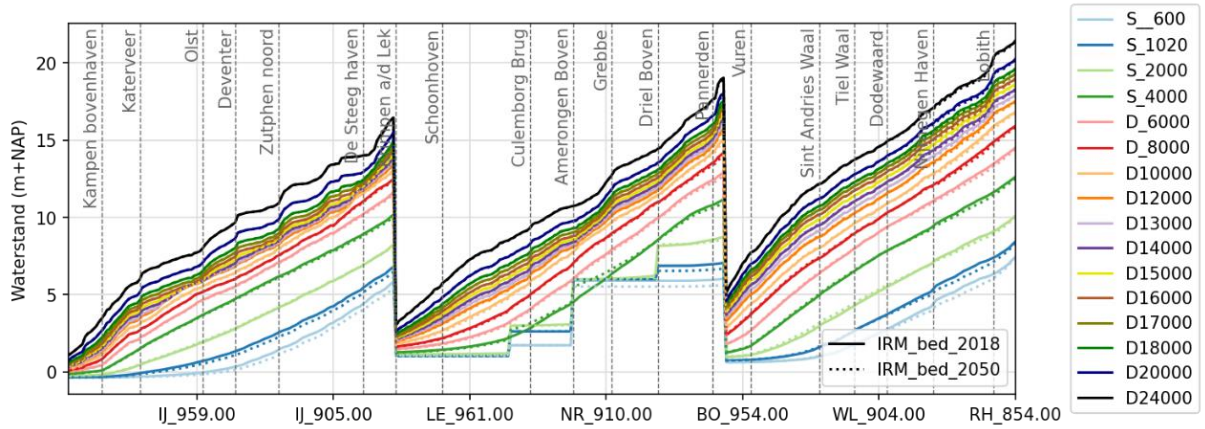
IJssel

2050-bodem vergeleken met huidige bodemligging

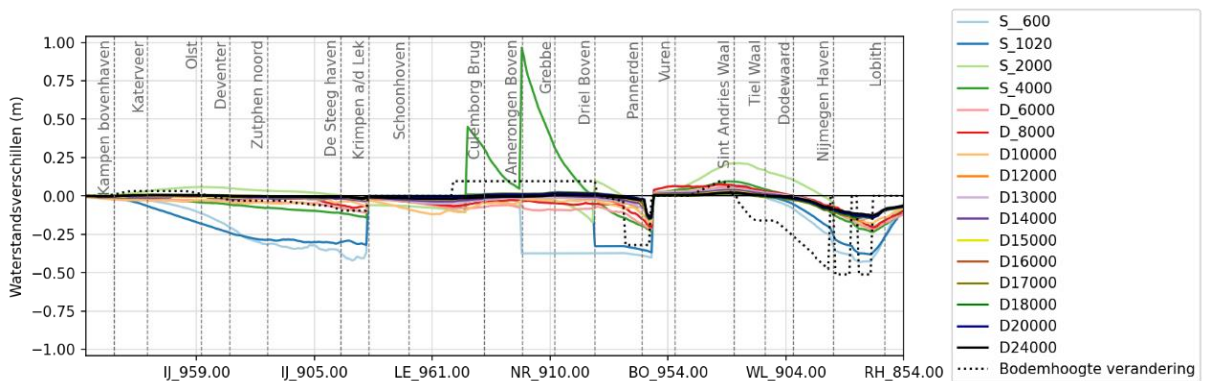
Bij de 2050-bodem leiden doorgaande erosie en een verschuiving van de afvoerverdeling (minder water naar de IJssel) tot maximaal ongeveer 0,3 m lagere waterstanden.

2000-bodem vergeleken met huidige bodemligging

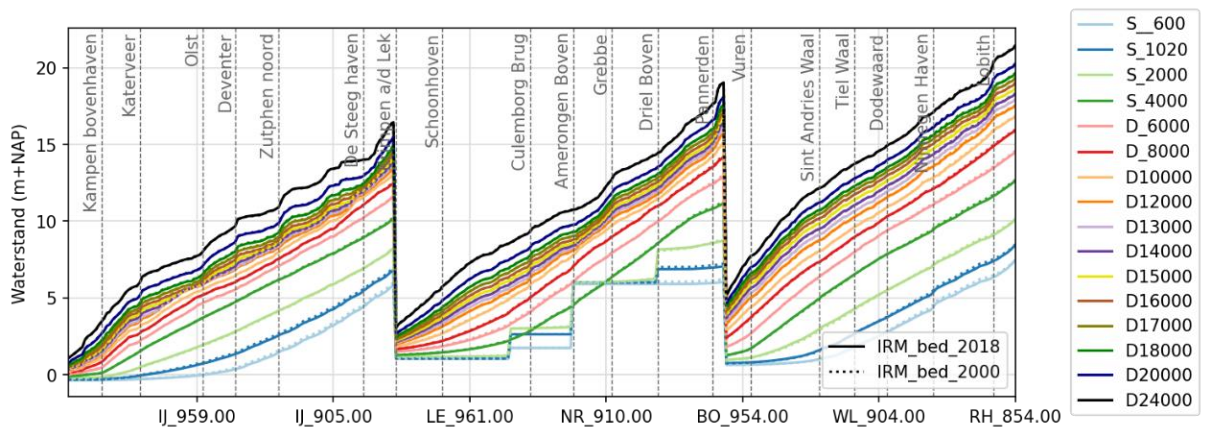
Hoewel de ophoging van de rivierbodem op de IJssel beperkt is (maximaal ongeveer 0,05 m), is bij zeer lage afvoeren (≤ 1020 m³/s te Lobith) sprake van een aanzienlijk hogere waterstand; tot Zutphen zijn de waterstanden wel ongeveer 0,15 m hoger. Dit grote effect komt vooral door een verschuiving in de afvoerverdeling, waarbij meer water wordt afgevoerd door de IJssel. Bij hogere afvoeren is het effect minder groot.



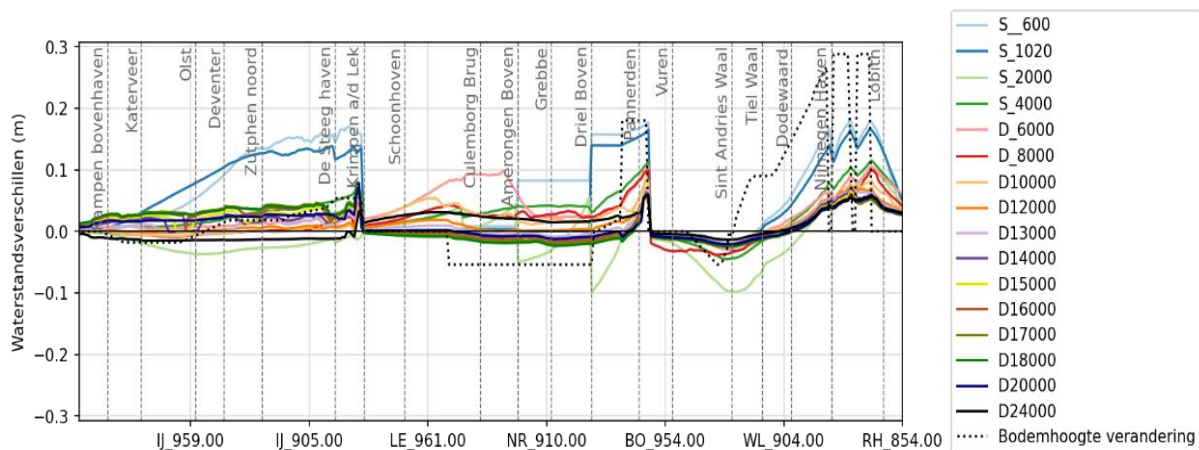
Figuur 4.5 Waterstand (m +NAP) bij simulaties met bodem 2018 (doorgetrokken lijn) en bodem 2050 (stippellijn). De kleurtjes van de lijnen hebben betrekking op de doorgerekende afvoeren. S duidt op een stationaire simulatie, D op een dynamische berekening. De Rijntakken zijn in deze figuur achter elkaar geplaatst.



Figuur 4.6 Waterstandsverschillen door overgang van bodem 2018 naar bodem 2050. Veranderingen >0 m wijzen op een verhoogde waterstand/bodemligging in 2050. De verandering in bodemligging is aangegeven met een stippellijn. De Rijntakken zijn in deze figuur achter elkaar geplaatst.



Figuur 4.7 Waterstand (m +NAP) bij simulaties met bodem 2018 (doorgetrokken lijn) en bodem 2000 (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 4.8 Waterstandsverschillen door overgang van bodem 2018 naar bodem 2000. Veranderingen >0 m wijzen op een verhoogde waterstand/bodemligging in 2000. De verandering in bodemligging is aangegeven met een stippellijn. De Rijntakken zijn in deze figuur achter elkaar geplaatst.

4.4 Conclusies

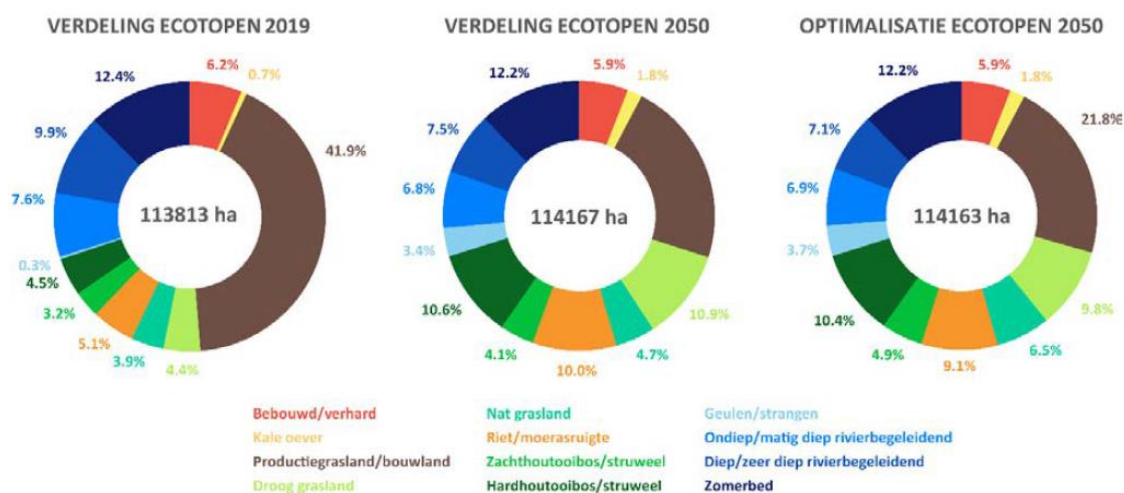
Met behulp van hydraulische berekeningen is verkend wat het effect is van het terugbrengen van de rivierbodempligging naar de ligging omstreeks het jaar 2000 op de afvoerverdeling en de waterstanden op de Rijntakken. Dit leidt tot de volgende conclusies:

- De algemeen zichtbare trend is dat door een verhoogde rivierbodempligging de waterstanden hoger worden en vice versa. De effecten zijn het grootst bij lage rivierafvoeren.
- Bij lage afvoeren (lager dan 3.000 m³/s te Lobith), leidt de 2000-bodempligging tot een verschuiving van de afvoerverdeling, waarbij meer water wordt afgevoerd door het Pannerdensch Kanaal en minder door de Waal (verschuiving van ongeveer 15 m³/s bij een afvoer van 1020 m³/s te Lobith).
- Bij de 2000-bodem treden de grootste verschillen in waterstand op op de Boven-Waal, het Pannerdensch Kanaal en de IJssel: 0,15 m hoger bij een afvoer van maximaal 1020 m³/s te Lobith. Op de Boven-Waal worden de hogere waterstanden vooral veroorzaakt door de hogere bodempligging, op de andere takken speelt ook de afvoerverdeling een belangrijke rol. Verder benedenstrooms op de Waal leidt de kleinere fractie van de Rijnafvoer tot lagere waterstanden.
- De 2050-bodempligging leidt ook tot een verschuiving in de afvoerverdeling, maar dan wordt juist méér water afgevoerd door de Waal. De verschuiving bedraagt bij zeer lage afvoeren ongeveer 25 m³/s.
- De 2050-bodem bij het nulalternatief leidt vooral tot lagere waterstanden. Het grootste verschil is te vinden op de Boven-Waal, het Pannerdensch Kanaal en de IJssel en is bij afvoeren van maximaal ongeveer 1020 m³/s te Lobith ongeveer 0,3 m lager. Op de Boven-Waal komt dit door de erosie (-0,5 m). Op de andere takken komt dit vooral door de kleinere fractie van de Rijnafvoer.
- Bij hoogwater leidt de 2050-bodem niet tot een verandering in de afvoerverdeling. De beleidsmatig gewenste afvoerverdeling (BVA) kan met de huidige regelwerken worden gerealiseerd; ze komen daarbij zelfs meer in de (gewenste) middenpositie te staan.
- Bij de 2000-bodem is het niet mogelijk om, zonder extra rivierverruiming op de Boven-Waal en bij de huidige regelwerken, aan de BVA te voldoen. Zelfs als regelwerk Pannerden helemaal dicht staat stroomt er ongeveer 30 m³/s teveel naar het Pannerdensch Kanaal.

5 Natuur

5.1 Inleiding

Bij de effectbepaling natuur kijken we naar de abiotische randvoorwaarden die het rivierengebied biedt voor voortbestaan of ontwikkeling van natuur. We onderzoeken de potentie voor verschillende ecotooptypen en we onderzoeken in welke mate doelen van de Programmatische Aanpak Grote Wateren (PAGW zie Figuur 5.1) gerealiseerd kunnen worden.



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 ecotoop 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. Hardhoutoobos kan alleen ontstaan op plaatsen 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 vooral gekeken naar de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG), omdat de condities in het voorjaar en de concurrentieverhoudingen tussen soorten in die periode de soortensamenstelling van de vegetatie grotendeels bepalen.

Analyses op basis van overstromingsduur

De overstromingsduur van uiterwaarden wordt sterk beïnvloed door de aanwezigheid van zomerkades. Zomerkades kunnen voorkomen dat uiterwaarden bij middelhoge afvoeren overstromen (kortere overstromingsduur), maar kunnen water ook langer vasthouden (langere 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 bij natuurgebieden de zomerkades zijn verwijderd of zijn doorgestoken.

De overstromingsduur is bepaald op basis van de rivierwaterstanden berekend met D-HYDRO (zie hoofdstuk 4).

Analyses op basis van grondwaterstanden

In het kader van de effectbepaling nulalternatief IRM is gebruik gemaakt van eerder uitgevoerde grondwaterstandsberekeningen waarbij het effect van doorgaande rivierbodemerisatie op de grondwaterstandskarakteristieken is bepaald (Levelt et al., 2022). Er zijn geen berekeningen voor een hogere rivierbodempligging beschikbaar. Daarom is gekeken naar de relatie tussen veranderingen in rivierwaterstand en veranderingen in grondwaterstand zoals berekend voor de rivierbodempligging in 2050. Deze relatie is vervolgens toegepast op de 2000-bodem.

Een rekenvoorbeeld: Stel dat waterstanden op de Boven-Waal als gevolg van doorgaande bodemerisatie 0,3 m lager worden en dat dit volgens Levelt et al. (2022) leidt tot een 0,15 m lagere GVG (grondwaterstandseffect is de helft van het waterstandseffect). Wanneer de waterstanden op ditzelfde traject bij de 2000-bodem 0,2 m omhoog gaan, dan is aangenomen dat dit leidt tot een 0,1 m hogere grondwaterstand.

Om na te gaan hoe veranderingen in grondwaterstanden van invloed zijn op de natuur, is gebruik gemaakt van de rekenregels die zijn opgesteld door Van den Berg (2021).

BRL toetsing van nevengeulen

Met het BRL-instrumentarium wordt gekeken naar het meestromen 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.

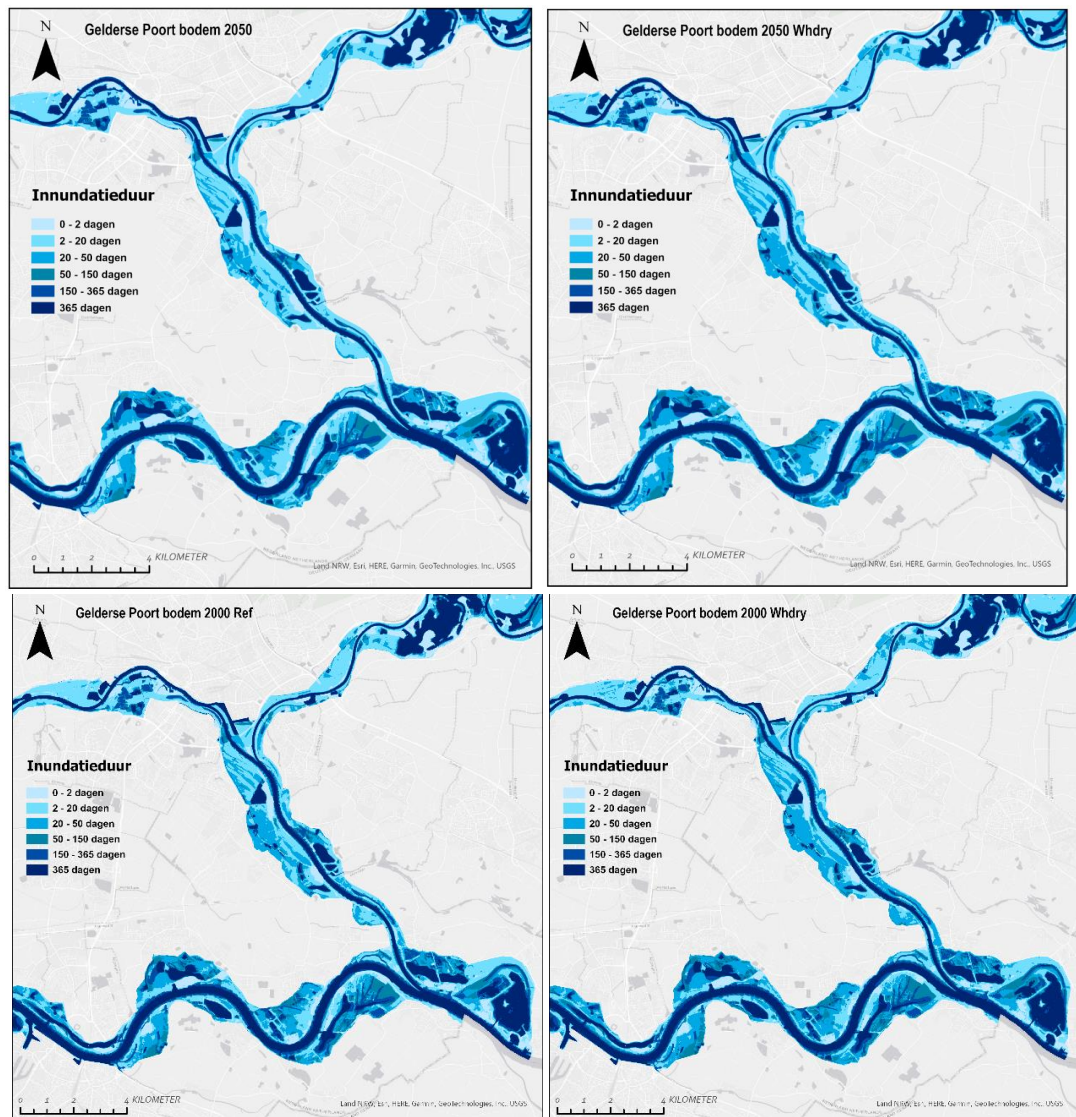
Voor strangen geldt een eis van watervoerendheid van 225 dagen per jaar. Om te controleren of aan deze eis wordt voldaan wordt gekeken of de bodem van het zomerbed van de rivier overal voldoende hoog is, zodat de rivierwaterstand voldoende hoog is om de nevengeul mee te laten stromen. Als praktische toepassing is gekozen om OLR (Overeengekomen Lage Rivierstand) hiervoor te gebruiken, welke 5% (ongeveer 18 dagen) per jaar wordt onderschreden. Deze eis is dus iets strenger dan het initiële uitgangspunt. Voor deze eis is OLR voor de verschillende bodempliggingen aangepast aan de hand van de hydraulische berekeningen. Dit is uitgebreider beschreven door Van der Deijl (2022).

5.3 Resultaten

5.3.1 Overstromingsduur

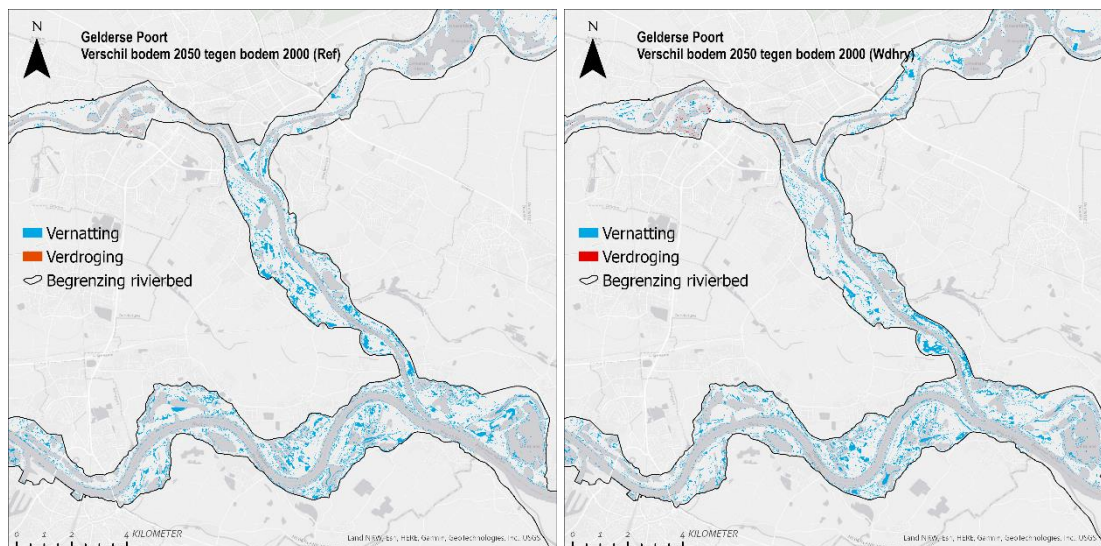
Figuur 5.2 toont de overstromingsduur van de uiterwaarden van de Rijntakken in het Gelderse-Poortgebied voor de situatie met een zomerbedhoogte behorend bij het nulalternatief 2050 (doorgaande erosie), en die van omstreeks het jaar 2000 (hogere ligging). Voor iedere bodempligging is de overstromingsduur bepaald bij het huidige klimaat (links) en bij klimaatverandering volgens het scenario W_{Hdry} . In dat scenario neemt de kans op hoogwater iets toe, wat resulteert in een beperkte toename van de overstromingsduur. De klassen in deze figuur komen overeen met de klassen die HABITAT hanteert. Wanneer een gebied in een andere overstromingsduurklasse komt te vallen betekent dit dat het geschikt is voor een ander ecotooptype. Wat opvalt is dat het verschil in rivierbodempligging op slechts een zeer beperkt aantal locaties leidt tot zulke grote veranderingen in overstromingsduur dat dat zichtbaar is op de kaart. Op een aantal locaties (met name langs het Pannerdensch Kanaal) is te zien dat de hogere bodempligging bij de 2000-bodem tot een iets grotere overstromingsduur leidt dan de lagere bodempligging in nulalternatief IRM 2050 (vergelijk de bovenste figuren met de figuren daaronder). Klimaatverandering heeft eveneens een beperkt effect.

Bij het W_{Hdry} scenario is eveneens te zien dat de overstroomingsduur op een beperkt aantal locaties een klasse opschuift (langdurigere overstroming) ten opzichte van huidig klimaat (vergelijk de beide rechter figuren met de beide linker).



Figuur 5.2 Overstromingsduur van de uiterwaarden in de Gelderse Poort bij verschillende rivierbodempliggingen (boven in het jaar 2050, onder rond het jaar 2000) en klimaat (links het huidige klimaat, rechts W_{Hdry}).

Een vergelijking van de overstroomingsduur van de verwachte bodempligging in 2050 (nulalternatief IRM) en bodempligging rond het jaar 2000 is voor beide klimaatscenario's weergegeven in Figuur 5.3. Door de klasse-indeling waarin de overstroomingskaarten beschikbaar zijn, is het niet mogelijk om de exacte toe-/afname van het aantal overstroomingsdagen weer te geven. Daarom is gekozen voor deze kwalitatieve analyse, waarbij alleen wordt gesproken van vernatting of verdroging wanneer de overstroomingsduur minimaal 1 klasse opschuift. Figuur 5.3 laat zien dat bij de bodempligging 2000 op veel plekken vernatting optreedt ten opzichte van het IRM nulalternatief. De grootste gebieden die vernatten zijn de Boven-Rijn, Boven-Waal en het Pannerdensch Kanaal. Dit ligt in de lijn der verwachting, omdat de bodem in dit gebied het meeste wordt opgehoogd. Het verschil tussen de twee doorgerkende klimaten (huidig en dat van 2050 bij W_{Hdry}) is echter klein.



Figuur 5.3 Vernatting of verdroging van uiterwaarden als gevolg van ophoging van de rivierbodem tot die van ongeveer 2000 ten opzichte van wat zou ontstaan in het nulalternatief (bodem 2050), zoals gepresenteerd in Asselman et al. (2022), met huidig klimaat (links) en veranderend klimaat (rechts). Vernatting betekent dat de overstromingsduur bij de 2000-bodem langer is dan bij de 2050-bodem.

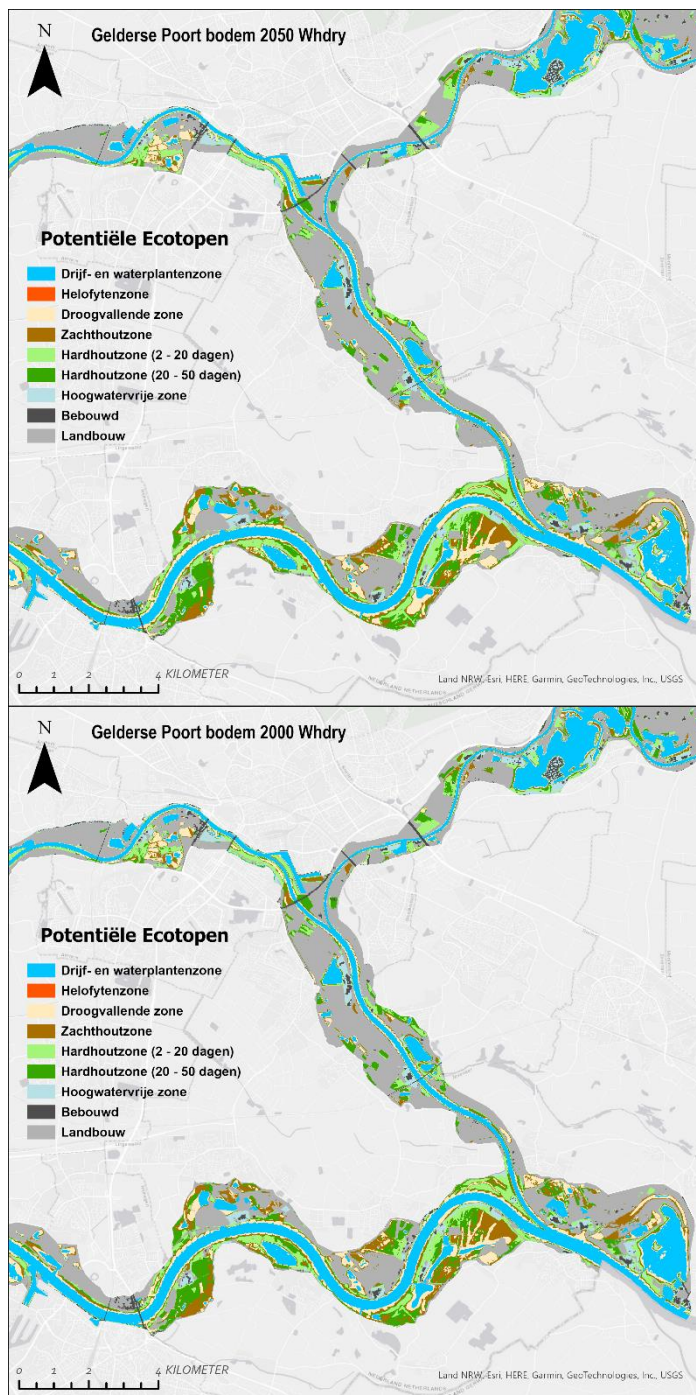
5.3.2 Veranderingen in potentiële ecotoopverdeling op basis van overstromingsduur

De toename in overstromingsduur (vernatting, Figuur 5.3) vertaalt zich door in de potentiële ecotoopverdeling (Figuur 5.4). De veranderingen in oppervlakte per ecotooptype staat in Tabel 5.1. We zien een verschuiving richting 'nattere' ecotooptypen. Wel blijkt deze verandering ten opzichte van het nulalternatief gering te zijn. Het grootste deel van de verandering is de overgang van droogvallende zones naar Drijf- en waterplantenzones. Ook de zachthoutzone neemt toe.

Tabel 5.1 Verandering in areaal per ecotooptype (in zichtjaar 2050) bij verschillende rivierbodempligingen (op basis van verschillen in overstromingsduur)

Ecotoop	Oppervlakte bij nulalternatief (ha)	Oppervlakte bij 2000-bodem (ha)	Verschil (ha)
Drijf- en waterplantenzone	45217	48086	2869
Helofytenzone	0	0	0
Droogvallende zone	21836	19922	-1913 (-9%)
Zachthoutzone	14430	15824	1393 (10%)
Hardhoutzone	33789	31924	-1865 (-6%)
Hoogwatervrije zone	7303	6818	-485 (-7%)
Bebouwd	4431	4431	0
Landbouw	73525	73525	0

Omdat de veranderingen in potentiële ecotoopverdeling klein zijn ten opzichte van het grote landbouwareaal, blijft de conclusie uit Asselman et al. (2022) over het behalen van de doelen van de PAGW staan: om aan de doelen van de PAGW te voldoen is het vooral belangrijk dat landbouwgebieden een natuurfunctie krijgen.



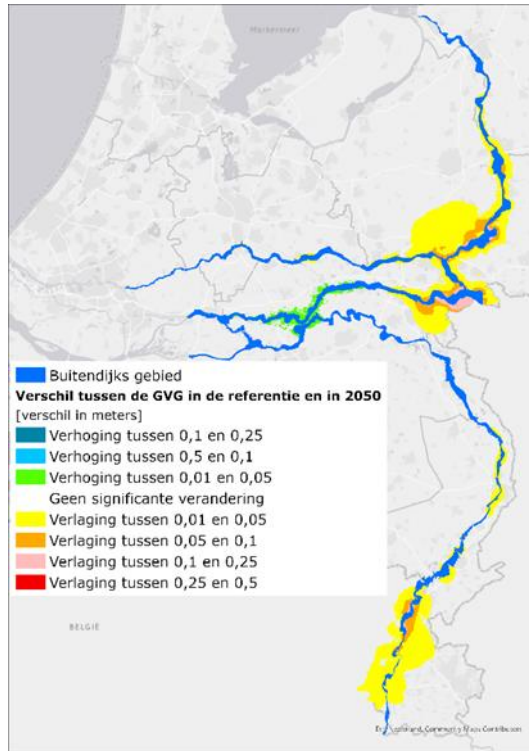
Figuur 5.4 Ecotooppotentie Gelderse Poort berekend met HABITAT in het nulalternatief (boven) en in de situatie met een bodemligging omstreeks 2000 (onder). Beide onder klimaatscenario W_{Hdry} .

5.3.3

Veranderingen in potentiële ecotoopverdeling op basis van grondwaterstanden

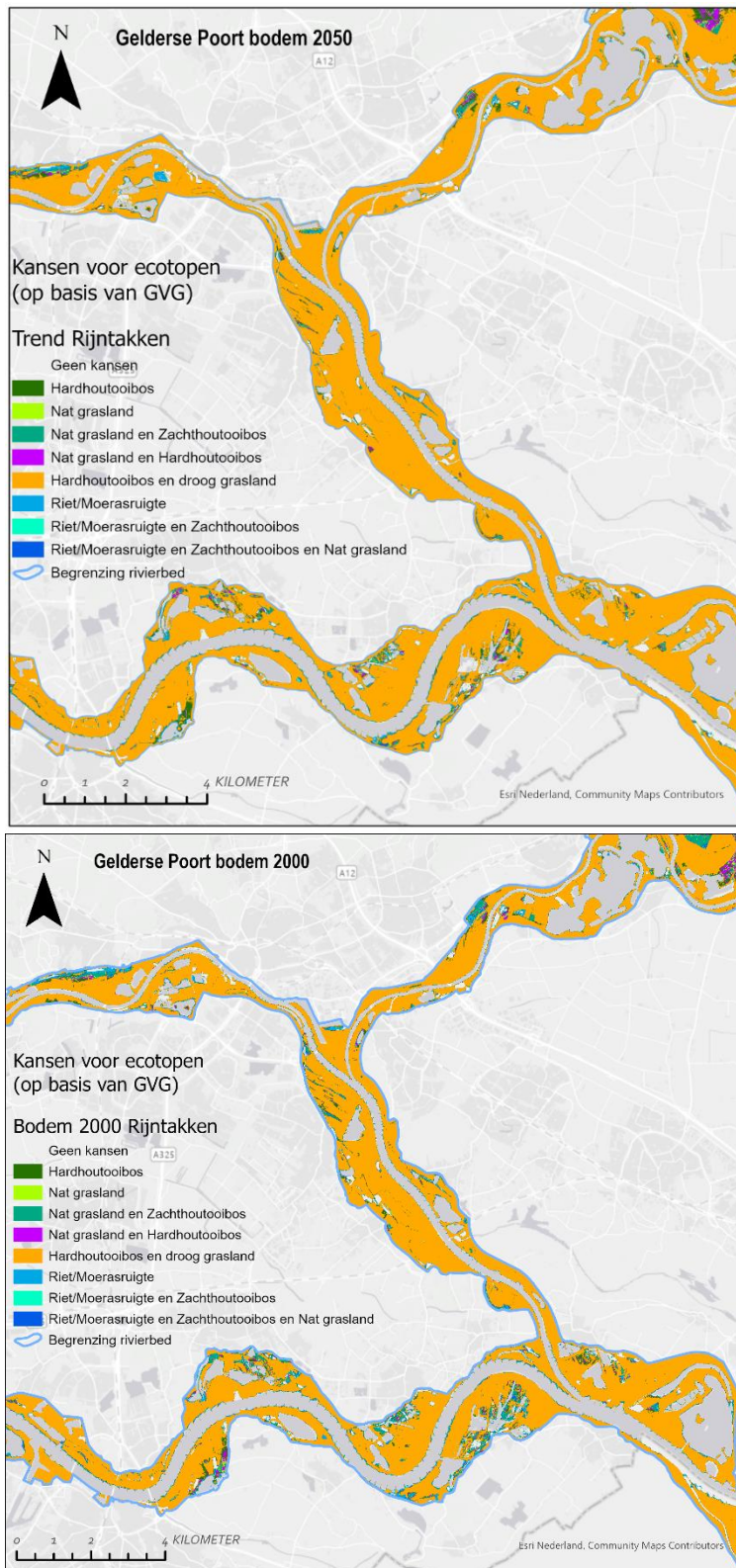
Om effecten op natuur te bepalen is niet alleen gekeken naar veranderingen in overstromingsduur, maar ook naar veranderingen in grondwaterstand. Figuur 5.5 toont de veranderingen in de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) als gevolg van rivierbodemerrosie zoals aangenomen in het nulalternatief van IRM (voor meer informatie over de berekeningen: zie Levelt et al., 2022). In de studie van Levelt et al. (2022) is het effect van klimaatverandering niet onderzocht.

Voor de Rijntakken geldt echter dat klimaatverandering vooral zal leiden tot lagere waterstanden in de zomer en hogere waterstanden in de winter. In het voorjaar zal de afvoer naar verwachting niet sterk veranderen. Dat betekent dat klimaatverandering weinig effect zal hebben op de GVG.



Figuur 5.5 Verandering in gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) als gevolg van rivierbodemerrosie (verschil bodemligging 2018 en verwachte bodemligging in 2050). Gele en oranje kleuren duiden op een verlaging (Bron: Levelt et al., 2022).

Voor de 2000-bodemligging zijn geen grondwaterstandsberekeningen uitgevoerd. Echter, op basis van waterstandsveranderingen berekend met D-Hydro wordt verwacht dat ophoging van de rivierbodem volgens dit alternatief zal leiden tot maximaal ongeveer 0,15 m hogere grondwaterstanden. De GVG die door Levelt et al. (2022) berekend is voor de huidige situatie (huidige bodemligging), is met deze waarde verhoogd. Vervolgens zijn de rekenregels van Van den Berg (2021) toegepast om de potentiële ecotoopverdeling te bepalen. De resultaten zijn te zien in Figuur 5.6.



Figuur 5.6 Ecotooppotentie op basis van de voorjaarsgrondwaterstand (GVG) voor de buitendijkse gebieden in de Gelderse Poort bij doorgaande erosie van het zomerbed in 2050 en bij ophoging van de rivierbodempligging tot de ligging rond het jaar 2000.

De verandering in grondwaterstand door de hogere bodempligging lijkt een zeer beperkt effect te hebben op de potentiële ecotopen binnen de Gelderse Poort.

Door de beperkte 'vernating' zien we een kleine verschuiving naar de nattere ecotootypen. De grootste veranderingen zijn terug te zien in de hardhoutoiboszone. De drie klassen waarin hardhoutoibos voorkomt hebben een netto afname van 188 ha. Hier tegenover staat een toename van nattere ecotopen zoals nat grasland + hard/zachthoutoibos (+99 ha, ofwel 1% van het totale areaal). Tabel 5.2 geeft de overige veranderingen in potentiële ecotootypen weer voor het gebied rond de Gelderse Poort zoals weergegeven in o.a. Figuur 5.6. Dit gebied heeft een totaal oppervlakte van 8362 ha. Door de verandering in GVG wordt verwacht dat 444 ha aan ecotopen kan verschuiven naar een andere klasse. De totale verandering binnen de Gelderse Poort komt dan neer op zo'n 5%.

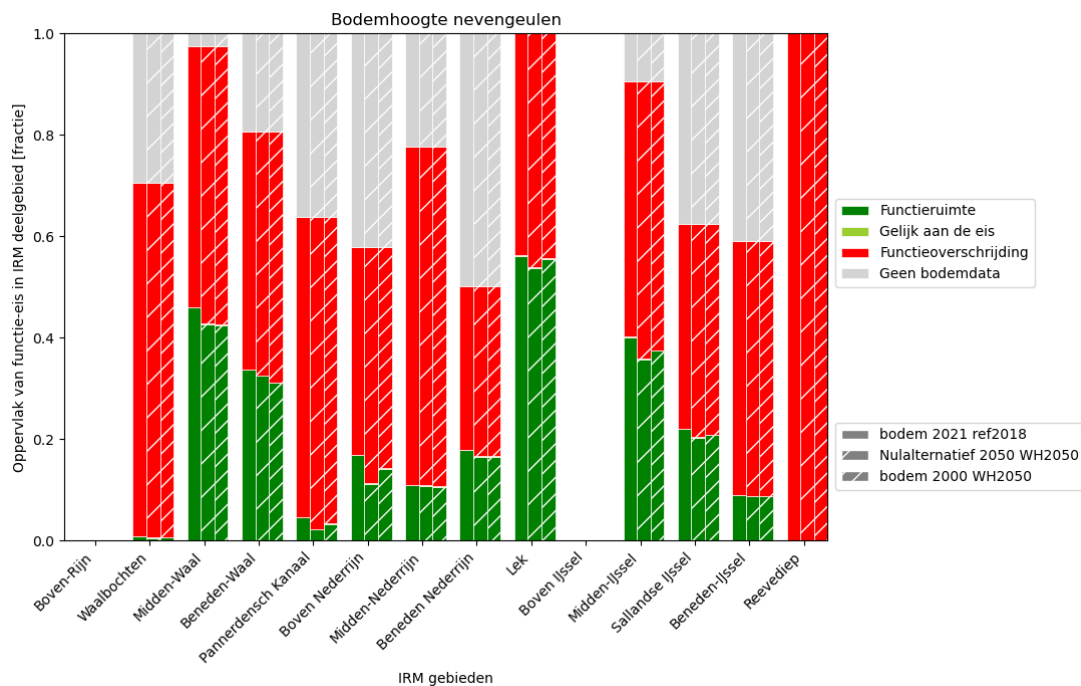
Tabel 5.2 Verandering van potentiële ecotootype op basis van de GVG rond de Gelderse Poort. Bodemligging 2000 vergeleken met de situatie uit het nulalternatief (2050). In de eerste kolom staat het aantal hectare dat bij het nulalternatief in deze klasse viel, maar bij de 2000-bodem niet meer. In de tweede kolom staat hoeveel ha er bij de 2000-bodem is bijgekomen. In de derde kolom staat het netto verschil.

Ecotooppotentie op basis van GVG	Verdwenen t.o.v. nulalternatief (ha)	Bijgekomen t.o.v. 2050 (ha)	Netto Verschil (ha)
Hardhoutoibos	171	180	9
Hardhoutoibos en droog grasland	222	0	-222
Nat grasland	29	45	16
Nat grasland en Hardhoutoibos	70	95	25
Nat grasland en Zachthoutoibos	114	171	57
Riet/Moerasruigte	88	103	15
Riet/Moerasruigte en Zachthoutoibos	18	23	5
Riet/Moerasruigte en Zachthoutoibos en Nat grasland	39	47	8

5.3.4 Aanvullende bevindingen BRL

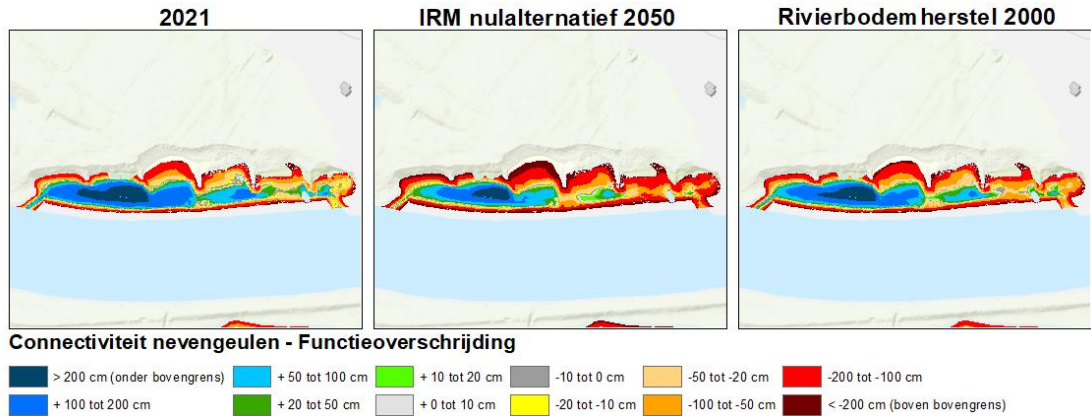
Voor de bodemligging van de nevengeulen is aangenomen dat deze niet verandert bij een veranderende ligging van het zomerbed. Het is dus alleen de verandering in de rivierwaterstanden (zowel door de veranderingen in de bodem van het zomerbed als door klimaatverandering) die van invloed is op de doorstroming van de nevengeulen.

Figuur 5.7 toont per IRM-traject de delen van nevengeulen die 1) nu, 2) bij het nulalternatief IRM in 2050 of 3) bij rivierbodemerstel naar bodem 2000 niet aan de gestelde eisen voor voldoende doorstroming voldoen. Voor een groot aantal nevengeulen zijn geen gegevens (grijs) beschikbaar voor het beoordelen van de nevengeul. De resultaten laten zien dat bij de huidige bodemligging een deel van de geulen niet aan de eisen voldoet (rood). Doorgaande bodemerrosie en klimaatverandering leiden tot een verslechtering van de doorstroming (de groene balkjes worden korter). Ophoging van de rivierbodemerstel leidt tot een verbetering ten opzichte van het nulalternatief, maar door klimaatverandering is ook in dat geval de doorstroming in 2050 slechter dan nu. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat het niet noodzakelijk is dat het gehele oppervlak van de geul aan de eisen voldoet, zolang er maar een voldoende brede strook over de lengte van de geul is die wel kan doorstromen.

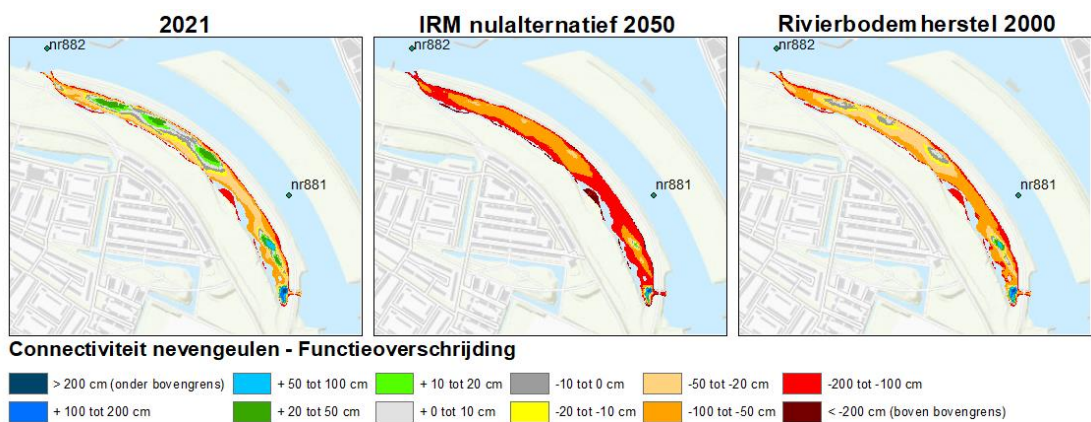


Figuur 5.7 Deel van het oppervlak van de nevengeulen per IRM traject dat nu, bij het nulalternatief IRM in 2050 of bij rivierbodemerstel naar het zichtjaar 2000 onvoldoende doorstroomt (rode kleur)

Deze nadere inspectie van de doorstroming van de nevengeul is mogelijk met figuren per nevengeul zoals Figuur 5.8 en Figuur 5.9 die voor de nevengeulen bij Zutphen en Arnhem tonen in welke mate de nevengeulen aan de gestelde KRW-eisen voor voldoende doorstroming voldoen. De blauwe en groene tinten duiden op voldoende waterdiepte in de geul, maar oranje en rode tinten geven aan waar droogval is bij laagwater. De linkerkaart toont de huidige situatie waar de randen van het gebied droogvallen bij laagwater. Bij de geul Stokebrandsweerd bij Zutphen (Figuur 5.8) is in het midden van de geul nog een smalle blauwe (natte) strook, waardoor deze geul nog net aan de eisen voor doorstroming voldoet, maar bij de geul Bakenhof bij Arnhem is er in de huidige situatie bij laagwater al geen doorstroming (Figuur 5.9). Het middelste kaartbeeld in Figuur 5.8 toont dat de geul Stokebrandsweerd in 2050 op meerdere locaties over de gehele breedte droogvalt waardoor er geen doorstroming meer is. Het rivierbodemerstel naar 2000 (rechts in Figuur 5.8) zorgt ervoor dat er een minder groot deel van de nevengeulen droogvalt. Het rivierbodemerstel zorgt bij deze specifieke nevengeul echter nog niet voor voldoende doorstroming tijdens laagwater. Ook bij de geul Bakenhof verslechtert de doorstroming van de nevengeul bij alle rivierbodempliggingen. Ophoging van de rivierbodempliggingen naar de situatie in het jaar 2000 leidt weliswaar tot hogere waterstanden, maar het is onvoldoende om de lagere laagwaterstanden door klimaatverandering te compenseren.



Figuur 5.8 Beperkingen connectiviteit nevengeul Stokebrandsweerd, Zutphen, zoals bepaald met de BRL voor 2021 (huidige bodemligging en klimaat, links), 2050 (lagere bodemligging en klimaat W_{Dry} , midden) en 2000 (hogere bodemligging en klimaat W_{Dry} , rechts)



Figuur 5.9 Beperkingen connectiviteit nevengeul 'Bakenhof', Arnhem, zoals bepaald met de BRL voor 2021 (huidige bodemligging en klimaat, links), 2050 (lagere bodemligging en klimaat W_{Dry} , midden) en 2000 (hogere bodemligging en klimaat W_{Dry} , rechts)

De figuren laten zien dat door het gecombineerde effect van rivierbodemerrosie en klimaatverandering het oppervlak van de nevengeulen dat niet voldoet aan de eisen voor voldoende doorstroming toeneemt. Dit komt omdat zowel de overeengekomen lage rivierstand (OLR) als de mediane waterstand op de meeste IRM trajecten van de Rijntakken daalt. Ook bij de 2000-bodem neemt op alle IRM trajecten de fractie van de nevengeulen die aan de eisen voldoet af, als gevolg van de klimaatverandering die een sterker effect heeft. De afname op de trajecten met een verandering in bodemligging (Boven- en Midden-Waal, Boven-Nederrijn en Boven-IJssel) is echter minder groot doordat het rivierbodembodemherstel zorgt voor zowel een hogere OLR als hogere mediane waterstanden. Dit compenseert deels de verlaging van de waterstanden door klimaatverandering. Op de Beneden-Waal en Beneden-Nederrijn leidt rivierbodembodemherstel (naar het jaar 2000) echter nog steeds tot significant lagere waterstanden (gecombineerd effect van lagere rivierbodembodemligging en klimaatverandering) en daarmee tot meer nevengeulen die niet aan de eisen voor voldoende doorstroming voldoen.

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 Rijnakken gemiddeld enkele tot enkele tientallen dagen per jaar onder water. Klimaatverandering volgens het scenario W_{dry} zorgt voor een zeer kleine toename van de overstromingsduur. Doorgaande rivierbodemerose 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. Wanneer de rivierbodem wordt opgehoogd is sprake van een beperkte toename van de overstromingsduur.
- De doorgaande rivierbodemerose zorgt voor een daling van de voorjaarsgrondwaterstanden; met maximaal 25 cm op de Boven-Waal. Ophoging van de rivierbodem tot de ligging in het jaar 2000 leidt hier tot maximaal 15 cm hogere grondwaterstanden.
- Op basis van overstromingsduren wordt geconcludeerd dat de uiterwaarden langs de Rijnakken *in potentie* geschikt zijn voor zachthout- en vooral hardhoutoibos en, afhankelijk van het beheer, ook voor nat en droog grasland. Het effect van veranderingen in overstromingsduren (als gevolg van klimaatverandering en/of verandering in rivierbodempligging) op de potentiële ecotoopverdeling is beperkt.
- Op basis van de nu beschikbare grondwaterstandsregels zijn de uiterwaarden vooral geschikt voor droog grasland en hardhoutoibos. Op basis van de voorjaarsgrondwaterstanden (GVG) kan in vergraven uiterwaarden lokaal ook zachthoutoibos of nat grasland voorkomen. De oppervlaktes zijn echter zeer beperkt.
- Veranderingen in grondwaterstand door doorgaande rivierbodemerose hebben nauwelijks effect op de ecotooppotentie: de uiterwaarden zijn ook in de toekomst vooral geschikt voor hardhoutoibos en droog grasland (ze zijn nu al te droog voor veel natte ecotopen en dat wordt in de toekomst nog erger). Ophoging van het rivierbed leidt tot een beperkte toename in potentie voor natte ecotooptypen.
- 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 in de Waalbochten en langs 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 rivierbodemerose. Rivierbodemherstel naar de bodempligging van ongeveer 2000 zorgt voor een hogere laagwaterstanden en compenseert daarmee deels het effect van klimaatverandering op de verminderde doorstroming van de nevengeulen. De doorstroming zal echter nog steeds verslechteren t.o.v. de huidige situatie.

6 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 procentueel afneemt.

In West-Nederland zorgt de aanvoer vanuit de rivieren voor een tegendruk en stroming die zoutindringing vanuit de Noordzee beperken. Uit de effectbepaling van het nulalternatief bleek dat bodemerosie op de Waal zorgt voor een veranderde afvoerverdeling over de Rijntakken, waardoor de Waalafvoer tijdens lage-afvoerperioden procentueel 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 langs de grote rivieren, waar water wordt ingelaten voor regionale watervoorziening maar ook voor drinkwater en industrie. De waterstanden in de grote rivieren zijn daarbij 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.

6.2 Methode

Scenario's, bodemligging en klimaatverandering

De volgende indicatoren zijn beschouwd voor Noord-Nederland:

- Watertekort Noord-Nederland (als functie van vullingsgraad van het IJsselmeer).
- Watertoevoer Twentekanalen.

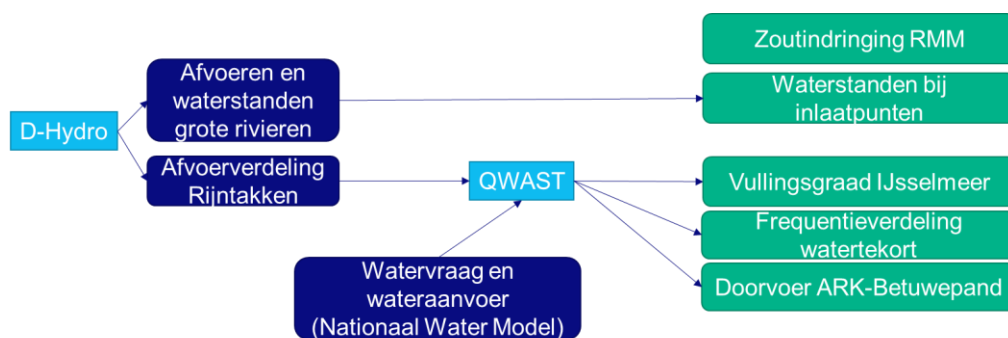
De indicatoren zijn gekwantificeerd voor de huidige situatie (Ref), de situatie met een veranderde rivierbodemligging (b2000 en b2018) en de situatie in Deltascenario Stoom2050. Zie Tabel 6.1 voor een uitgebreider overzicht van de scenario's.

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 rivierbodemligging 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 de 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 onderschrijding van relevante drempelwaardes te bepalen.

Tabel 6.1 Uitleg doorgerekende scenario's (laatste scenario is verkend in het kader van deze studie, andere scenario's zijn verkend door Asselman et al., 2022)

Naam scenario	Wat houdt het scenario in
Basis_REF	Huidige situatie met huidig klimaat en huidige rivierbodempligging (2018)
REF_b2050	Huidig klimaat in combinatie met rivierbodempligging 2050. Geen maatregelen genomen om bodemerrosie tegen te gaan.
STOOM_b2050	Klimaat W_{Hdry} 2050 + socio-economische veranderingen in combinatie met rivierbodempligging in 2050. Geen maatregelen genomen om bodemerrosie tegen te gaan.
STOOM_b2018	Klimaat W_{Hdry} 2050 + socio-economische veranderingen in combinatie met huidige rivierbodempligging in 2018. Maatregelen genomen om verder bodemerrosie na 2018 tegen te gaan.
STOOM_b2000	Klimaat W_{Hdry} 2050 + socio-economische veranderingen in combinatie met rivierbodempligging in 2000. Maatregelen genomen om bodempligging terug te brengen naar de situatie van rond het jaar 2000.



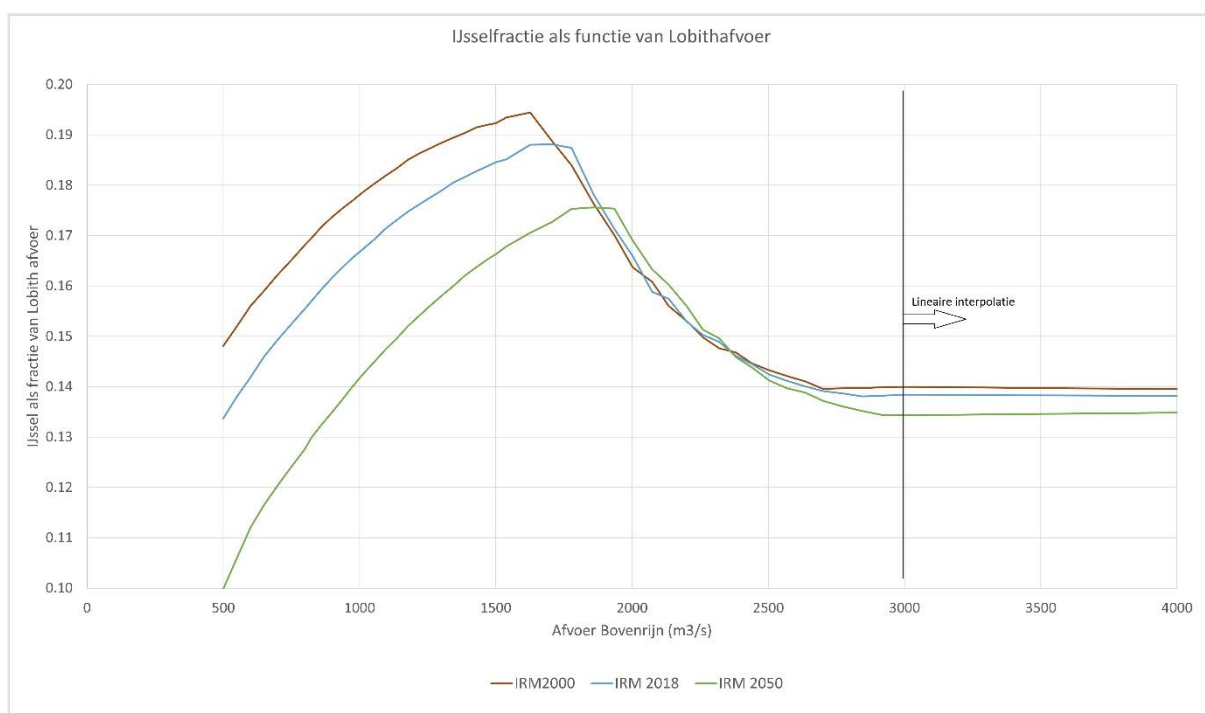
Figuur 6.1 Schematische weergave methode effectbepaling zoetwaterbeschikbaarheid

De belangrijkste aannames voor de QWAST-berekening staan beschreven in Asselman et al. (2022), maar 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 prioriteit⁴. Hiermee wordt aangenomen dat de voorgenomen zoutbepalkende maatregelen bij Den Oever (Rijksoverheid, 2021) zijn uitgevoerd.
- De voorspelhorizon is ingesteld op 1 maand.

⁴ In QWAST is op dit moment ingesteld dat altijd 40 m³/s geleverd wordt om de sluisen 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.

- De afvoerverdeling, afgeleid uit de semi-stationaire D-HYDRO berekeningen, is weergegeven in Figuur 6.2. Hierop is nog een correctie uitgevoerd:
 - Bij zeer lage afvoeren wordt stuw Driel gestreken. De afvoer over de Nederrijn wordt dan lager dan $20 \text{ m}^3/\text{s}$, 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 $0 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt niet plausibel geacht.
 - Er is daarom de volgende correctie gedaan: bij Nederrijn-afvoeren lager dan $20 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt deze opgehoogd naar $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit gaat voor 1/3 ten koste van de IJsselafvoer en voor 2/3 ten koste van de Waalafvoer. De data in de figuur is hierop gecorrigeerd.
 - Voor afvoeren tussen 3.000 en $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ is lineair geïnterpoleerd. Dit afvoerbereik is nodig als invoer voor QWAST, maar heeft weinig invloed op de watertekortberekening.



Figuur 6.2 Fractie van de afvoer bij Lobith die wordt afgevoerd via de IJssel. De jaartallen duiden op de bodemligging (ligging in 2000, 2018, of 2050). De IRM data zijn voor de toepassing met QWAST gecorrigeerd om te voorkomen dat de Nederrijn-afvoer lager wordt dan $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

Landbouwschade door watertekorten

Watertekorten kunnen resulteren in een verminderde landbouwopbrengst, waarbij de orde omvang varieert per scenario. De verandering in landbouwopbrengst door verandering in de waterbeschikbaarheid voor beregening kan worden geschat door middel van metarelaties. Deze zijn destijds voor DPZW ontwikkeld als *post-processing* op berekeningen met QWAST, en afgeleid op basis van 100-jarige sommen met het Nationaal WaterModel (NWM) en de effectmodule landbouw (Delsman et al., 2019). De NWM-berekeningen resulteerden in een grote database met gegevens over actuele verdamping (m^3) en gewasopbrengst in euro's per district. Binnen een district worden alleen de beregende gewassen meegenomen en wordt de informatie van al deze gewassen bij elkaar opgeteld. De relatie is zodoende gewasonafhankelijk maar wel gekoppeld aan een gebied met bepaalde grootte (district).

Vervolgens is aangenomen dat van iedere kuub extra beschikbaar water 40% ten goede komt aan gewasverdamping (door beregening uit oppervlaktewater) en daarmee aan gewasopbrengst. De vermindering in beregeningstekorten kan hiermee worden vertaald in een toename van de gewasopbrengst (€). De tweede relatie is de relatie tussen beregening en beregeningskosten. De volgende variabele beregeningskosten zijn meegenomen: Arbeidskosten = 0,5 euro mm⁻¹ ha⁻¹ en energiekosten = 1,56 euro mm⁻¹ ha⁻¹.

De metarelatie gaat uit van relatieve veranderingen in waterbeschikbaarheid tussen twee scenario's. De relatie kan worden toegepast voor droge jaren waarin voor de referentiesituatie al tekorten en dus landbouwschade wordt berekend. Neemt de waterbeschikbaarheid (door bijvoorbeeld een maatregel) toe, dan neemt de landbouwopbrengst toe, ofwel de landbouwschade (opbrengstderving) neemt af. Meer beregening kost de boer ook meer; daarvoor moet wel gecorrigeerd worden. De netto verandering in landbouwschade per district en per scenario wordt daarom berekend door het verschil te nemen tussen de verandering in landbouwopbrengst en de verandering in beregeningskosten.

6.3 Resultaten

Omdat veranderingen in rivierbodempligging vooral effect hebben op watertekorten in Noord-Nederland (zie Asselman et al., 2022) brengen we vooral het effect voor deze regio in beeld.

6.3.1 Watertekorten 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 zouden volgens de berekeningen watertekorten zijn opgetreden (1921 en 1976; zie bovenste figuur in Figuur 6.3). De buffervoorraad van het IJsselmeer/Markermeer zou dan nog net niet helemaal uitgeput zijn en de tekorten blijven daardoor relatief beperkt.

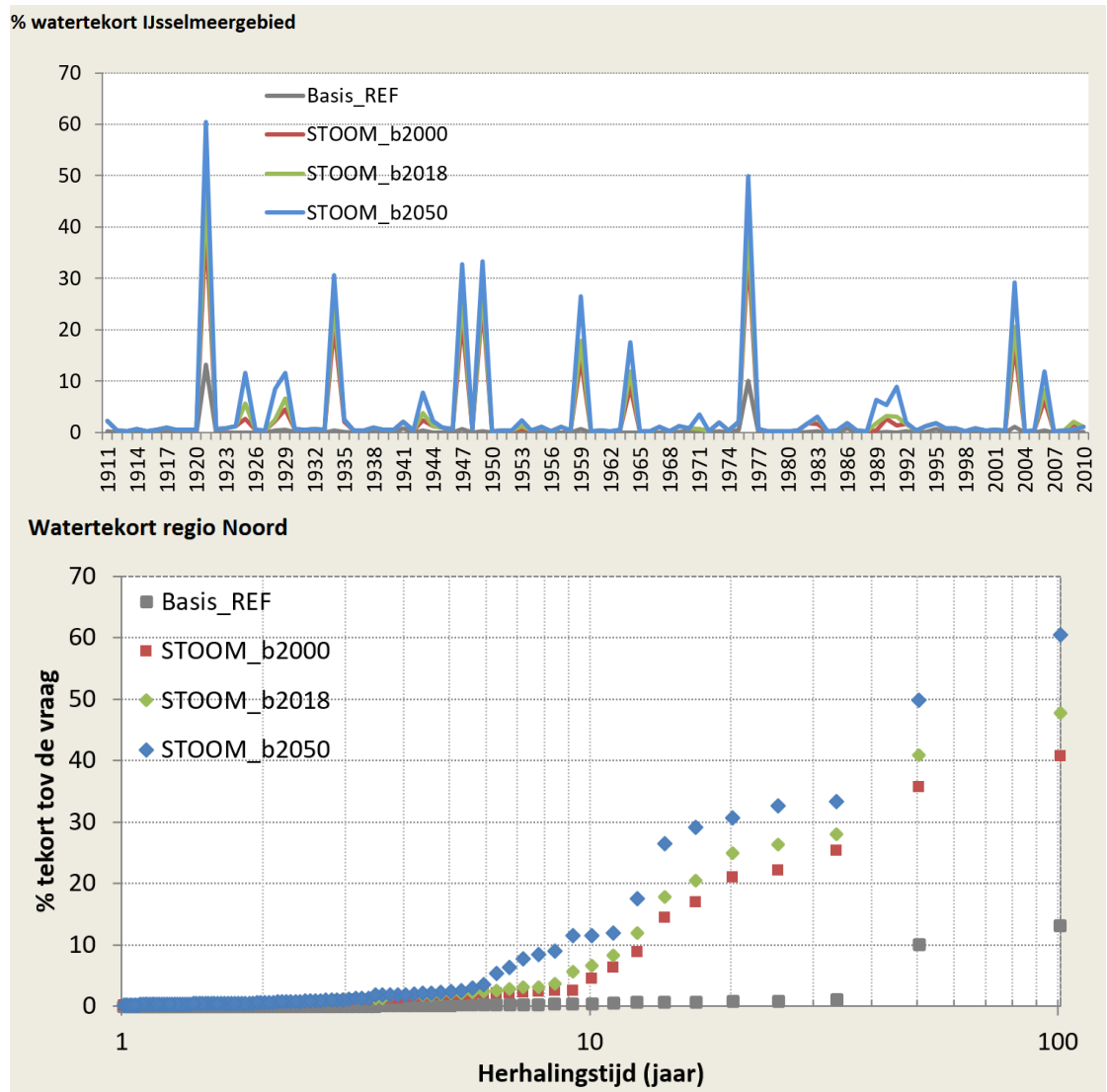
In het Deltascenario Stoom2050 zal, uitgaande van de huidige rivierbodempligging (STOOM_b2018), in 2050 eens in de 12 à 13 jaar sprake zijn van flinke watertekorten, waarbij niet kan worden voldaan aan 10% of meer van de watervraag (zie Figuur 6.3). Dit is het effect van klimaatverandering en sociaaleconomische ontwikkelingen waardoor de watervraag toeneemt en het wateraanbod via de grote rivieren afneemt. Bij het scenario Stoom2050 neemt in de toekomst het watertekort in droge jaren dus toe en neemt ook de kans op watertekort toe.

Als het klimaat *niet* verandert, maar de bodemerosie zet *wel* door, dan neemt het watertekort in Noord-Nederland in droge jaren ook toe. In combinatie met klimaatverandering en veranderingen in watervraag (conform het scenario Stoom2050), zal in 2050 eens in de 8 à 9 jaar niet voldaan kunnen worden aan 10% of meer van de watervraag (STOOM_b2050, Figuur 6.3).

Uitgaande van het scenario Stoom2050 en *ophoging* van de rivierbodempligging naar de ligging in ongeveer het jaar 2000 (STOOM_b2000), zal in 2050 eens in de 14 jaar niet worden voldaan aan 10% of meer van de watervraag. In de 2 extreem droge jaren kan het tegengaan van bodemerosie de watertekorten terugbrengen van 50-60% (bodem2050) naar 35-40% (bodem2000). Het gemiddelde watertekort per jaar kan worden teruggebracht van 4,2% (bodem2050) naar 2,7% (bodem2000).

Uit Figuur 6.3 blijkt dat klimaatverandering en socio-economische ontwikkelingen het grootste effect hebben op de kans op een watertekort in Noord-Nederland.

De kans op een watertekort van 10% van de watervraag is nu 1:50 per jaar en bij scenario Stoom2050 neemt dat in dit scenario in 2050 altijd toe, zij het niet altijd even sterk: namelijk naar 1:8 tot 1:14 jaar, afhankelijk van de rivierbodempligging.



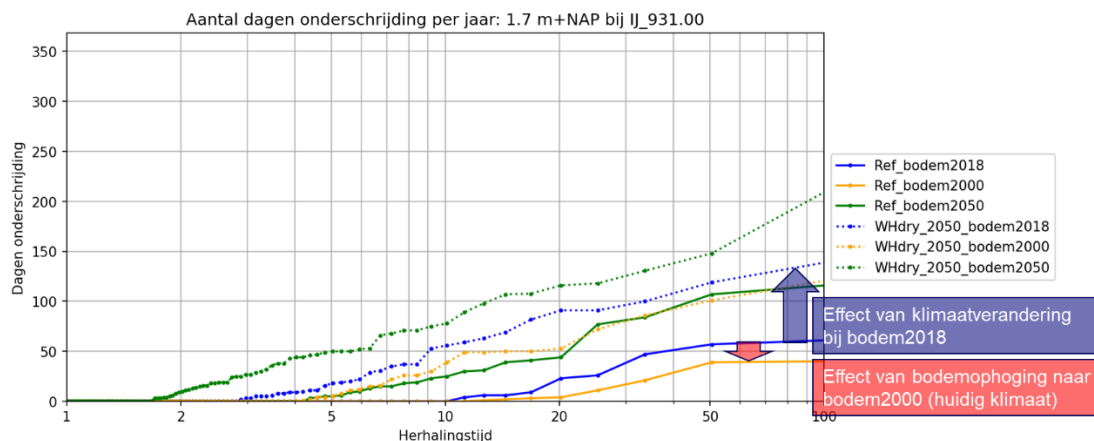
Figuur 6.3 Jaarlijkse berekende watertekorten in Noord-Nederland, nu en bij veranderend klimaat en economische groei in 2050. Boven: % watertekort IJsselmeergebied per jaar. Onder: frequentieverdeling van het watertekort. Ref= huidig klimaat en rivierbodempligging. Stoom = veranderend klimaat en rivierbodempligging.

6.3.2 Toevoer Twentekanalen

Voor de aanvoer van water naar de Twentekanalen is het belangrijk dat het kritieke waterpeil van 1,7 m +NAP bij Eefde niet wordt onderschreden. Figuur 6.4 toont de kans op een onderschrijding en de duur van de onderschrijding in de huidige situatie en bij een veranderd klimaat en een veranderde rivierbodempligging.

In het huidige klimaat en bij de huidige rivierbodempligging is gemiddeld eens in de 50 jaar sprake van een dermate lage afvoer dat het kritieke waterpeil 55 dagen of langer wordt onderschreden (blauwe lijn). Door rivierbodemerrosie (bodem 2050) en verschuiving van de afvoerverdeling neemt de frequentie toe tot eens in de ruim 20 jaar (groene lijn). Wanneer de rivierbodem wordt opgehoogd naar de ligging in het jaar 2000, dan is de kans op een onderschrijding van het kritieke waterpeil (veel) kleiner dan 1:100 per jaar.

Door klimaatverandering (W_{Hdry} -scenario) zal de kans op langdurige overschrijding van het kritieke peil toenemen. Gemiddeld zal bij handhaving van de huidige rivierbodempligging eens in de 9 jaar sprake zijn van overschrijding gedurende 50 dagen of langer (rode lijn). Door rivierbodemerisatie (bodem 2050) en verschuiving van de afvoerverdeling neemt de frequentie nog verder toe tot eens in de 6 à 7 jaar (bruine lijn). Wanneer er maatregelen worden genomen om de rivierbodempligging op te hogen naar het niveau van het jaar 2000 neemt de kans op overschrijding af tot eens in de 10 à 20 jaar (paarse lijn).



Figuur 6.4 Kans op en duur van overschrijding van het kritieke peil voor waterinlaat naar de Twentekanalen in de huidige situatie, en in 2050 bij veranderd klimaat en bij veranderde rivierbodempligging.

In Tabel 6.2 is een verder overzicht gegeven van de duur van de overschrijding wanneer verschillende herhalingstijden in acht worden genomen⁵.

Tabel 6.2 Duur van overschrijding (in dagen) voor de scenario's bij $T=20$ en $T=50$

Scenario	Duur van overschrijding (in dagen) bij $T=20$ jaar	Duur van overschrijding (in dagen) bij $T=50$ jaar
REF_b2050	45	105
REF_b2018	25	60
REF_b2000	2	40
WHdry_b2050	120	148
WHdry_b2018	90	120
WHdry_b2000	53	100

Problemen met de wateraanvoer naar de Twentekanalen door lage waterstanden worden in de toekomst (veel) groter. Klimaatverandering heeft een groter effect dan bodemerisatie. Het verschil in overschrijdingsduur als gevolg van klimaatverandering ($WHdry_b2018 - REF_b2018$) is ongeveer even groot als het verschil in overschrijdingsduur tussen de twee uiterste rivierbodempliggingen (2000 en 2050)

Gemiddeld zal in 2050 (klimaatscenario W_{Hdry}) bij handhaving van de huidige rivierbodempligging eens in de 10 jaar sprake zijn van overschrijding van het kritieke peil gedurende 50 dagen of langer (in het huidige klimaat is dit eens in de 40 jaar). Door rivierbodemerisatie (bodem 2050) en de daaraan gekoppelde verschuiving van de afvoerverdeling neemt deze frequentie toe tot eens in de 5 jaar.

⁵ 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 hoog uit.

Wanneer de rivierbodem wordt opgehoogd naar het niveau van het jaar 2000, dan neemt de frequentie af tot eens in de 20 jaar (in Whdry_2050).

Voor een situatie met gemiddelde herhalingsduur van 20 jaar zijn de verschuivingen in onderschrijdingsduur als volgt:

- Door klimaatverandering neemt de onderschrijdingsduur toe van 25 naar 90 dagen (bodem2018)
- Door het ophogen van bodem2018 naar bodem2000 neemt de onderschrijdingsduur af van 25 naar 2 dagen (huidig klimaat) en van 90 naar 53 dagen (Whdry_2050)

6.3.3 Watertekorten en landbouwschade voor verschillende bodemliggingen

In de hierna volgende tabellen en figuren zijn de resultaten per scenario voor de Zoetwaterregio IJsselmeergebied weergegeven. Naast watertekorten in Mm^3 per zomerhalfjaar zijn ook de veranderingen in de gemiddelde landbouwopbrengst, beregeningskosten, en de netto landbouwschade (opbrengst – kosten) weergegeven voor geheel Nederland. Watertekorten en landbouwschade worden getoond als gemiddelde per jaar (landbouwisico in termen van 'Expected Annual Damage': EAD; berekend over 100 jaar) en voor het extreem droge jaar 1976 (al dan niet getransformeerd naar een toekomstig klimaat). Hoewel de landbouwschade voor heel Nederland is berekend, zullen de verschillen vooral veroorzaakt worden door veranderingen in watertekort in regio Noord, aangezien de bodemerrosie via de afvoerverdeling met name de waterbeschikbaarheid voor deze regio beïnvloedt.

In Tabel 6.3 en Figuur 6.5 (links) zijn de gemiddelde resultaten weergegeven voor watertekort en (verandering in) landbouwschade. In het Stoom2050 scenario nemen de watertekorten gemiddeld toe met 54 tot 86 Mm^3 , (eerste regel Tabel 6.3) afhankelijk van de mate van bodemerrosie. Het landbouwisico neemt naar 2050 toe met 7,8 tot 10,4 miljoen euro per jaar (laatste regel in Tabel 6.3). Circa 15% van deze toename (1,6 van de 10,4 miljoen euro/jaar) is toe te schrijven aan doorgaande bodemerrosie (vergelijk Stoom_b2050 met Stoom_b2018; zie ook Figuur 6.6, links). Het ophogen van de bodem naar een situatie zoals in het jaar 2000 levert in Stoom2050 gemiddeld 2,6 miljoen euro/jaar op voor de landbouw, doordat meer water beschikbaar is voor beregening.

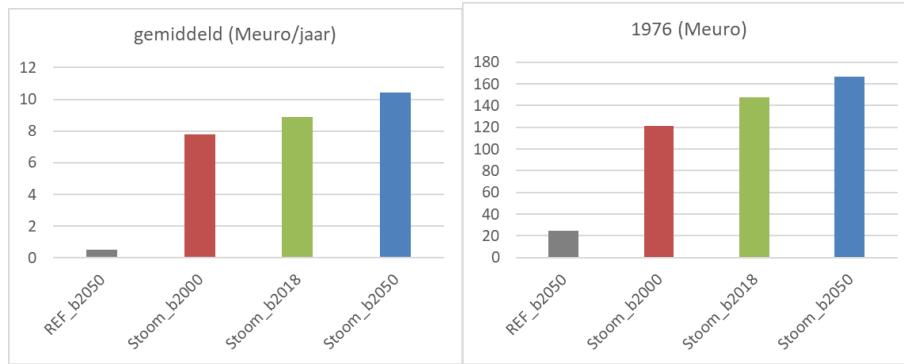
In Tabel 6.4 en Figuur 6.5 (rechts) zijn de resultaten voor een extreem droog jaar zoals 1976 weergegeven. De watertekorten nemen in Stoom2050 toe van 174 Mm^3 naar 949 - 1327 Mm^3 over het zomerhalfjaar (afhankelijk van de mate van bodemerrosie). Deze watertekorten betreffen voor een deel tekorten voor landbouwberging, waardoor de actuele opbrengst lager uitvalt dan de potentiële. In scenario Stoom2050 neemt de landbouwschade in een zeer droog jaar toe met 121 – 166 miljoen euro. Het aandeel van de bodemerrosie (b2050) daaraan is ongeveer 19 miljoen euro (vergelijk b2050 en b2018). In een zeer droog jaar (Stoom2050) kan bodemophoging zorgen voor 45 miljoen euro hogere landbouwopbrengst (bodem2000 ten opzichte van bodem2050, zie ook Figuur 6.6, rechts).

Tabel 6.3 Gemiddelde watertekorten (regio Noord) en verandering van de landbouwschade per jaar (heel NL) voor de vijf scenario's

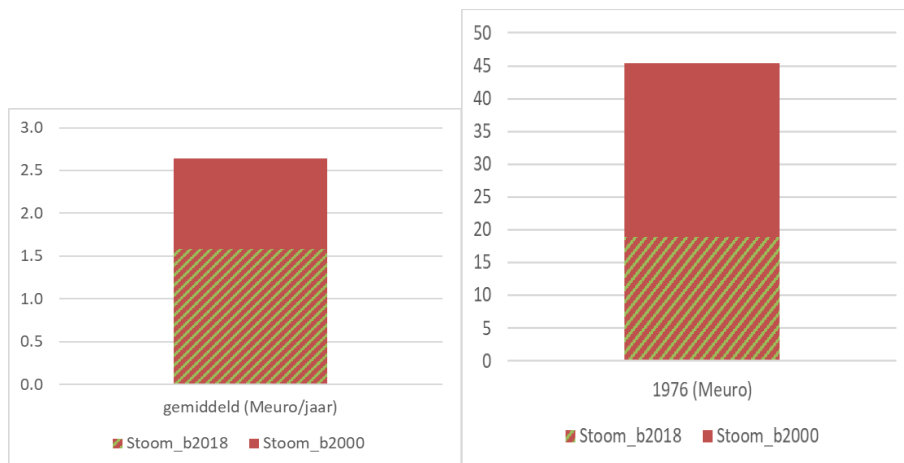
	<i>Basis_REF</i>	<i>Basis_REF_b2050</i>	<i>STOOM_b2000</i>	<i>STOOM_b2018</i>	<i>STOOM_b2050</i>
<i>Gemiddelde watertekorten per jaar (Mm3/zomerhalfjaar)</i>	5	10	59	70	91
<i>Verandering van de gemiddelde landbouwopbrengst per jaar (miljoen €) ten opzichte van Basis_REF</i>	0,0	-0,7	-12,2	-13,8	-16,3
<i>Verandering van de gemiddelde beregeningskosten per jaar (miljoen €), ten opzichte van basis_REF</i>	0,0	-0,2	-4,4	-4,9	-5,9
<i>Verandering in netto landbouwschade per jaar (miljoen €), ten opzichte van basis_REF</i>	0,0	0,5	7,8	8,9	10,4

Tabel 6.4: Watertekorten (regio Noord) en landbouwschade (heel NL) in 1976 voor de vijf scenario's

	<i>Basis_REF</i>	<i>Basis_REF_b2050</i>	<i>STOOM_b2000</i>	<i>STOOM_b2018</i>	<i>STOOM_b2050</i>
<i>Watertekorten in 1976 (Mm3/zomerhalfjaar)</i>	174	299	949	1086	1327
<i>Verandering van de gemiddelde landbouwopbrengst in 1976 (miljoen €), ten opzichte van basis_REF</i>	0,00	-32,3	-194,3	-232,2	-261,0
<i>Verandering van de gemiddelde beregeningskosten in 1976 (miljoen €), ten opzichte van basis_REF</i>	0,00	-7,3	-73,3	-84,7	-94,5
<i>Verandering in netto landbouwschade in 1976 (miljoen €), ten opzichte van basis_REF</i>	0,00	25,0	121,0	147,5	166,4



Figuur 6.5 Verandering in landbouwisico (gemiddelde schade in miljoen euro per jaar; links) en landbouwschade in extreem droog jaar 1976 (miljoen euro; rechts) ten opzichte van de huidige situatie (Ref_b2018)



Figuur 6.6 Netto effect van maatregelen tegen bodemerosie op de netto landbouwopbrengst in het Stoom2050 scenario. Links: gemiddelde per jaar, rechts: in het extreem droge jaar 1976 (let op de verschillen in schaal op de y-as). Een positief getal is te interpreteren als een 'baat', dus een toename van de opbrengst door meer waterbeschikbaarheid. Bodem2018 (b2018) komt overeen met het tegengaan van verdere erosie vanaf 2018 en Bodem2000 (b2000) is het verder ophogen van de bodem naar situatie zoals in het jaar 2000.

6.4 Conclusies

Voor de zoetwaterbeschikbaarheid is vooral gekeken naar de kans op watertekorten in Noord-Nederland en naar overschrijding van het kritieke peil voor waterinlaat naar de Twentekanalen bij sluis Eefde. De effecten voor West-Nederland (kans op watertekorten en verzilting) zijn in dit rapport buiten beschouwing gelaten omdat Asselman et al. (2022) hebben laten zien dat veranderingen in rivierbodempligging hier nauwelijks invloed op hebben.

- Uit de analyses blijkt dat de kans op watertekorten in Noord-Nederland in de toekomst groter wordt. Dit komt vooral door klimaatverandering en een grotere watervraag. De kans op een watertekort van 10% van de watervraag is nu 1:50 per jaar en bij scenario Stoom2050 neemt dat toe naar 1:8 tot 1:14 per jaar, afhankelijk van de rivierbodempligging (1:8 per jaar bij de verwachte ligging in 2050, 1:12 per jaar bij de huidige bodempligging en 1:14 per jaar bij de 2000-bodempligging).

- De grotere watertekorten treffen deels de beregende landbouw in Noord-Nederland. In het Stoom-scenario neemt het landbouwisico bij de huidige bodemligging toe met 8,9 miljoen euro per jaar. Bij doorgaande rivierbodemerisatie (bodem2050) kan dit oplopen tot 10,4 miljoen euro per jaar. Bij ophoging van de bodem tot de ligging in het jaar 2000 blijft de toename beperkt tot 7,8 miljoen euro per jaar. Ophoging van de bodem resulteert dus in een afname van het landbouwisico met ongeveer 2,6 miljoen euro per jaar ten opzichte van het nulalternatief IRM. Handhaving van de huidige bodemligging zou het risico met 1,6 miljoen euro per jaar verminderen.
- Ook de toevoer naar de Twentekanalen wordt beïnvloed door veranderingen in rivierwaterstanden als gevolg van een verandering in rivierbodemligging. Problemen met de wateraanvoer naar de Twentekanalen door lage waterstanden worden in de toekomst ook groter door klimaatverandering. Gemiddeld zal in 2050 (klimaatscenario WHdry) bij handhaving van de huidige rivierbodemligging eens in de 10 jaar sprake zijn van overschrijding van het kritieke peil gedurende 50 dagen of langer (in het huidige klimaat is dit eens in de 40 jaar). Door rivierbodemerisatie (bodem 2050) en de daaraan gekoppelde verschuiving van de afvoerverdeling neemt deze frequentie toe tot eens in de 5 jaar. Indien de rivierbodem zou worden opgehoogd naar het niveau van ongeveer het jaar 2000, dan neemt de frequentie af tot eens in de 20 jaar (in Whdry_2050).

7 Effectbepaling bevaarbaarheid

7.1 Inleiding

Transport over water vormt een belangrijk aandeel in het totale bulktransport in Nederland. De Rijnakken en de Maas zijn onderdeel van het hoofdvaarwegennetwerk (HVWN) van Nederland. De Waal en Boven-Rijn vormen bovendien een hoofdtransportas naar Duitsland. In dit hoofdstuk onderzoeken we hoe ophoging van de bodem de bevaarbaarheid van de Rijnakken in Nederland beïnvloedt. Ook kijken we naar het effect op de vaarkosten.

7.2 Methode

De volgende stappen zijn doorlopen:

- 1 Bepalen representatieve bodemhoogte voor de scheepvaart voor het nieuwe bodemscenario.
- 2 Analyse toestand watersysteem:
 - a Waterdiepte bij een afvoer van 1020 m³/s te Lobith (de huidige OLA);
 - b Aantal dagen van onderschrijding minimaal vereiste waterdiepte volgens de internationale afspraken.
- 3 Analyse impact scheepvaart:
 - a Verandering vrachtpotentieel;
 - b Verandering transportkosten.

Voor het toetsen van de waterdiepte voor de scheepvaart wordt gebruik gemaakt van de gemodelleerde waterstand in combinatie met een vooraf bepaalde representatieve bodemligging. In het IRM-nulalternatief is deze bodem overgenomen uit het project KlimaatBestendige Netwerken (KBN, waarin hetzelfde bodemscenario is gebruikt). Voor de 2000-bodem wordt de 'representatieve bodem 2018' gecorrigeerd met de aangenomen bodemhoogteverandering zoals weer gegeven in Figuur 2.2.

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 indicatoren voor scheepvaart berekend voor ieder punt langs de Rijnakken zoals is gedaan voor de effectbepaling van het nulalternatief (Asselman et al., 2022).

7.3 Resultaten

7.3.1 Toestand watersysteem

In paragraaf 4.4 is het effect van de 2000-bodem op de hydraulica besproken. Voor de scheepvaart zijn de volgende vaststellingen het meest relevant:

- De bodem is voor vrijwel de gehele Waal en IJssel hoger in 2000 dan in 2018. Er zijn enkele lokale uitzonderingen waar de bodem in 2000 lager ligt dan in 2018 (Sint Andries). De bodem op de Nederrijn/Lek is over het algemeen lager dan in 2018.
- De waterstand is over het algemeen hoger bij verhoogde bodem, hierdoor blijft in principe de waterdiepte gelijk.

- Echter, de rivierbodempligging van ongeveer 2000 leidt tot een verandering in afvoerverdeling bij lage afvoeren. De afvoer verschuift meer richting het Pannerdensch Kanaal ten koste van de Waal (en voor bepaalde afvoeren ook ten koste van de IJssel). Als gevolg hiervan neemt de waterdiepte op de Waal iets af en wordt deze iets hoger op de Nederrijn en IJssel.

7.3.1.1 Waterdiepte bij OLA

De waterdiepte is bepaald voor alle doorgerekende afvoeren voor alle drie de Rijntakken. In Figuur 7.1 is een selectie van de resultaten weergegeven voor de delen waar de waterdiepte het kleinste is. Hieronder wordt stilgestaan bij de belangrijkste verschillen tussen de bodem van 2000 en 2018. De verschillen tussen de bodem van 2018 en 2050 staan beschreven in het rapport over het nulalternatief.

Bovenrijn & Waal:

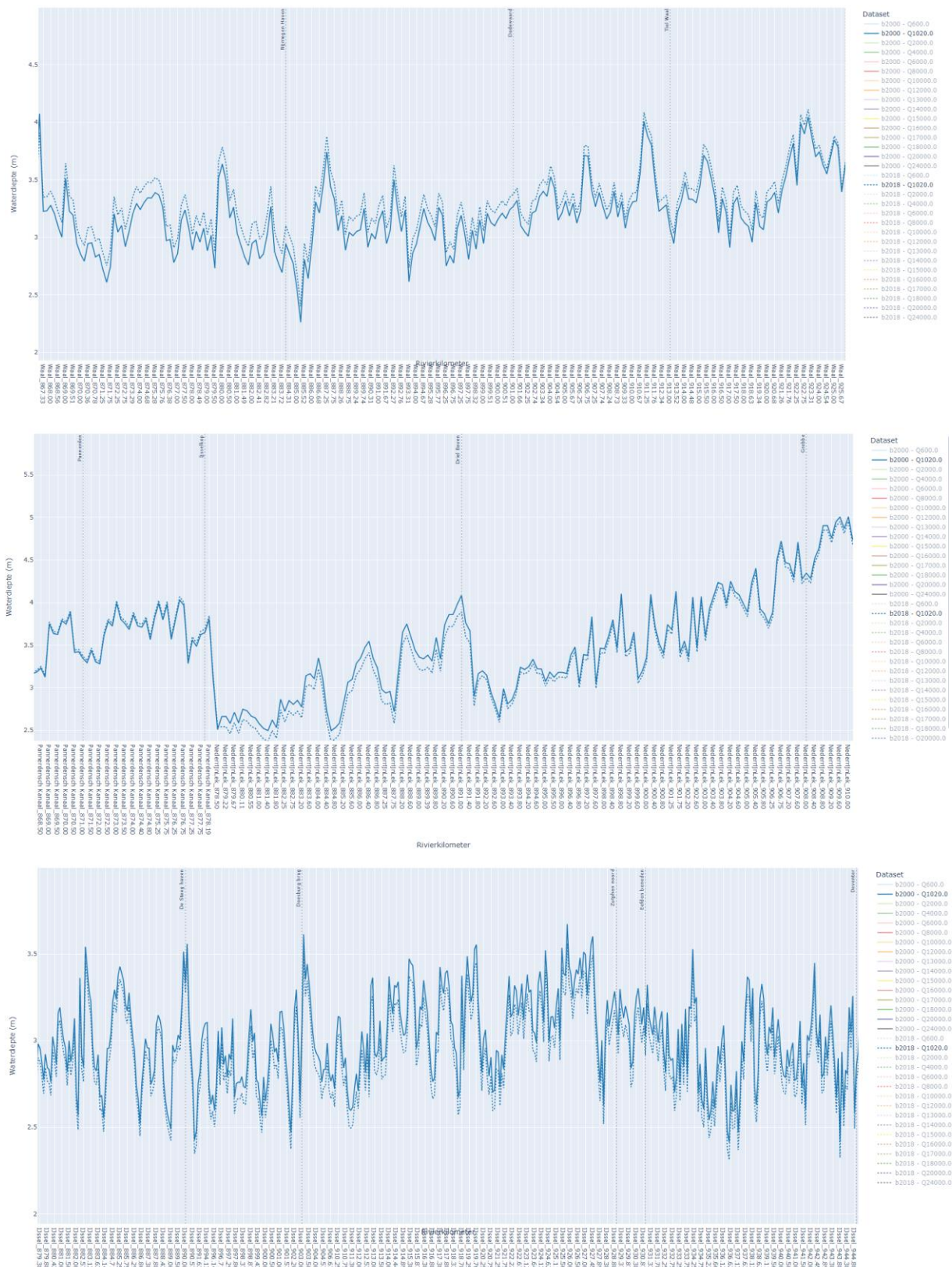
- De hogere bodempligging van de 2000 bodem op de Waal en het Pannerdensch Kanaal leidt tot hogere waterstanden op de Bovenrijn. De waterdiepte wordt hierdoor iets groter.
- Omdat er relatief minder afvoer naar de Waal gaat wordt de waterstand hier niet evenredig veel hoger met de verandering in bodempligging. Als gevolg hiervan is de waterdiepte op het bovenstroomse deel van de Waal iets kleiner.
- De waterdiepte bij het knelpunt net benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen wordt bij de 2000-bodempligging 15 cm minder ten opzichte van de waterdiepte met de bodem uit 2018. Het probleem wordt hier dus groter.
- De minimaal vereiste waterdiepte op de Waal bij OLA bedraagt 2,8 m. In de huidige situatie wordt op ongeveer drie locaties niet voldaan aan de scheepvaartseisen. De vereiste waterdiepte van 2,8 m wordt op dit moment meer dan 20 dagen onderschreden bij onder meer km 871 (een alluviale ondiepte bovenstrooms van de bodemkribben bij Erlecom) en bij km 885 (alluviale ondiepte in binnenbocht benedenstrooms van vaste laag Nijmegen). De locatie van de knelpunten verandert bij een hogere bodempligging niet. De waterdiepte neemt op deze locaties verder af (15 cm).
- Vanaf Sint Andries (rkm 924, niet afgebeeld in Figuur 7.1 ten behoeve van de leesbaarheid) is er geen noemenswaardig verschil meer in waterdiepte tussen de bodempligging in 2000 en 2018.

Nederrijn & Lek:

- Op het Pannerdensch Kanaal is geen noemenswaardig verschil in waterdiepte zichtbaar.
- Op de Nederrijn bovenstrooms van Driel is de waterdiepte zo'n 13 centimeter groter met de bodem van 2000 ten opzichte van die bij de bodem van 2018. Dit komt vooral door het verschil in afvoerverdeling waardoor er meer water richting de Nederrijn en IJssel gaat.
- Over de gehele Nederrijn/Lek is de waterdiepte groter met de bodem van 2000, het verschil neemt stroomafwaarts af van ongeveer 10 centimeters tot enkele centimeters.

IJssel:

- Op de IJssel is de waterdiepte met de bodem van 2000 zo'n 10 centimeter groter. Bij lage afvoeren gaat er iets meer afvoer richting de IJssel, waardoor de waterdiepte iets groter wordt ten opzichte van de situatie in 2018.
- Het verschil in waterdiepte is zichtbaar tot en met Katerveer, stroomafwaarts van die locatie zijn de waterdieptes bij de 2000- en 2018-bodempligging vergelijkbaar.



Figuur 7.1 Langsdoorsnede van de waterdiepte bij een afvoer van 1.020 m³/s bij Lobith bij de 2000 bodem (doorgetrokken lijn) en de bodem 2018 (stippellijn). Boven: Boven-Rijn en Boven-Waal; midden: Pannerdensch Kanaal en Nederrijn; onder: Boven-IJssel.

7.3.1.2 Beschikbaarheid vereiste waterdiepte

Tabel 7.1 geeft een overzicht van het 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. Uit de tabel blijkt het volgende:

- Op dit moment wordt op de Boven-Waal over een lengte van 5% van het totale traject niet voldaan aan de vereiste waterdiepte bij OLA.
- 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 bodemerrosie zal op ongeveer 40% van de Boven-Waal niet aan de vereiste waterdiepte worden voldaan: een kleine verbetering.
- Wanneer de bodem op de Rijntakken wordt teruggebracht naar de ligging rond het jaar 2000, dan zal door verschuiving van de afvoerverdeling in 2050 meer dan 60% van dit traject niet voldoen aan de vereiste waterdiepte.
- Op de IJssel voldoet op dit moment ongeveer 5% van het traject Boven-IJssel niet aan de gestelde eis. Door klimaatverandering neemt dit toe tot meer dan 50%. Bij doorgaande rivierbodemerrosie en verschuiving van de afvoerverdeling kan dit zelfs ongeveer 85% worden.
- Wanneer de rivierbodem wordt opgehoogd tot de ligging in ongeveer het jaar 2000, dan voldoet 'slechts' 43% van dit traject niet aan de vereiste diepte. De verschuiving van de afvoerverdeling verbetert de bevaarbaarheid op de IJssel.

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			Bodemligging 2000		
		huidig klimaat	W _{Hdry} 2050	G _L 2050	huidig klimaat	W _{Hdry} 2050	G _L 2050	huidig klimaat	W _{Hdry} 2050	G _L 2050
		1020 m ³ /s	866 m ³ /s	1124 m ³ /s	1020 m ³ /s	866 m ³ /s	1124 m ³ /s	1020 m ³ /s	866 m ³ /s	1124 m ³ /s
Boven-Rijn	2.8	0	0	0	0	11	0	0	0	0
Boven-Waal	2.8	5	49	1	8	39	1	17	63	4
Midden-Waal	2.8	1	18	0	0	4	0	3	35	1
Beneden-Waal	3.4	0	1	0	0	0	0	0	2	0
Boven-Merwede	4.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pannerdensch Kanaal	2.8	0	5	0	0	9	0	0	7	0
Boven-Nederrijn	2.8	45	65	37	60	85	50	37	58	24
Midden-Nederrijn	3.7	28	28	27	27	34	27	26	26	26
Beneden-Nederrijn	3.6	8	32	5	16	38	15	5	28	3
Lek	3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Boven-IJssel	2.5	6	55	0	24	84	3	2	43	0
Midden-IJssel	2.5	3	40	1	18	73	3	1	27	0
Sallandse IJssel	2.6	0	8	0	3	23	0	0	3	0
Beneden-IJssel	3.2	4	6	2	7	8	5	2	4	1

7.3.1.3 Bereikbaarheid havens, kades en sluizen

Voor de bodem van 2000 is ook bepaald wat het effect is op de bereikbaarheid van de havens, kades en sluizen. Voor de vergelijkbaarheid zijn ook de resultaten voor de bodem van 2050 weergegeven (uit Asselman et al., 2022).

Uit deze vergelijking blijkt dat zowel Weurt als de Prins Bernhardsluis in Deventer met de bodem van 2018 minder goed bereikbaar zijn dan met de bodem uit 2000. Bij de verwachte bodemligging in 2050 zal de waterdiepte boven de sluisdrempels nog verder afnemen. Dit is een logisch gevolg van het eroderen van de rivierbodem en het dalen van de waterstand op de riviertakken, terwijl de sluizen niet mee eroderen. Overigens is het effect van klimaatverandering op de bereikbaarheid groter dan dat van de bodemerrosie. Zo wordt bij de westsluis van Sluis Weurt op dit moment gedurende ruim 16 dagen niet voldaan de gewenste waterdiepte. Bij ophoging van de bodem naar de ligging in het jaar 2000 neemt dit af tot 11 dagen. Echter, wanneer ook rekening wordt gehouden met klimaatverandering, dan wordt gedurende 34 dagen niet voldaan aan de gewenste waterdiepte. Ofwel, het ophogen van de bodem heeft een gunstig effect op de waterdiepte bij sluizen, maar kan niet voorkomen dat in de toekomst niet aan de gewenste waterdiepte wordt voldaan.

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 rivierbodemerosie en klimaatverandering

Bodemscenario	Waterdiepte (m) bij 1.020 m ³ /s Lobith			Aantal dagen overschrijding van gewenste waterdiepte (2.8 m / 2.5 m)					
	Bodem 2000	Bodem 2018	Bodem 2050	Bodem 2000	Bodem 2018	Bodem 2050	Bodem 2000	Bodem 2018	Bodem 2050
Klimaatscenario	-	-	-	Ref	Ref	Ref	W _{Hdry} 2050	W _{Hdry} 2050	W _{Hdry} 2050
Sluis Weurt (westsluis)	3,7	3,6	3,4	11,2	16,5	26,5	33,7	42,4	57,0
Prins Bernhardsluis Tiel	5,0	5,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sluit St Andries	4,8	4,6	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sluis Eefde	4,6	4,7	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0
Prins Bernhardsluis Deventer	3,1	3,0	2,8	25,9	34,2	51,4	56,1	66,9	87,6
Spoolersluis Zwolle	4,4	4,4	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

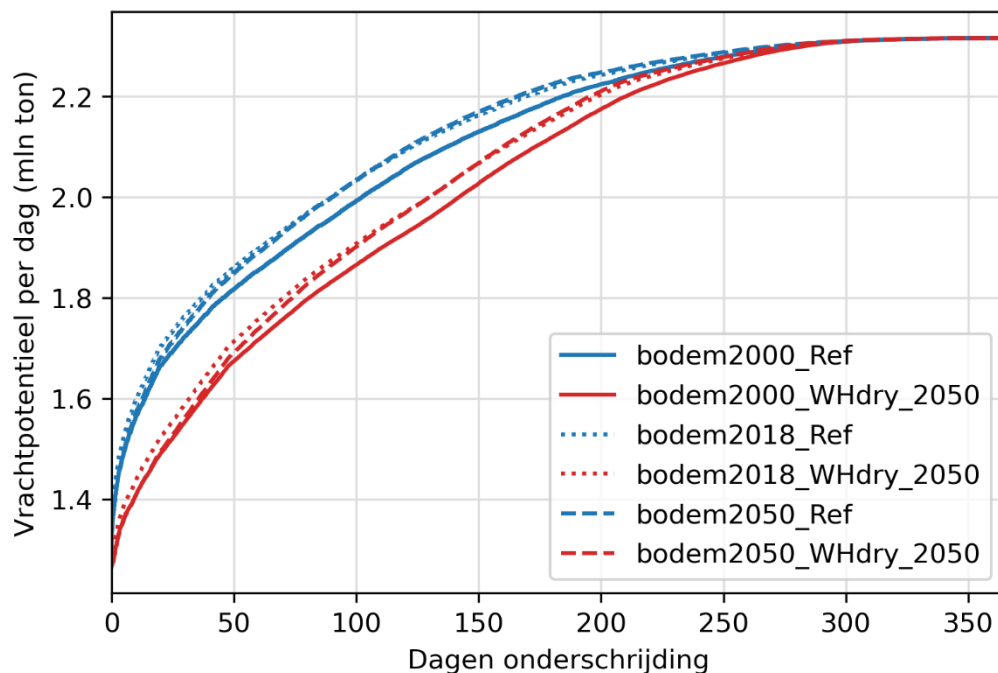
7.3.2 Impact scheepvaart

7.3.2.1 Afname vrachtpotentieel

Met een afname in vaardiepte kan minder vracht worden meegenomen. Omdat de Waal de belangrijkste transportader is zal er in de situatie van de 2000-bodemligging een lager vrachtpotentieel⁶ zijn.

⁶ 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.

Dit is te zien in Figuur 7.2 waar het vrachtpotentieel bij de bodem van het jaar 2000 stelselmatig lager is dan bij de huidige bodemligging (2018) en ook lager dan bij de bij doorgaande bodemerrosie verwachte bodemligging in 2050.



Figuur 7.2 Vracht die gemiddeld vervoerd wordt per dag als ieder schip met de maximaal mogelijke beladingsgraad en diepgang vaart. Weergegeven als functie van het aantal dagen onderschrijding (links de lage afvoeren), en de verandering door rivierbodemerrosie (bodem 2000, doorgetrokken lijn, bodem 2018 stippellijn en bodem 2050 met streepjeslijn) en klimaatverandering.

In Tabel 7.3 zijn de resultaten gepresenteerd per jaar en per dag met lage rivierafvoeren voor zowel heel Nederland als voor alleen de Waal en IJssel. In deze tabel is de bodem van het jaar 2000 als referentie genomen en zijn de veranderingen in klimaat en bodemligging uitgedrukt als verschil ten opzichte van die situatie.

Uit de analyse komt, net als in Figuur 7.2, naar voren dat het vrachtpotentieel bij de 2000-bodem lager is dan bij de bodemligging in 2018 en 2050. Op jaarbasis leidt ophoging van de rivierbodem naar de situatie van 2000 tot een afname van het vrachtpotentieel met 1% als alle andere factoren gelijk worden gehouden. Het vrachtpotentieel gedurende een droge dag is bij de bodem van 2000 en die van 2050 vrijwel gelijk. De afname in vrachtpotentieel is met name het gevolg van de afname in vrachtpotentieel op de Waal. Omdat meer vracht wordt vervoerd over de Waal compenseert de toename van het vrachtpotentieel op de IJssel en Nederrijn niet de afname op de Waal.

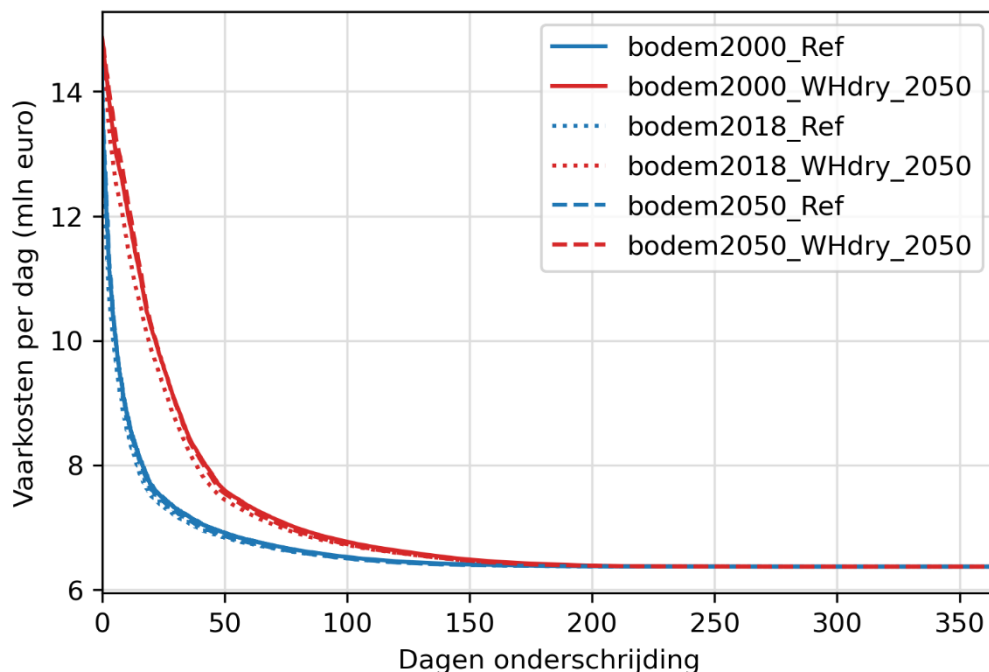
Op de IJssel is het vrachtpotentieel nagenoeg gelijk bij de bodem van 2000 en die van 2018. Op deze riviertak is het vrachtpotentieel voor de situatie in 2050 met geërodeerde bodem kleiner dan die bij de bodem van 2000 (en 2018).

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	Afname	Vrachtpotentieel [10 ⁶ ton] op droge dag*	Afname
Heel NL	Bodem-2000, zonder droogte	845.4	0%	2.32	0%
	Bodem-2000, huidig klimaat	769.0	-9%	1.67	-28%
	Bodem-2000, klimaatverandering	743.1	-12%	1.49	-36%
	Bodemerosie_2018, huidig klimaat	777.0	-8%	1.70	-26%
	Bodemerosie_2050, huidig klimaat	776.5	-8%	1.68	-27%
Waal	Bodem-2000, zonder droogte	319.9	0%	0.88	0%
	Bodem-2000, huidig klimaat	251.7	-21%	0.31	-64%
	Bodem-2000, klimaatverandering	229.9	-28%	0.18	-80%
	Bodemerosie_2018, huidig klimaat	259.0	-19%	0.35	-61%
	Bodemerosie_2050, huidig klimaat	257.8	-19%	0.32	-64%
IJssel	Bodem-2000, zonder droogte	27.6	0%	0.08	0%
	Bodem-2000, huidig klimaat	24.3	-12%	0.04	-46%
	Bodem-2000, klimaatverandering	22.7	-18%	0.03	-66%
	Bodemerosie_2018, huidig klimaat	24.4	-12%	0.04	-45%
	Bodemerosie_2050, huidig klimaat	24.1	-13%	0.04	-52%

7.3.2.2 Toename vaarkosten

Er van uitgaande dat de vracht uit de referentiesituatie nog steeds vervoerd moet worden zal het aantal reizen toenemen als het vrachtpotentieel afneemt. Als gevolg hiervan stijgen de vaarkosten. Dit is niet per definitie de economische schade, maar geeft een beeld van de kosten om de goederen te vervoeren. De resultaten zijn getoond in Figuur 7.3 en Tabel 7.4. Een samenvattend overzicht van de vaarkosten per jaar bij gemiddelde rivierbodempliggingen is te zien in Tabel 7.5.



Figuur 7.3 Transportkosten per dag als het vrachtransport over water gelijk blijft. Weergegeven als functie van het aantal dagen onderschrijving (links de lage afvoeren), en de verandering door rivierbodemerisatie (bodem 2000, doorgetrokken lijn, bodem 2018 stippellijn en bodem 2050 als streepjeslijn) en klimaatverandering.

De vaarkosten zijn (iets) hoger in de situatie met de bodem van 2000 ten opzichte van die bij de bodem uit 2018 en vergelijkbaar (maar iets hoger) aan die met de bodem van 2050. Dit is het gevolg van de veranderde afvoerverdeling waardoor er minder water beschikbaar is voor de Waal, waar het grootste deel van de vaarkosten worden gemaakt. Op de IJssel zijn de vaarkosten voor 2000 en 2018 zo goed als gelijk, maar zijn deze hoger voor de situatie met de bodem uit 2050. Opgemerkt wordt dat de hier gegeven berekende effecten gelden voor alle schepen die Nederland (of deeltraject Waal of IJssel) passeren.

Voor een deel van de scheepvaart ligt de *maatgevende* ondiepte echter in het buitenland. Daarom mag eigenlijk niet de gehele toename in de vaarkosten worden toegeschreven aan dieptebeperkingen op de Nederlandse vaarwegen.

Voor alle situaties geldt dat het effect van klimaatverandering op de vaarkosten vele malen hoger is dan de verandering als gevolg van bodemerisatie (de rode lijnen in Figuur 7.3 liggen hoger dan de blauwe lijnen). Met name op de Waal is de toename in vaarkosten door klimaatverandering vele malen hoger dan die als gevolg van verschillen in bodemligging.

Tabel 7.4 Vaarkosten (mln. euro) gemiddeld 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	Toename	Vaarkosten [10 ⁶ euro] op droge dag*	Toename
Heel NL	Bodem-2000, zonder droogte	2325		6.37	
	Bodem-2000, huidig klimaat	2431	5%	7.68	21%
	Bodem-2000, klimaatverandering	2562	10%	10.20	60%
	Bodem_2018, huidig klimaat	2418	4%	7.50	18%
	Bodem_2050, huidig klimaat	2427	4%	7.61	19%
Waal	Bodem-2000, zonder droogte	1225		3.35	
	Bodem-2000, huidig klimaat	1325	8%	4.59	37%
	Bodem-2000, klimaatverandering	1446	18%	6.94	107%
	Bodemerosie_2018, huidig klimaat	1313	7%	4.42	32%
	Bodemerosie_2050, huidig klimaat	1321	8%	4.53	35%
IJssel	Bodem-2000, zonder droogte	93		0.25	
	Bodem-2000, huidig klimaat	96	3%	0.29	14%
	Bodem-2000, klimaatverandering	102	10%	0.38	50%
	Bodem_2018, huidig klimaat	96	4%	0.29	15%
	Bodem_2050, huidig klimaat	97	5%	0.30	19%

Tabel 7.5 Vaarkosten per jaar (in miljoen euro) voor heel Nederland, bij verschillende rivierbodempliggingen voor zowel het huidige als bij veranderd klimaat

	Huidig klimaat	Toename (mln. €)	Toename (%)	Klimaat 2050 (W _{Hdry})	Toename (mln. €)	Toename (%)
Bodem_2018	2.418			2.538		
Bodem-2000	2.431	13	0,5%	2.562	24	0,9%
Bodem_2050	2.427	9	0,4%	2.560	22	0,9%

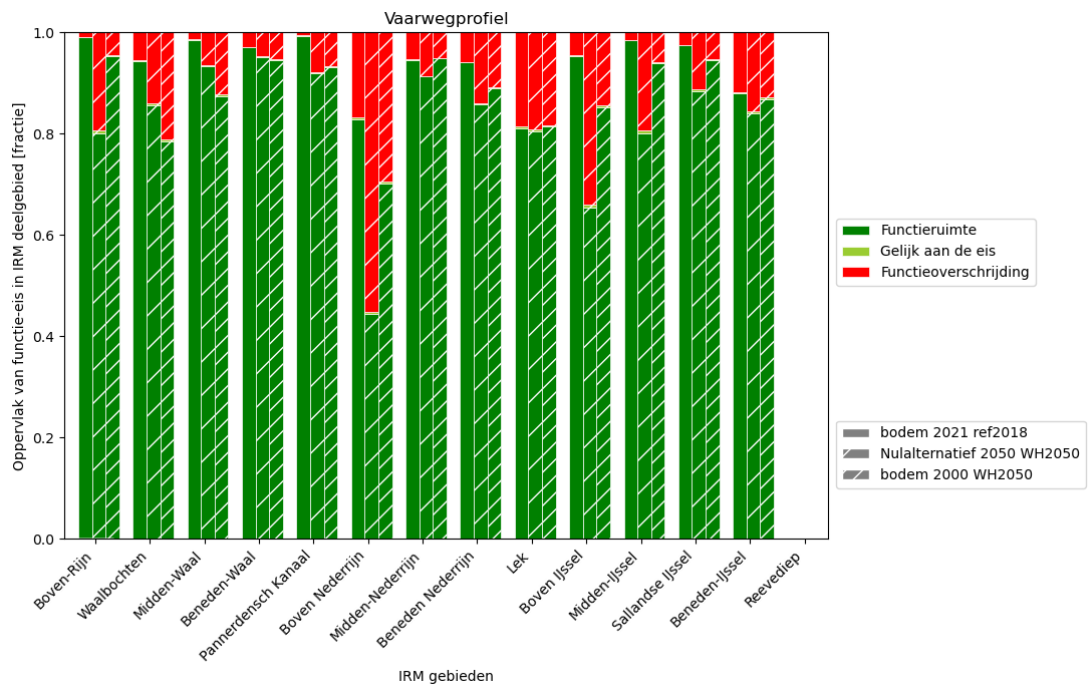
In Tabel 7.6 zijn de vaarkosten uitgedrukt ten opzichte van drogere jaren met een bepaalde herhalingstijd. In deze tabel zijn dezelfde trends zichtbaar die eerder zijn genoemd, namelijk dat in drogere jaren (grotere herhalingstijd) de vaarkosten bij de bodempligging in 2050 meer toenemen dan bij de bodempligging rond het jaar 2000.

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).

		Vaarkost en 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, bodem 2000	2325	48	259	918
	Klimaatverandering, bodem 2000		141	585	1483
	Bodemerosie_2018		41	229	830
	Klimaatverandering & bodemerosie_2018		124	529	1386
	Klimaatverandering & bodemerosie_2018 & economische groei	3648	188	795	2069
	Bodemerosie_2050	2325	43	251	926
	Klimaatverandering & bodemerosie_2050		135	589	1496
	Klimaatverandering & bodemerosie_2050 & economische groei		3648	205	886
Waal	Referentie, bodem 2000	1225	46	244	855
	Klimaatverandering, bodem 2000		133	544	1353
	Bodemerosie_2018		39	215	771
	Klimaatverandering & bodemerosie_2018		117	491	1263
	Klimaatverandering & bodemerosie_2018 & economische groei	2026	179	751	1930
	Bodemerosie_2050	1225	42	238	863
	Klimaatverandering & bodemerosie_2050		128	548	1371
	Klimaatverandering & bodemerosie_2050 & economische groei		2026	197	838
IJssel	Referentie, bodem 2000	93	1	8	37
	Klimaatverandering, bodem 2000		4	24	81
	Bodemerosie_2018		1	8	37
	Klimaatverandering & bodemerosie_2018		4	24	81
	Klimaatverandering & bodemerosie_2018 & economische groei	108	5	28	91
	Bodemerosie_2050	93	1	11	53
	Klimaatverandering & bodemerosie_2050		5	35	103
	Klimaatverandering & bodemerosie_2050 & economische groei		108	6	40

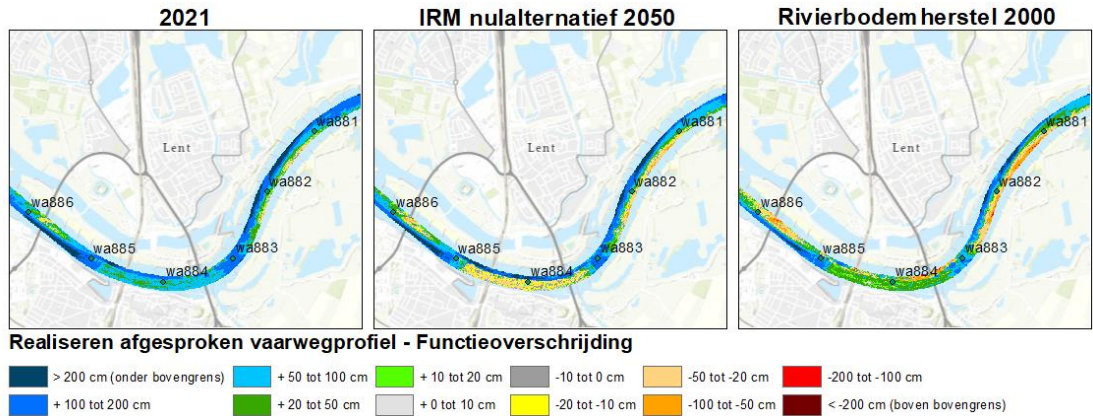
7.3.3 Aanvullende bevindingen BRL

Ook met de BRL is getoetst waar in de vaarweg niet voldaan wordt aan de minimaal vereiste waterdiepte. Een samenvattend overzicht wordt gegeven in Figuur 7.4. Deze figuur toont per IRM traject in groen het deel dat aan de gestelde vaardiepte voldoet voor het zichtjaar 2050 voor zowel de geërodeerde bodem 2050 als voor de situatie waarbij de rivierbodempligging wordt hersteld naar de situatie rond het jaar 2000. In de figuur is te zien dat in de huidige situatie op bijna alle trajecten al een beperkt aantal locaties zijn waar de bodempligging niet aan de internationale afspraken over de vereiste vaardiepte voldoet (rood). Verder is zichtbaar dat de trajecten met beperkingen in de vaardiepte zullen toenemen op met name de Bovenrijn, de Boven-Nederrijn en de Boven- en Midden-IJssel voor de 250-bodempligging. Dit komt vooral door klimaatverandering. Het effect van de lagere waterstanden door klimaatverandering treedt ook op bij herstel van de rivierbodempligging naar die van ongeveer het jaar 2000, want op alle trajecten neemt de fractie van het traject waar niet aan de vereiste vaardiepte kan worden voldaan toe t.o.v. de huidige situatie.



Figuur 7.4 De fractie van ieder IRM-traject dat nu (huidige bodempligging en huidig klimaat), bij het nulalternatief IRM in 2050 of bij rivierbodempligging naar het zichtjaar 2000 (beide met veranderend klimaat) niet voldoet (rood) aan de gestelde eis voor de minimale vaardiepte.

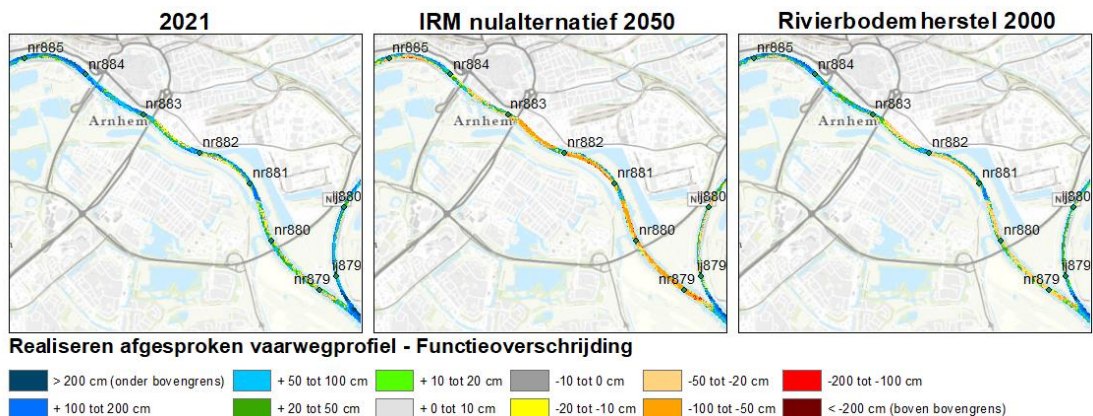
In de vorige paragraaf bleek al dat het belangrijkste knelpunt op de Waal nu wordt gevormd door een alluviale ondiepte benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen. Figuur 7.5 toont in welke mate de waterdieptes rond Nijmegen aan de gestelde eisen voldoen. De linker figuur toont de huidige situatie. Hieruit blijkt dat de ondieptes zich vooral voordoen in de binnenbochten boven- en benedenstrooms van de vaste laag. In 2050 (middenkaart) verandert dit beeld. De vaste laag vormt dan zelf een grootschalig knelpunt aangezien de bodem rondom de vaste laag erodeert en de waterstanden dalen, maar de vaste laag op hetzelfde niveau blijft. Met de uitvoering van rivierbodempligging (rechterkaart) wordt de bodem op de Boven-Waal opgehoogd waardoor de waterstand hier hoger wordt. De waterdiepte wordt echter op veel plaatsen op de Waal toch kleiner, omdat er meer afvoer richting de IJssel gaat.



Figuur 7.5 Vaardieptebeperkingen nabij Nijmegen, zoals bepaald met de BRL voor 2021 (links), 2050 (midden) en 2000 (rechts). Blauwe kleuren geven aan dat de diepte voldoende is. Gele, oranje en rode kleuren duiden op beperkingen in de vaardiepte.

Voor het zichtjaar 2050 verschuift door de doorgaande rivierbodemerose op de Waal de afvoerverdeling richting de Waal. Dit zorgt voor een lagere laagwaterstand en dus minder vaardiepte op de Nederrijn en IJssel. Figuur 7.6 (middelste kaart) toont dat dit voor meerdere locaties resulteert in een tekort van 50 tot 100 cm (donker oranje) in de minimale vereiste vaardiepte.

Door rivierbodembodemherstel naar de situatie rond het jaar 2000 wordt de bodem op de Waal meer opgehoogd dan op de andere takken, waardoor de waterstand daar stijgt en er meer afvoer richting de IJssel en Nederrijn gaat. Zowel door de verschuiving in afvoerverdeling als door een hogere rivierbodempligging op de Boven-IJssel en Nederrijn is er voor de bodempligging van 2000 een veel kleinere afname in de laagwaterstand van 0 tot 10 cm op de IJssel en Nederrijn/Lek zichtbaar vergeleken met de 70 tot 80 cm lagere laagwaterstand voor het nulalternatief. Het rivierbodembodemherstel met gemiddeld 10 cm ophoging zorgt samen met klimaatverandering in een afname van de waterdiepte t.o.v. de huidige situatie, maar de afname is veel minder dan het geval is voor het nulalternatief. Dit is zowel in Figuur 7.4 als Figuur 7.6 goed zichtbaar.



Figuur 7.6 Vaardieptebeperkingen stuwpand Driel bij Arnhem, zoals bepaald met de BRL voor 2021 (links), 2050 (midden) en 2000 (rechts)

7.4 Conclusies

In hoofdstuk 4 zijn de gevolgen van veranderingen in de bodemligging voor de hydraulica gepresenteerd. In dit hoofdstuk is de impact hiervan op de scheepvaart bepaald. De volgende conclusies kunnen nu worden getrokken:

- Als gevolg van bodemerosie sinds het jaar 2000 is de afvoer naar de Waal toegenomen, ten koste van die over de Nederrijn en IJssel. Het gevolg hiervan is dat in 2000 de waterdiepte op de Waal bij dezelfde Rijnafvoer geringer was dan in 2018 bij kleinere dan gemiddelde afvoeren. Ofwel: ophoging van de rivierbodem naar de situatie van jaar 2000 leidt tot kleinere waterdiepten op de Waal.
- Bij doorgaande bodemerosie zal in 2050 de fractie van de Rijnafvoer die over de Waal gaat verder toenemen. De waterdiepte op de Waal wordt hierdoor groter. 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 zou moeten worden met meer kielspeling, dan neemt de beschikbare vaardiepte voor de schepen, ondanks de hogere afvoer, toch iets af.
- Op de IJssel leidt de 2000-bodemligging tot een maximaal ongeveer 10 cm grotere waterdiepte. Dit komt door het herstel van de afvoerverdeling. Het effect op het vrachtpotentieel en daarmee op de vaarkosten is echter zeer klein. Wanneer de rivierbodemerosie zou doorzetten tot de verwachte ligging in 2050, dan zal er minder vervoerd kunnen worden over de IJssel doordat er minder afvoer over de IJssel gaat (kleinere waterdieptes).
- De 2000-bodemligging leidt tot iets grotere waterdieptes op de Nederrijn, met name op het traject bovenstrooms van Driel: ongeveer 10 cm groter. Ook dit is een gevolg van de verandering in afvoerverdeling, waarbij stuw Driel al in een eerder stadium open gaat en meer afvoer stuurt over de Nederrijn.
- De bereikbaarheid van sluis Weurt en de Prins Bernhardsluis bij Deventer wordt bij de 2000-bodem beter. Als de bodemerosie doorzet, zal de bereikbaarheid echter afnemen.
- In de huidige situatie (bodem 2018) voldoet de waterdiepte op een beperkte aantal locaties op de Waal niet aan de internationale afspraken. Door klimaatverandering neemt het aantal knelpunten toe. Op de Boven-Waal zal dan op ongeveer de helft van het traject niet aan de gewenste waterdiepte worden voldaan. Bij de 2000-bodem neemt dit percentage toe tot meer dan 60%, terwijl het bij doorgaande rivierbodemerosie juist afneemt naar 40%.
- De vaarkosten op de Waal maken een groot deel uit van de totale vaarkosten van de binnenvaart. Als gevolg hiervan zorgt een *afname* in vaardiepte bij de 2000-bodem voor een *toename* van de vaarkosten over heel Nederland met ongeveer 1% (24 miljoen euro).
- Bij doorzettende bodemerosie tot 2050 zullen de vaarkosten eveneens *toenemen* ten opzichte van een situatie waarbij de huidige bodemligging wordt gehandhaafd (22 miljoen euro). Dit komt doordat is aangenomen dat meer kielspeling nodig is boven vaste lagen. Wanneer uit zou zijn gegaan van een gelijke eis voor de benodigde kielspeling, dan zouden de vaarkosten bij deze bodemligging juist lager uitvallen).
- De totale vaarkosten worden sterk beïnvloed door de vaarkosten op de Waal. Wanneer enkel naar de vaarkosten op de IJssel wordt gekeken, dan zullen daar de vaarkosten als gevolg van klimaatverandering altijd toenemen, maar die toename is minder groot wanneer de bodem wordt opgehoogd. Bij doorgaande erosie is de toename juist nog groter.
- Het effect van klimaatverandering (scenario W_{dry}) is vele malen groter dan het effect van verschillende rivierbodemliggingen.

8 Waterveiligheid

8.1 Inleiding

De in dit hoofdstuk besproken analyse is een aanvulling op de effectbepaling van het IRM nulalternatief (Asselman et al., 2022). De verandering ten opzichte van de eerder geanalyseerde sommen is dat ook de effecten zijn bepaald van een bodemligging vergelijkbaar met die omstreeks het jaar 2000. Deze analyse is alleen uitgevoerd voor de Rijntakken.

Voor alle berekeningen is verondersteld dat de rivier niet is verruimd ter compensatie van het waterstandseffect.

8.2 Methode

Voor deze aanvullende analyse is dezelfde methode gebruikt als bij het bepalen van de effecten van het IRM nulalternatief. Dit komt er in het kort op neer dat de resultaten van de hydraulische berekeningen (zie hoofdstuk 4) zijn gebruikt als invoer voor OKADER om de dijkversterkingsopgave te bepalen. Hierbij wordt gekeken naar de opgaven voor de faalmechanismen overloop/overslag, piping en macrostabiliteit. Ook zijn de kosten voor de benodigde dijkversterking geraamd. Voor meer informatie wordt verwezen naar hoofdstuk 8 in Asselman et al. (2022).

Behalve naar de dijkversterkingsopgave is ook gekeken of de regelwerken in de (gewenste) middenstand komen te staan, of dat één of meer regelwerken geheel dicht of open komen te staan.

Asselman et al. (2022) hebben berekeningen uitgevoerd voor de versterkingsopgave bij:

- De huidige rivierbodempligging en zonder rekening te houden met klimaatverandering (klimaat 2018 en bodem 2018)
- Het nulalternatief IRM, waarbij is uitgegaan van de bodempligging in 2050 in combinatie met klimaatverandering (W+ scenario).

In deze studie wordt daar de volgende berekening aan toegevoegd:

- Ophoging bodem naar ongeveer de situatie rond het jaar 2000, in combinatie met klimaat 2050 (W+ scenario).

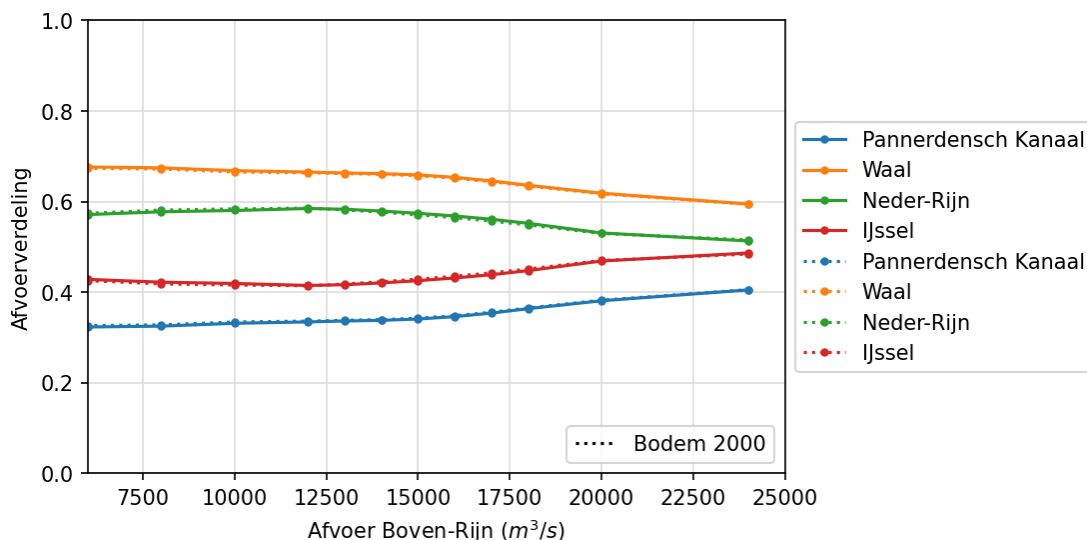
8.3 Resultaten

8.3.1 Afvoerverdeling en Waterstanden

Op de Rijntakken worden de waterstanden bepaald door onder meer de afvoerverdeling en de rivierbodempligging. De afvoerverdeling kan bij zeer hoge afvoeren worden beïnvloed met de regelwerken op de Pannerdensche Kop en de IJsselkop. In deze studie zijn de regelwerken in het model zo ingesteld dat zo goed mogelijk wordt voldaan aan de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling (BVA) behorend bij een afvoer van 17.000 m³/s te Lobith, waarbij de Nederrijn/Lek wordt ontzien.

De instelling van de regelwerken is te zien in Tabel 4.1. De daaruit voortkomende afvoerverdeling is te zien in Figuur 8.1.

Voor de afvoeren die relevant zijn voor hoogwaterbescherming ($\geq 6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith) is de verandering van de afvoerverdeling bij de huidige bodemligging en de 2000-bodemligging minimaal, ondanks enige bodemverhoging rondom het splitsingspunt. Wel laat Tabel 4.1 zien dat regelwerk Pannerden maximaal moet worden dichtgezet om dit te realiseren en dat zelfs dan nog niet helemaal kan worden voldaan aan de BVA. Dit resulteert in een verminderde afvoer naar de Waal en meer afvoer over de IJssel bij hogere afvoeren ($>13.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith). Dit verschil blijft echter onder de 0,5%. Bij een afvoer van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith wordt ongeveer $30 \text{ m}^3/\text{s}$ teveel water afgevoerd over het Pannerdensch Kanaal en de IJssel (zie ook Tabel 4.3). Bij regelwerk Pannerden is dus slechts sprake van regelbereik naar één kant⁷.



Figuur 8.1 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 Nederrijn.

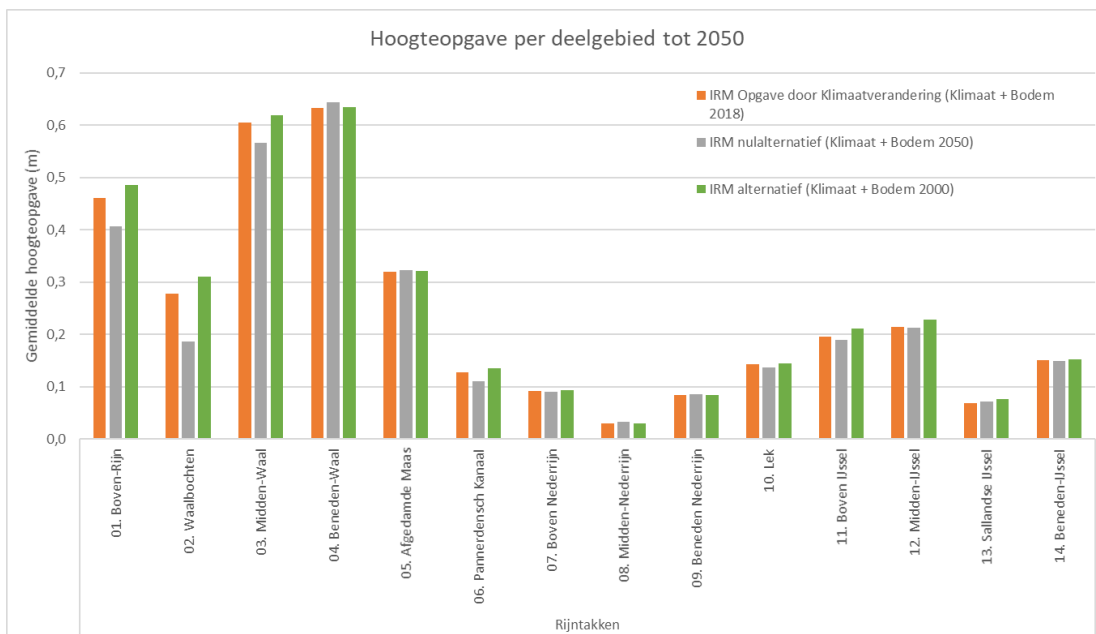
De waterstandsverschillen zijn te zien in Figuur 4.6 en Figuur 4.8. De waterstanden zijn bij de 2000-bodem bij hoogwater over het algemeen hoger. Uitzondering hierop zijn delen van de Beneden-Waal en Nederrijn. Bij de 2050 bodem zijn ze juist iets lager. Verschillen zijn beperkt en veelal kleiner dan 1 decimeter.

8.3.2 Versterkingsopgave

Hoogteopgave

Voor de meeste riviertrajecten resulteert de hogere 2000-bodemligging in een iets grotere hoogteopgave (Figuur 8.2). Alleen voor de Beneden-Waal geldt dat de hoogteopgave lager uitvalt voor de bodemhoogte omstreeks het jaar 2000. Dit komt doordat de bodem hier toen lager lag.

⁷ Omdat de BVA bij van een afvoer van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith bij de 2000-bodemligging niet meer goed kan worden gerealiseerd, mag worden aangenomen dat het realiseren van de BVA behorend bij een afvoer van $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith nog grotere problemen zal geven. Bij WBI is deze wijziging voorzien rond het jaar 2100.

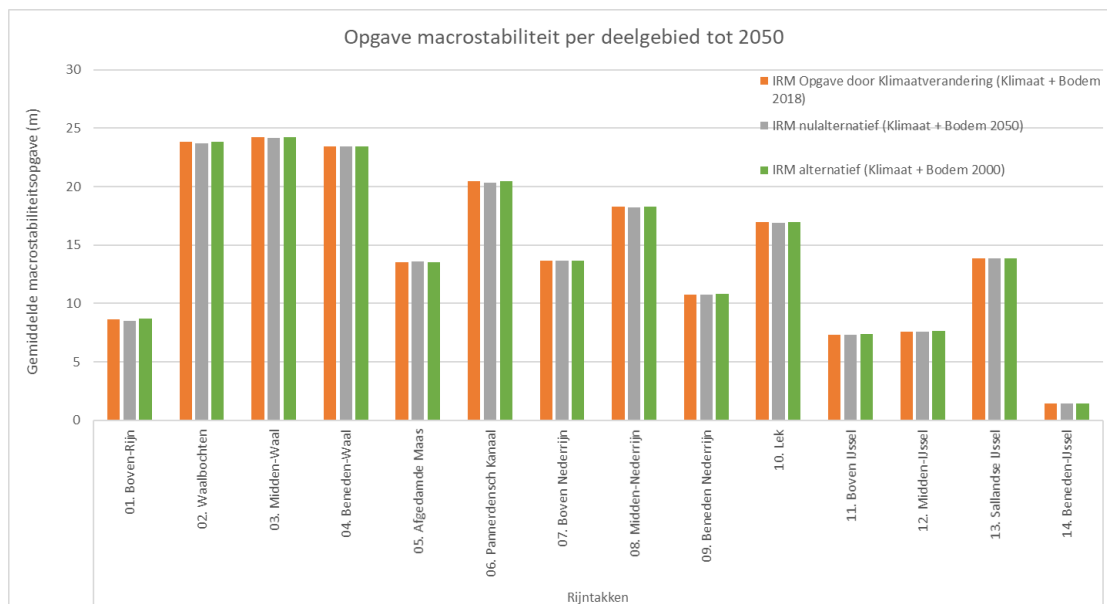


Figuur 8.2 Gemiddelde hoogteopgave per deelgebied. De opgaves zijn in beeld gebracht voor de huidige bodemligging (2018, oranje), de situatie met doorgaande bodemerrosie (= IRM nulalternatief met bodem 2050 in grijs) en de situatie met bodemligging op niveau 2000 (groen). Bij alle berekeningen is uitgegaan van het klimaat in 2050 volgens scenario W+. De “oranje en grijze opgave” corresponderen met de opgaves besproken in Asselman et al. (2022)

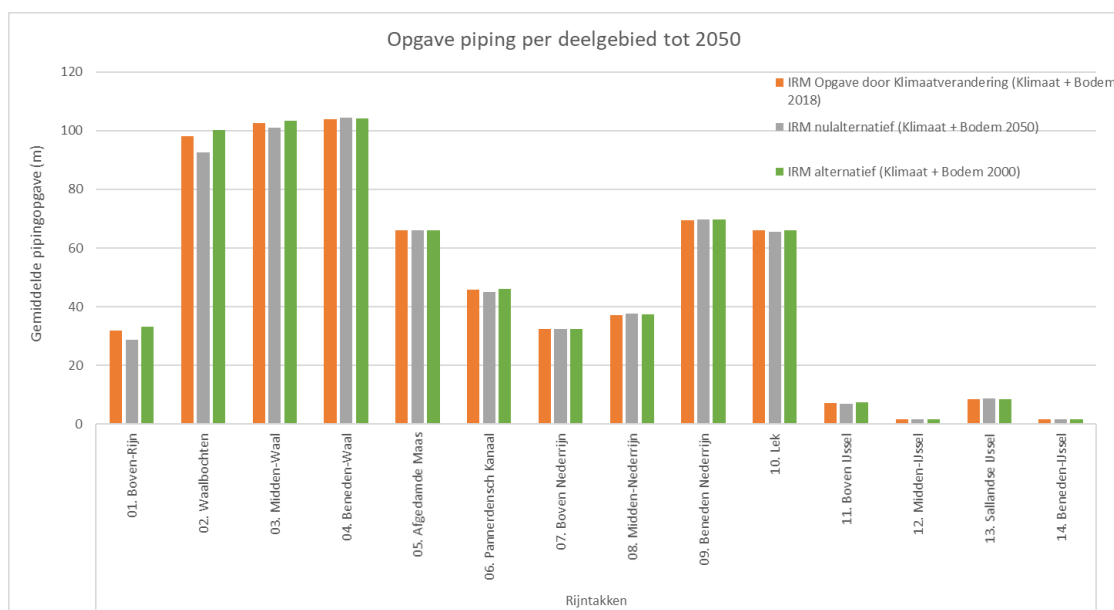
Macrostabiliteit- en pipingopgave

De verandering in de versterkingsopgave voor macrostabiliteit en piping als gevolg van een andere rivierbodempligging verschilt per traject, maar is klein. De meeste verandering tussen de drie rivierbodempliggingen is terug te vinden in het bovenstroomse deel van de Rijntakken (Boven-Rijn en Waalbochten). Dit is ook het deel waar de verschillen in bodemhoogte het grootst zijn.

De macrostabiliteit- en pipingopgave nemen licht toe bij een hogere bodempligging zoals die uit het jaar 2000. Voor macrostabiliteit is het relatieve verschil echter maximaal 2% (Boven-Rijn, zie Figuur 8.3). Voor de pipingopgave is het maximale verschil iets groter namelijk 13% (eveneens op de Boven-Rijn, zie Figuur 8.4).



Figuur 8.3 Gemiddelde opgave voor macrostabiliteit per deelgebied. De opgaves zijn in beeld gebracht voor de huidige bodemligging (2018, oranje), de situatie met doorgaande bodemerosie (= IRM nulalternatief met bodem 2050 in grijs) en de situatie met bodemligging op niveau 2000 (groen). Bij alle berekeningen is uitgegaan van het klimaatscenario W+. De oranje en grijze opgave corresponderen met de opgaves besproken in Asselman et al. (2022)



Figuur 8.4 Gemiddelde opgave voor piping per deelgebied. De opgaves zijn in beeld gebracht voor de huidige bodemligging (2018, oranje), de situatie met doorgaande bodemerosie (= IRM nulalternatief met bodem 2050 in grijs) en de situatie met bodemligging op niveau 2000 (groen). Bij alle berekeningen is uitgegaan van het klimaatscenario W+. De oranje en grijze opgave corresponderen met de opgaves besproken in Asselman et al. (2022)

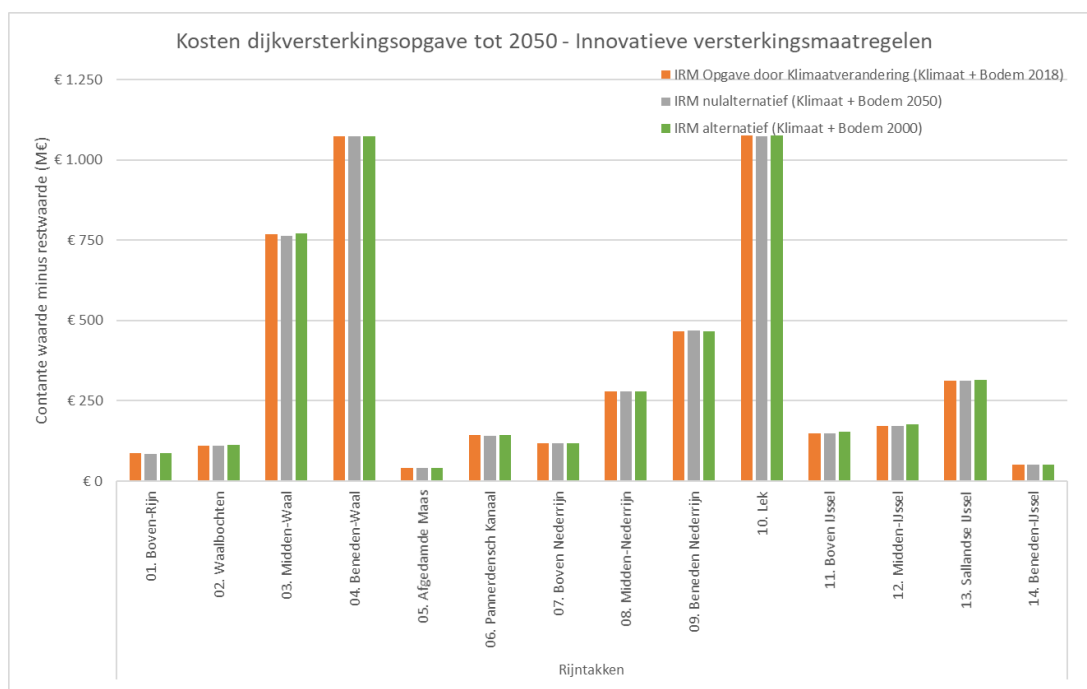
8.3.3 Kosten dijkversterking

De totale versterkingskosten voor de 2000-bodemligging zijn geraamd op 4,9 miljard euro (excl. IJssel-Vecht Delta). Dit is een kleine toename ten opzichte van die bij de bodemligging van 2018 of 2050 (Tabel 8.1).

Binnen de trajecten zijn er geen grote verschillen en de verschillen zijn in lijn met de veranderde versterkingsopgave zoals weergegeven in de voorgaande figuren. De geraamde kosten per riviertraject zijn weergegeven in Figuur 8.5.

Tabel 8.1 Totale dijkversterkingskosten Rijntakken (excl. IJVD)

	Bodem 2018	Bodem 2050	Bodem 2000
Versterkingskosten (M€)	4848	4840	4864
Relatieve toename t.o.v. huidige bodemligging (2018)	0%	-0,2%	0,3%



Figuur 8.5 Kosten dijkversterking tot 2050 wanneer gebruik gemaakt wordt van innovatieve versterkingsmaatregelen. De oranje en grijze opgave corresponderen met de opgaves besproken in Asselman et al. (2022)

8.4 Conclusies

Het ophogen van de rivierbodempligging zodat deze overeenkomt met de ligging omstreeks het jaar 2000 heeft consequenties voor zowel de afvoerverdeling als de dijkversterkingsopgave.

- De afvoerverdeling (BVA '17.000 m³/s Lek Ontzien') kan bij een afvoer van 17.000 m³/s zonder aanvullende maatregelen niet meer volledig gehandhaafd worden wanneer de bodempligging van omstreeks het jaar 2000 wordt hersteld. De ophoging van het rivierbed rondom het splitsingspunt (met name op de Boven-Waal) zorgt er namelijk voor dat het regelbereik van regelwerk Pannerden niet meer toereikend is. Zelfs wanneer dit regelwerk helemaal dicht wordt gezet stroomt er ongeveer 30 m³/s te weinig water richting de Waal en te veel naar de IJssel. Dit vergt rivierverruiming op de Boven-Waal.
- Door de rivierbodem op grote schaal op te hogen worden de hoogwaterstanden iets hoger. Dit resulteert in een iets grotere versterkingsopgave om in 2050 aan de norm te voldoen. Deze extra versterkingsopgave en de kosten ervan zijn echter relatief klein. Zo neemt de hoogteopgave met maximaal ongeveer 5 cm toe. En is het effect van een andere rivierbodempligging op de versterkingskosten minder dan 1%. In lijn met de conclusies uit Asselman et al. (2022) kan geconcludeerd worden dat de dijkversterkingsopgave grotendeels wordt bepaald door het op orde brengen voor de nieuwe normering in combinatie met klimaatverandering. Een andere rivierbodempligging betekent slechts een heel klein verschil.

9 Overige effecten van een verandering in rivierbodempligging

9.1 Inleiding

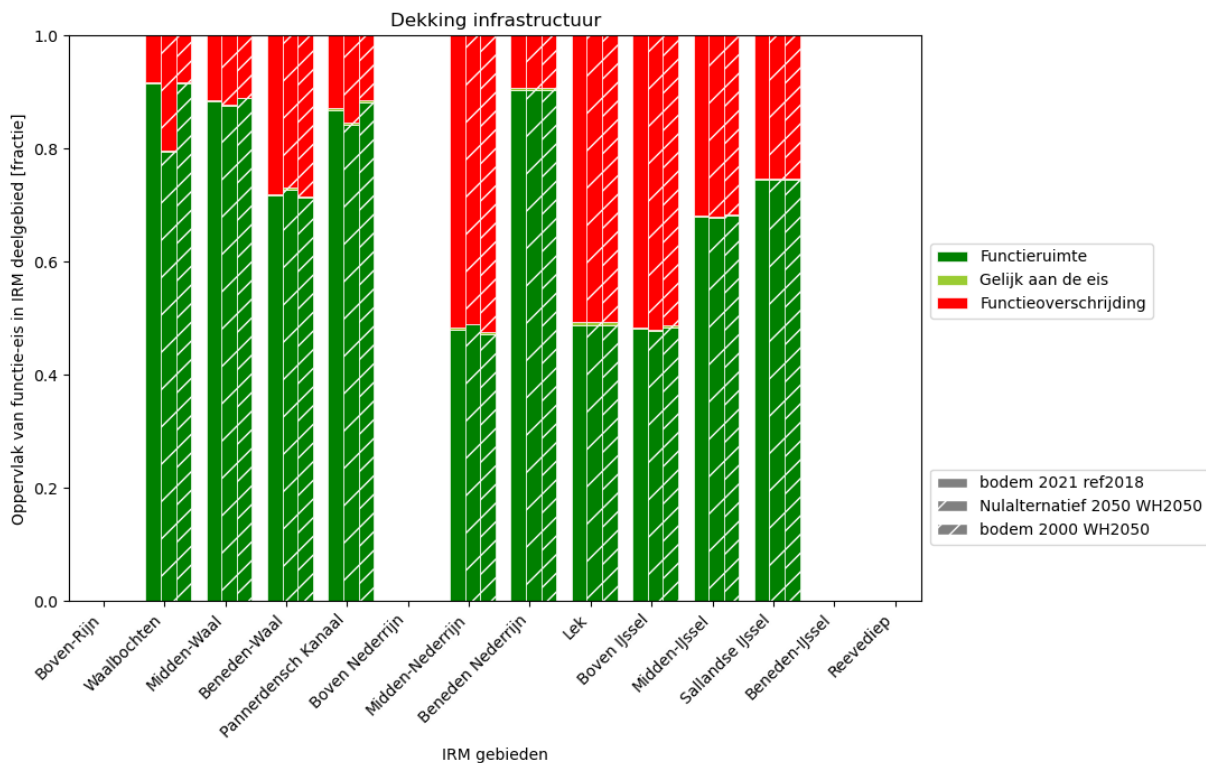
De effecten zijn voor de volgende functies in beeld gebracht: natuur, zoetwaterbeschikbaarheid, bevaarbaarheid en waterveiligheid. Een verandering in rivierbodempligging heeft effect op deze functies, maar ook op een aantal andere aspecten. Met het instrument dat is ontwikkeld voor de Basis RivierbodemLigging (BRL) is een aantal van deze aanvullende effecten in beeld gebracht. Het gaat dan om effecten op de standzekerheid van kunstwerken, oevers of kribben, en om de dikte van de afdeklaag boven infrastructuur zoals tunnels, kabels en leidingen.

9.2 Voldoende dekking boven infrastructuur

Binnen de BRL is de eis gesteld 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. Op dit moment zijn er boven kabels en leidingen weliswaar 'niet-baggerzones' opgenomen, maar wordt er ook geen onderhoud gepleegd om de effecten van erosie te compenseren en er zo voor te zorgen dat de minimaal benodigde afdeklaag boven de leidingen behouden blijft. Het overzicht aan kabels en leidingen dat beschikbaar is binnen de BRL is helaas nog niet volledig. Dit onderzoek geeft dan ook enkel een indicatie van de mogelijke problemen.

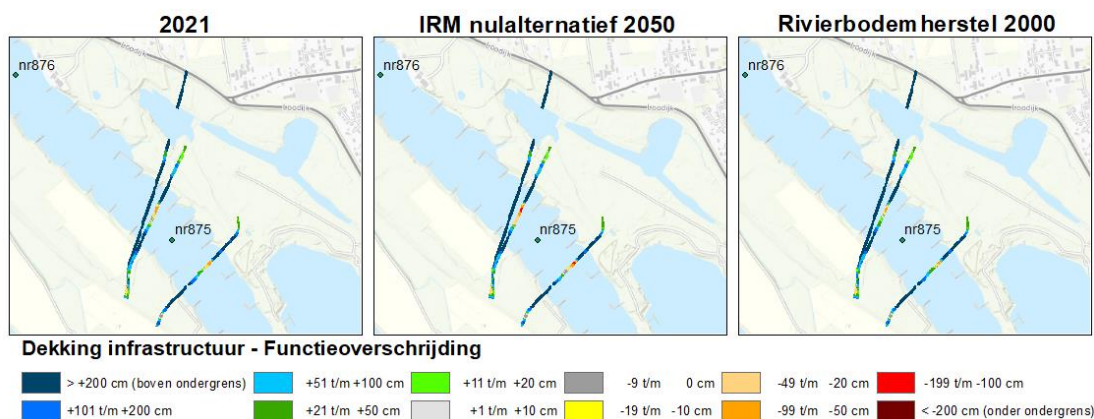
Figuur 9.1 toont met rood voor elk IRM traject de fractie van het traject waarop niet aan de gestelde eisen voor de minimale deklaag bovenop de kabels en leidingen wordt voldaan (rood). De figuur toont dat op dit moment al op meerdere locaties niet aan de eis wordt voldaan, en dat bij doorgaande rivierbodemerrosie de dekking in 2050 op nog meer locaties niet meer voldoet aan de eisen die in de Richtlijn vaarwegen, NEN 3654 zijn gesteld. Figuur 9.2 toont dat er op het Pannerdensch Kanaal enkele leidingen zijn waar nu al een tekort aan dekking aanwezig is. In 2050 zou zonder maatregelen op dit traject 20 tot 30 cm erosie plaats hebben gevonden, waardoor er in 2050 een tekort van meer dan 110 cm in de minimale deklaag is ontstaan.

Geen enkele van de leidingen in de BRL-database komt bij de onderzochte bodempliggingen bloot te liggen.



Figuur 9.1 De fractie van ieder IRM-traject dat nu, bij het nulalternatief IRM in 2050 en bij rivierbodemerstel naar het zichtjaar 2000 niet voldoet (rood) aan de gestelde eis voor de minimale deklaag bovenop kabels en leidingen voldoet

Rivierbodemerstel naar zichtjaar 2000 resulteert op de erosieve trajecten in een dikkere afdeklaag bovenop de leidingen en een kleine afname van het aantal locaties waar de afdeklaag niet meer voldoet. Dit is ook het geval voor de leidingen onder het Pannerdensch Kanaal van Figuur 9.2 waar bij rivierbodemerstel de bodem meer dan 10 cm hoger zal worden – en de afdeklaag dus ook. De ophoging blijft echter onvoldoende om over de volle breedte voldoende dekking te bieden.

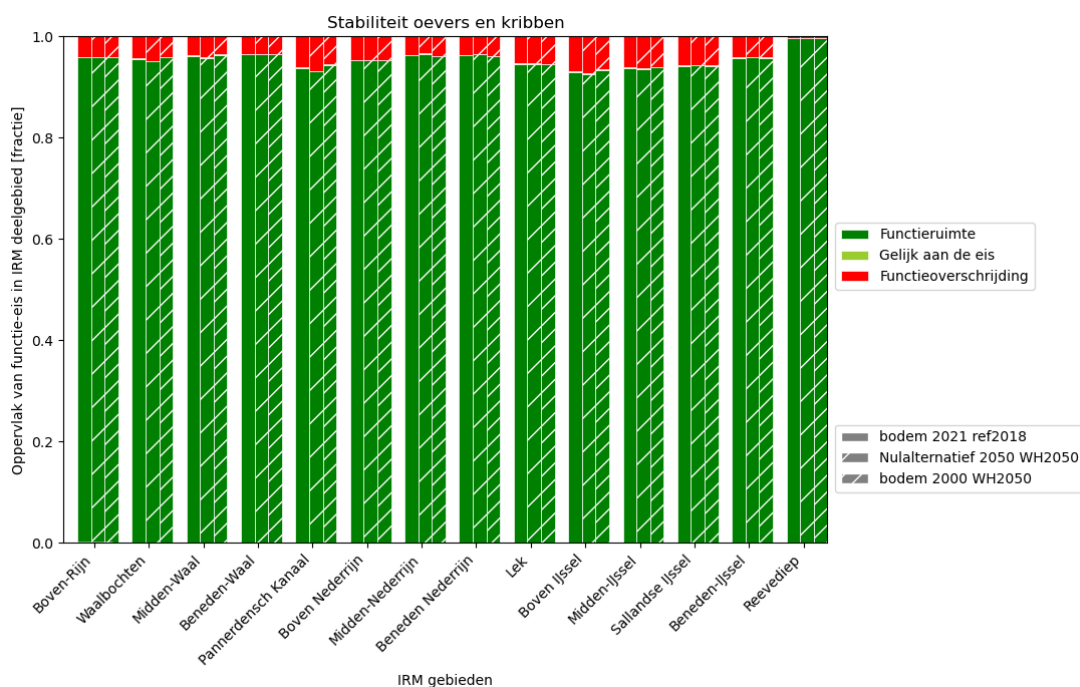


Figuur 9.2 Tekorten (geel-oranje-rood) in de minimale deklaag boven risicovolle kabels en leidingen in het Pannerdensch kanaal, zoals bepaald met de BRL voor 2021 (links), 2050 (midden) en 2000 (rechts)

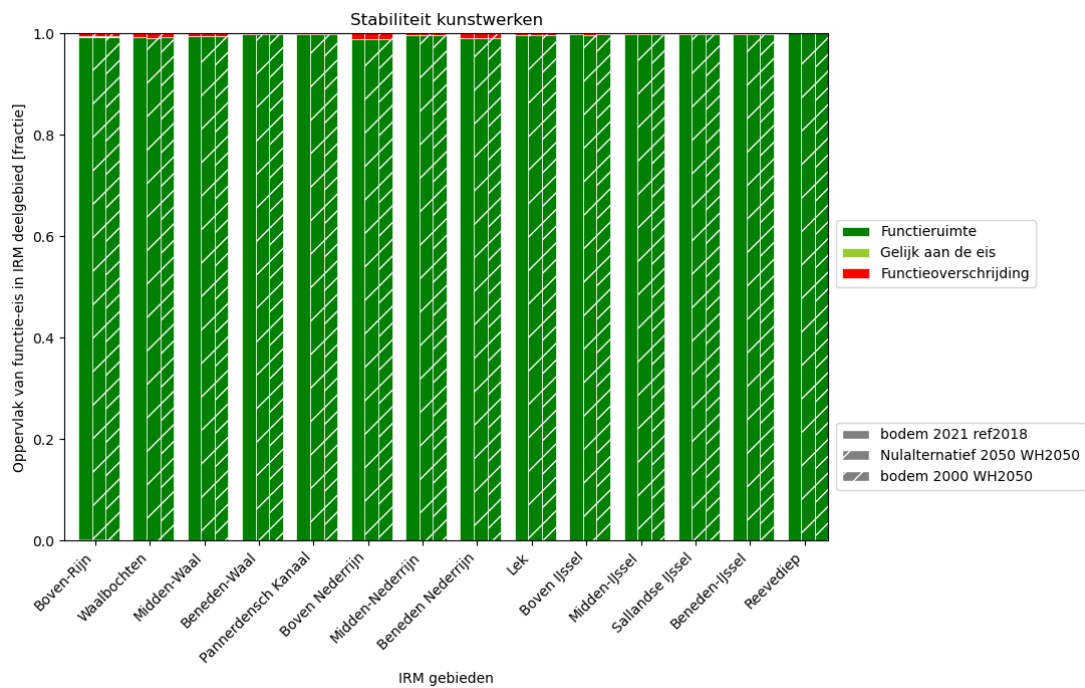
9.3 Stabiliteit van oevers, kribben en kunstwerken

Figuur 9.3 en Figuur 9.4 tonen met rood de fractie van ieder IRM-traject waarop niet wordt voldaan aan de gestelde eisen voor de instandhouding van oevers en kribben of kunstwerken. Het grondmassief rondom de meeste oevers, kribben en kunstwerken is in de huidige situatie stabiel en voldoende. Voor het zichtjaar 2050 zal de rivierbodemerose op de erosieve trajecten nadelig zijn voor de instandhouding van oevers, kribben en kunstwerken. De figuren tonen dat op de erosieve trajecten extra locaties ontstaan waar de bodem onder het standzekerheidsvlak van de oevers, kribben of kunstwerken komt. Of de tekorten in het standzekerheidsvlak van de objecten daadwerkelijk leiden tot instabiele en gevaarlijke situaties, dient voor die betreffende locaties beter te worden onderzocht (want de beschikbare informatie is ontoereikend om daar een harde uitspraak over te doen).

Het rivierbodemerstel naar zichtjaar 2000 zorgt op de erosieve trajecten juist voor minder locaties waar de bodem onder het standzekerheidsvlak van de objecten ligt.



Figuur 9.3 De fractie van ieder IRM-traject dat nu, bij het nulalternatief IRM in 2050 of bij rivierbodemerstel naar het zichtjaar 2000 niet voldoet (rood) aan de gestelde eis voor de stabiliteit van oevers en kribben



Figuur 9.4 De fractie van ieder IRM-traject dat dat nu, bij het nulalternatief IRM in 2050 of bij rivierbodemerstel naar het zichtjaar 2000 niet voldoet (rood) aan de gestelde eis voor kunstwerken

Dit rapport vormt een aanvulling op de effectbepaling van het nulalternatief IRM, waarbij de effecten op de belangrijkste rivierfuncties zijn berekend voor het geval dat de rivierbodem zou worden teruggebracht naar de ligging omstreeks het jaar 2000. Dit is een hogere ligging dan de huidige rivierbodempligging (maximaal verschil bijna 30 cm op de Boven-Waal). Voor het nulalternatief IRM is juist een lagere ligging verondersteld, als gevolg van doorgaande rivierbodemerrosie (maximaal ongeveer 50 cm lager op de Boven-Waal). Voor beide berekeningen is aangenomen 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 en op de waterstanden op de Rijntakken bepaald. De berekeningen zijn uitgevoerd voor de huidige bodempligging, een lagere ligging zoals verwacht in 2050 en een hogere ligging zoals de ligging rond het jaar 2000. Dit leidt tot de volgende bevindingen:

- Op de Rijntakken leidt de ongelijke verandering in rivierbodempligging op de verschillende Rijntakken nabij het splitsingspunt tot een verandering in de afvoerverdeling bij afvoeren lager dan 3.000 m³/s. Doorgaande rivierbodemerrosie (verwachte bodempligging in 2050) resulteert in meer afvoer over de Waal, ten koste van die over de IJssel (verschuiving in de orde van 25 m³/s ten opzichte van de huidige bodem).
- Ophoging van de bodem in het zomerbed naar de ligging uit het jaar 2000 leidt juist tot iets minder afvoer over de Waal (ongeveer 15 m³/s minder bij een afvoer van 1020 m³/s te Lobith). Bij afvoeren beneden de 1020 m³/s te Lobith gaat het verschil vooral naar de IJssel.
- De veranderingen in rivierbodempligging en afvoerverdeling leiden tot veranderingen in waterstanden. De veranderingen zijn het grootst bij relatief lage afvoeren. Bij de 2000-bodem treden de grootste verhogingen van de waterstand op op de Boven-Waal, het Pannerdensch Kanaal en de IJssel: 0,15 m hogere waterstanden bij een afvoer van maximaal 1020 m³/s te Lobith. Op de Boven-Waal wordt de verhoging vooral veroorzaakt door de hogere bodempligging, op de andere takken speelt ook de veranderde afvoerverdeling een belangrijke rol. Verder benedenstrooms op de Waal leidt de afname in de afvoer tot lagere waterstanden.
- De 2050-bodem in het nulalternatief IRM leidt vooral tot lagere waterstanden. De grootste verlaging is te vinden op de Boven-Waal, het Pannerdensch Kanaal en de IJssel en bedraagt bij afvoeren van maximaal ongeveer 1020 m³/s te Lobith ongeveer 0,3 m. Op de Boven-Waal komt dit door de erosie (-0,5 m). Op de andere takken komt dit vooral door de verminderde afvoer.
- Bij hoogwater worden de regelwerken anders ingesteld om aan de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling (BVA) te voldoen. Bij de 2050-bodem kan de BVA met de huidige regelwerken worden gerealiseerd; ze komen daarbij zelfs meer in de (gewenste) middenpositie te staan. Bij de 2000-bodem is het niet mogelijk om zonder aanvullende maatregelen (rivierverruiming Boven-Waal of aanpassing van de regelwerken) aan de BVA te voldoen. Zelfs als regelwerk Pannerden helemaal dicht staat stroomt er ongeveer 30 m³/s teveel naar het Pannerdensch Kanaal en de IJssel.

De berekende waterstandseffecten zijn vervolgens gebruikt om de effecten op de vier belangrijkste 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:

- 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_{Dry} zorgt voor een zeer kleine toename van de overstromingsduur. Doorgaande rivierbodemerose 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. Wanneer de rivierbodem wordt opgehoogd is een beperkte toename te zien van de overstromingsduur.
- De doorgaande rivierbodemerose zorgt ook voor een daling van de grondwaterstanden; in het voorjaar met maximaal 25 cm op de Boven-Waal. Ophoging van de rivierbodem tot de ligging in het jaar 2000 leidt hier tot maximaal 15 cm hogere grondwaterstanden. .
- Op basis van overstromingsduren wordt geconcludeerd dat de uiterwaarden langs de Rijntakken *in potentie* geschikt zijn voor zachthout- en vooral hardhoutoibos en, afhankelijk van het beheer, ook voor nat en droog grasland. Het effect van veranderingen in overstromingsduren (als gevolg van klimaatverandering en/of verandering in rivierbodempligging) op de potentiële ecotoopverdeling is beperkt.
- Op basis van de nu beschikbare grondwaterstandsregels, zijn de uiterwaarden vooral geschikt voor droog grasland en hardhoutoibos. Op basis van de voorjaarsgrondwaterstanden (GVG) kan in vergraven uiterwaarden lokaal ook zachthoutoibos of nat grasland voorkomen. De oppervlaktes zijn echter zeer beperkt.
- Veranderingen in grondwaterstand door doorgaande rivierbodemerose hebben nauwelijks effect op de ecotooppotentie: de uiterwaarden zijn ook in de toekomst vooral geschikt voor hardhoutoibos en droog grasland (ze zijn nu al te droog voor veel natte ecotopen en dat wordt in de toekomst nog erger). Ophoging van het rivierbed leidt tot een zeer beperkte toename in potentie voor natte ecotooptypen. Voor de nattere ecotooptypen is in het algemeen een hogere GVG en dus grotere rivierbodempligging benodigd dan bij de 2000-bodem.
- Op veel IRM-trajecten stromen nevengeulen nu al onvoldoende vaak mee. Dit is onder meer het geval in de Waalbochten en langs 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 rivierbodemerose. Rivierbodempligging naar de bodem van ongeveer 2000 zorgt voor een relatieve verhoging van de laagwaterstanden en de mediane waterstand en compenseert daarmee deels het effect van de klimaatverandering. De doorstroming zal echter nog steeds verslechteren t.o.v. de huidige situatie.

Zoetwaterbeschikbaarheid

Voor de zoetwaterbeschikbaarheid is vooral gekeken naar de kans op watertekorten in Noord-Nederland en naar overschrijding van het kritieke peil voor waterinlaat bij sluis Eefde.

De effecten voor West-Nederland (kans op watertekorten en verzilting) zijn in dit rapport buiten beschouwing gelaten omdat Asselman et al. (2022) hebben laten zien dat veranderingen in rivierbodempligging hier nauwelijks invloed op hebben.

- Uit de analyses blijkt dat de kans op watertekorten in Noord-Nederland in de toekomst groter wordt. Dit komt vooral door klimaatverandering en een grotere watervraag. De kans op een watertekort van 10% van de watervraag is nu 1:50 per jaar en bij scenario Stoom2050 wordt dat in 2050 1:8 tot 1:14 per jaar, afhankelijk van de rivierbodempligging (1:8 per jaar bij de verwachte ligging in 2050, 1:12 per jaar bij de huidige bodempligging en 1:14 per jaar bij de 2000-bodempligging).

- De grotere watertekorten treffen deels de beregende landbouw in Noord-Nederland. In het Stoom-scenario neemt het landbouwriscico bij de huidige bodemligging toe met 8,9 miljoen euro per jaar als gevolg van klimaatverandering en toenemende watervraag. Bij doorgaande rivierbodemerisatie (2050-bodem) kan dit oplopen tot 10,4 miljoen euro per jaar. Bij ophoging van de bodem tot de ligging in het jaar 2000 blijft de toename beperkt tot 7,8 miljoen euro per jaar.
- Ook de toevoer naar de Twentekanalen wordt beïnvloed door veranderingen in rivierwaterstanden als gevolg van een verandering in rivierbodemligging. Problemen met de wateraanvoer naar de Twentekanalen door lage waterstanden worden in de toekomst vooral groter door klimaatverandering. Gemiddeld zal in 2050 (klimaatscenario W_{Hdry}) bij handhaving van de huidige rivierbodemligging eens in de 10 jaar sprake zijn van overschrijding van het kritieke peil gedurende 50 dagen of langer (in het huidige klimaat is dit eens in de 40 jaar). Door rivierbodemerisatie (bodem 2050) en de daaraan gekoppelde verschuiving van de afvoerverdeling neemt deze frequentie toe tot eens in de 5 jaar. Wanneer de rivierbodem wordt opgehoogd naar het niveau van het jaar 2000, dan neemt de frequentie af tot eens in de 10 à 20 jaar (in W_{Hdry_2050}).

Bevaarbaarheid

Ten gevolge van klimaatverandering gaat de bevaarbaarheid van de Rijntakken achteruit. Het effect van de aangenomen veranderingen in rivierbodemligging is kleiner dan dat van klimaatverandering. De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- Doorgaande rivierbodemerisatie (bodemligging 2050) leidt tot een beperkte toename van de afvoer via de Waal. De waterdiepte op de Waal wordt hierdoor iets groter. Dit is gunstig voor de scheepvaart over die tak. 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 zou moeten worden met meer kielspeling, neemt de beschikbare vaardiepte voor de schepen toch iets af. Op de IJssel leidt de 2050-bodem overal tot kleinere waterdiepten (0,2 m minder diep) en ook in stuwpannd Driel op de Neder-Rijn neemt de waterdiepte af (met 0,3 m).
- Ophoging van de rivierbodem naar de situatie rond het jaar 2000 leidt tot een beperkte toename van de afvoer over de IJssel en grotere waterdieptes (maximaal ongeveer 0,1 m dieper).
- Door klimaatverandering neemt ook het aantal locaties waar niet aan de vereiste waterdiepte kan worden voldaan toe. Op dit moment wordt op de Boven-Waal over ongeveer 5% van de totale trajectlengte niet aan de vereiste waterdiepte voldaan. Door klimaatverandering neemt dit toe tot ongeveer 50%. Bij het nulalternatief (bodem 2050) wordt iets meer water afgevoerd via de Waal, wat er voor zorgt dat het percentage afneemt tot 40%. Bij ophoging van de bodem tot de ligging uit het jaar 2000 kan dit percentage toenemen tot meer dan 60%.
- Klimaatverandering heeft ook een negatief effect op de bevaarbaarheid van de IJssel. Op het traject van de Boven-IJssel voldoet 6% niet aan de vereiste waterdiepte. Door klimaatverandering neemt dit toe tot 55%. Wanneer niets wordt gedaan om de rivierbodemerisatie te stoppen neemt dit toe tot 84%, terwijl ophoging van de bodem dit percentage beperkt tot 43%.

- De vaarkosten op de Waal maken een groot deel uit van de totale vaarkosten van de binnenvaart. Als gevolg hiervan zorgt een afname in vaardiepte bij de 2000-bodem voor in een toename van de vaarkosten (landelijk gezien). De verschillen in vaarkosten zijn echter klein. Bij de huidige bodemligging en het huidige klimaat bedragen de vaarkosten 2418 miljoen euro per jaar. Bij doorgaande rivierbodemerossie en wanneer wordt uit gegaan van een grotere kielspeling boven vaste lagen, nemen de kosten toe met 9 miljoen euro per jaar (0,4%). Bij ophoging van de bodem tot de ligging uit het jaar 2000 zouden de kosten met 13 miljoen euro per jaar toenemen (0,5%). Echter, wanneer ook rekening wordt gehouden met klimaatverandering, dan zouden de kosten in dat laatste geval met 144 miljoen euro per jaar toenemen. Het effect van klimaatverandering is dus vele malen groter dan het effect van de onderzochte veranderingen in rivierbodemligging.

Waterveiligheid

Veranderingen in rivierbodemligging hebben effect op de afvoerverdeling, de waterstanden en de dijkversterkingsopgave:

- Bij de 2050-bodem kan de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling (BVA '17.000 m³/s Lek Ontzien') met de huidige regelwerken worden gerealiseerd; ze komen daarbij zelfs meer in de (gewenste) middenpositie te staan. Bij de 2000-bodem is het niet mogelijk om aan de BVA te voldoen; zelfs als regelwerk Pannerden helemaal dicht staat zou er – zonder rivierversmalling op de Boven-Waal – ongeveer 30 m³/s teveel naar het Pannerdensch Kanaal en de IJssel stromen.
- Door de rivierbodem op grote schaal op te hogen naar de situatie uit het jaar 2000 worden de hoogwaterstanden iets hoger. Dit resulteert in een grotere versterkingsopgave om in 2050 aan de norm te voldoen. Zo neemt de hoogteopgave met maximaal ongeveer 5 cm toe. Doorgaande rivierbodemerossie (bodem 2050) resulteert juist in iets lagere waterstanden en daardoor in een maximaal 10 cm kleinere hoogteopgave.
- Het effect van een andere rivierbodemligging op de versterkingskosten is nihil. De onderzochte rivierbodemliggingen resulteren in een af- of toename van de kosten met minder dan 0,5 %.
- In lijn met de conclusies uit Asselman et al. (2022) kan geconcludeerd worden dat de dijkversterkingsopgave grotendeels wordt bepaald door het op orde brengen voor de nieuwe normen in combinatie met klimaatverandering. De verandering in rivierbodemligging speelt slechts een heel kleine rol.

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, M. Maarse, B. Maas, P. de Grave en E. van der Deijl (2022) Effectbepaling Nulalternatief IRM. Deltares rapport 11208036-004-ZWS-0002.
- 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
- De Jong & Ottevanger (2020) Analyse van de bodemhoogte Rijntakken van 1999 tot 2018. Deltares rapport 11202744-003-ZWS-0001
- Delsman, J.R., K. Horváth, K., Op den Kelder, T., Van der Deijl, E., De Jong, J., Visser, M., 2020. Een verkenning van de effecten van kansrijke maatregelen op waterverdeling, scheepvaart en landbouw: Deelrapport Deltaprogramma Zoetwater 2019, Deltares rapport 11203734-005, Delft.
- Heusden, W. van, H. Sluiter, M. Tijnagel, W. Vercrujse, A. Zuidhof (2021) Ecologische Systeemopgave PAGW-Rivieren – Naar klimaatbestendige robuuste riviernatuur in 2050. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, Rijkswaterstaat en Staatsbosbeheer.
- Klijn, F., H. Leushuis, M. Treurniet, W. van Heusden en S. van Vuren (2022) Systeembeschouwing 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. Pedroli, H. Duel, M. de Vries, (1998) Ecotopen: een blik terug en een blik naar voren. WL-rapport R3124, Delft.
- Kosters, A. (2022) Actualisatie Rijn j19_6 en beno19_6. Deltares rapport 11206813-003-ZWS-0004 v0.2 d.d. 8 februari 2022
- 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.
- Van der Deijl, E. (2022) Toepassing van de Basisrivierbodemligging 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.

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