

Rivieren en klimaat - PAGW

Effecten van lage rivierpeilen op de vochttoestand van uiterwaarden langs de Rijn en Maas - Tweede herziene versie



Rivieren en klimaat - PAGW

Effecten van lage rivierpeilen op de vochttoestand van uiterwaarden langs de Rijn en Maas -
Tweede herziene versie

Auteur(s)

Gerben van Geest

Rivieren en klimaat - PAGW

Effecten van lage rivierpeilen op de vochttoestand van uiterwaarden langs de Rijn en Maas - Tweede herziene versie

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	Rivieren, klimaatverandering, rivierinsnijding, grondwaterstanden, uiterwaarden, ecotopen, verdroging

Documentgegevens

Versie	2.1
Datum	19-06-2020
Projectnummer	11203733-005
Document ID	11203733-005-ZWS-0002
Pagina's	57
Status	definitief

Auteur(s)

	Gerben van Geest Sacha de Rijk Wilfred Altena	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
2.1	Gerben van Geest 	Frans Klijn 	Gerard Blom 92 	

Samenvatting

Deze studie maakt deel uit van een verkenning van de effecten van lage rivierpeilen op de klimaatbestendigheid¹ van het wensbeeld van de Natuurverkenning Grote Rivieren en Programmatiese Aanpak Grote Wateren. Dit wensbeeld is door Wageningen Environmental Research (WEnR) gekwantificeerd in arealen van verschillende ecotooptypen. Deze kwantificering is uitgevoerd voor verschillende hotspot gebieden langs de Rijntakken en Maas.

Doelstelling van dit rapport is het bepalen van de vochttoestand van ecotooptypen in het rivierengebied bij verschillende klimaatscenario's. Deze toetsing is uitgevoerd voor de huidige ecotopenverdeling (kaarten van vierde cyclus ecotopenkartering) en voor het wensbeeld (de ecotopenverdeling in 2050). Deze informatie heeft WEnR vervolgens gebruikt voor de optimalisatie van het wensbeeld van ecotooptypen in de hotspot gebieden in 2050 (Van der Sluis et al., 2020).

Deze studie beperkt zich tot de effecten van lage rivierpeilen op ecotopen in uiterwaarden via de (grond)waterstand; effecten via watertemperatuur en stroming zijn buiten beschouwing gelaten. Ook de effecten van hogere rivierafvoeren zijn niet meegenomen, evenals wateraanvoer via kwel en neerslag en afvoer via verdamping en wegzijging.

De analyses zijn uitgevoerd voor drie van de vier hotspot gebieden (Gelderse Poort, IJssel-Vechtdelta, Grensmaas), als ook voor de andere riviertrajecten in het bovenrivierengebied van Rijn en Maas. De Biesbosch is buiten beschouwing gelaten vanwege het ontbreken van recente ecotopenkaarten.

Er zijn twee belangrijke oorzaken van lage rivierpeilen, namelijk veranderingen in de rivierafvoer (ten gevolge van klimaatverandering) en bodemerosie. Bodemerosie leidt tot insnijding van de rivierbodem, wat lagere rivierpeilen tot gevolg heeft bij eenzelfde rivierafvoer. De effecten van veranderde rivierafvoeren op het grondwaterpeil in uiterwaarden zijn bepaald voor het gehele bovenrivierengebied. De effecten van rivierinsnijding daarentegen zijn alleen bepaald voor trajecten waar dit een belangrijke rol speelt. Dit zijn de deelgebieden Gelderse Poort, Waal en Zuidelijke IJssel.

De bestendigheid tegen klimaatverandering is verkend aan de hand van berekening van de effecten van veranderingen van de rivierafvoer (met en zonder rivierinsnijding) op de (grond)waterstanden van ecotopen. Deze analyses zijn uitgevoerd voor (1) de ecotopenverdeling in de huidige situatie, en (2) voor het wensbeeld in 2050. WEnR heeft de resultaten van het wensbeeld in 2050 gebruikt om te toetsen of de gewenste ecotopenverdeling in 2050 klimaatbestendig is.

De resultaten van stap 1 (effecten van een veranderend rivierpeil (ten gevolge van klimaatverandering) en rivierinsnijding op de vochttoestand van de huidige ecotopenverdeling) zijn in dit rapport beschreven. De resultaten van stap 2 (wensbeeld 2050) dienen als achtergronddocumentatie voor het rapport van WEnR (Van der Sluis et al., 2020); deze resultaten zijn weergegeven in bijgevoegde Excel-file (getiteld: PAGW 2050 scenario's) en worden niet bediscussieerd in het voorliggende rapport.

Lage rivierpeilen hebben een groot effect op de grondwaterstand in uiterwaarden en droogval van uiterwaardplassen. In sommige deelgebieden kan in de toekomst een aanzienlijk areaal van de plassen en natte tot vochtige ecotopen (sterk) verdrogen; er zijn echter grote verschillen tussen de gebieden.

¹) feitelijk wordt bedoeld: bestendigheid tegen klimaatverandering

De grootste effecten op de grondwaterstand zijn berekend voor de Gelderse Poort, Waal en Zuidelijke IJssel. Het uiteindelijke effect wordt sterk bepaald door de toekomstige snelheid van rivierinsnijding; handhaving van de huidige bodemerosiesnelheid van 1,5 - 2 cm per jaar tot 2050 leidt tot een sterke (verdere) verdroging van uiterwaarden in deze gebieden, waardoor natte en vochtige ecotopen vrijwel verdwijnen. Lagere rivierafvoeren ten gevolge van klimaatverandering leveren ook een bijdrage, maar de effecten hiervan zijn beperkt ten opzichte van die van rivierinsnijding.

In gestuwde riviertrajecten (Neder-Rijn en Lek, Maas) en de IJssel-Vechtdelta treden nauwelijks wijzigingen op in de grondwaterstand bij de verschillende klimaatscenario's. En aangezien rivierinsnijding in deze riviertrajecten geen rol speelt, zijn de effecten hiervan niet berekend. De Grensmaas is ongestuwd er zijn bodemdrempels aangelegd ter voorkoming van verdroging van Vlaamse N2000 gebieden in het Maasdal.

Bij bovengenoemde resultaten moet opgemerkt worden dat de uiterwaarden in de Gelderse Poort, Waal en Zuidelijke IJssel reeds sterk zijn verdroogd in de huidige situatie. Deze verdroging is het gevolg van rivierinsnijding over de afgelopen eeuw, die voor de Boven-Rijn en Waal in de orde grootte van 1 – 2 meter ligt, en voor de Zuidelijke IJssel tussen 0,2 – 0,8 meter. Deze verdroging wordt bovendien versterkt door sedimentatie van klei en zand tijdens rivieroverstromingen, waardoor de hoogteligging van de uiterwaarden (ten opzichte van het grondwaterpeil) toeneemt. Dit geldt met name voor oorspronkelijk laaggelegen (en dus veelal vochtige) delen van uiterwaarden, omdat deze een hoge overstromingsfrequentie bezitten.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Doelstelling van het project	9
1.3	Aanpak	10
1.4	Leeswijzer	11
2	Methode van effectbepaling	12
2.1	Aanpak op hoofdlijnen	12
2.2	Afbakening en uitgangspunten	13
2.3	Hydrologie van Rijn en Maas	13
2.3.1	Peilregime van de Rijn	13
2.3.2	Peilregime van de Maas	17
2.4	Gebruikte scenario's	17
2.4.1	Delta Programma Zoet Water (DPZW) - scenario's	17
2.4.2	Rivierinsnijding	20
2.5	Methode	20
2.5.1	Beschikbaar kaartmateriaal	20
2.5.2	Aanpassingen aan ecotopenkaart	20
2.5.3	Berekening van grondwaterstanden in terrestrische ecotopen	21
2.5.4	Berekening van droogval in geïsoleerde uiterwaardplassen	23
2.5.5	Berekening van waterdiepte en droogval in permanent met de rivier verbonden uiterwaardwateren	25
2.6	Consequenties van aannames	25
2.6.1	Bepaling van verandering in stroomsnelheid	25
3	Resultaten en discussie	27
3.1	Rijntrajecten	27
3.1.1	Gelderse Poort	27
3.1.2	Waal	30
3.1.3	Zuidelijke IJssel	33
3.1.4	IJssel-Vechtdelta	37
3.1.5	Nederrijn en Lek (gestuwde panden)	39
3.2	Maastrajecten	42
3.2.1	Bovenmaas	42
3.2.2	Grensmaas	44
3.2.3	Zandmaas	46
3.2.4	Bedijkte Maas	48
4	Conclusies en aanbevelingen voor vervolg	51
4.1	Effecten van lage rivierpeilen	51
4.2	Ruimtelijke verschillen in huidige situatie	52
4.3	Mogelijke effecten van hogere watertemperatuur	52
4.4	Aanbevelingen voor vervolg	53
4.4.1	Verbeterde hydrologische beschrijving van grondwaterdynamiek in uiterwaarden	53
4.4.2	Effecten van sedimentatie op verdroging van uiterwaarden	53
4.4.3	Verbeteren van effect-relaties	54
5	Literatuurlijst	55

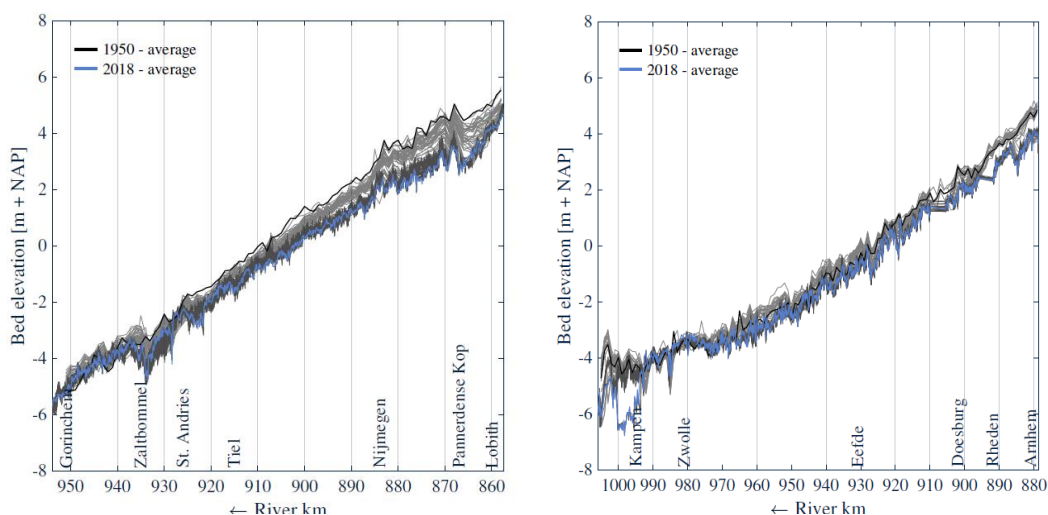
1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Recent is de Natuurambitie Grote Wateren (NAGW) opgesteld, waarin een visionair beeld wordt geschetst van de ontwikkelingsmogelijkheden van de natuur in en rond de grote rijkswateren in Nederland (Ministerie van EZ, 2014). Voor de Rijn en Maas is dit beeld nader uitgewerkt in de Natuurverkenning Grote rivieren (Zuidhof et al., 2017). Deze verkenning schetst een wensbeeld van de grote rivieren en hun directe omgeving waarin natuurlijke processen en dynamiek weer de ruimte krijgen. Een belangrijke pijler hierbij is de ontwikkeling van klimaatbestendige natuur die tegen een stootje kan en medegebruik mogelijk maakt (Zuidhof et al., 2017).

In een nadere uitwerking van de Natuurverkenning Grote rivieren heeft Wageningen Environmental Research in opdracht van het PAGW (Programmatische Aanpak Grote Wateren) het bovengenoemde wensbeeld concreet gemaakt voor drie gebieden, de zogeheten *hotspots*. Dit zijn de Gelderse Poort, Grensmaas en IJssel-Vechtdelta. Deze gebieden hebben de grootste kans op ontwikkeling van soortenrijke en robuuste riviernatuur, vanwege hun ligging, omvang en specifieke kenmerken, zoals gradiënten in het landschap en reeds aanwezige natuurwaarden. Deze hotspots garanderen dus een duurzaam ecologisch functioneren van het riviersysteem. WEnR heeft vervolgens voor elk van deze hotspots het gewenste areaal van verschillende ecotooptypen vastgesteld. Deze potentiële areaalverdeling van ecotopen is tot dusver nog niet getoetst op klimaatbestendigheid.

Bij de keuze van maatregelen voor klimaatadaptatie is het belangrijk om aan te sluiten op verschillen in systeemkenmerken tussen riviertrajecten. Door verschillen in afvoer, verhang en ondergrond verlopen de processen van stromend water, erosie en sedimentafzetting in elk riviertraject anders. Hierdoor kunnen de omvang en effecten van lage rivierstanden anders uitpakken tussen riviertrajecten. Lage waterstanden komen niet alleen door lagere rivierafvoeren ten gevolge van klimaatverandering, maar ook door bodemerosie van de rivier.



Figuur 1.1. Rivierinsnijding van de Boven-Rijn/Waal (linkerfiguur) en IJssel (rechterfiguur) tussen 1950 – 2018. De figuren overgenomen uit Ylla Arbos et al. (2019)

Dit proces leidt namelijk tot insnijding van de rivierbodem, wat lagere rivierpeilen tot gevolg heeft bij eenzelfde rivierafvoer. Langs de Rijn is bodemerrosie ontstaan door de aanleg van kribben en oeververdediging, waardoor de hoofdstroom van de rivier zich niet meer zijwaarts kan verplaatsen. De aanleg van kribben heeft ook tot een hogere stroomsnelheid geleid, wat nog eens verstrekt wordt door het afsnijden van rivierbochten. Als gevolg van de vastlegging van de hoofdstroom en hogere stroomsnelheid is de bodem van de rivier gaan eroderen. Dit treedt alleen op in bovenstroomse delen van riviertrajecten, zoals de Bovenrijn, Waal en Zuidelijke IJssel. In de Boven-Rijn en Waal heeft dit proces tot een daling van de rivierbodem (en bijgevolg het rivierpeil) van 1 – 2 meter geleid tussen 1950 en heden, en voor de Zuidelijke IJssel voor een daling tussen 0,2 – 0,8 meter (Figuur 1.1; gebaseerd op Ylla Arbos et al. (2019)).

Het PAGW-team heeft aan Deltares gevraagd om te toetsen hoe gevoelig de gewenste verdeling van ecotooptypen in de drie hotspots is voor verandering in vochttoestand. Hiervoor zijn verschillende scenario's voor rivierafvoer doorgerekend op effecten op de grondwaterstand in uiterwaarden. Ook zijn de gevolgen van voortschrijdende rivierinsnijding in beeld gebracht. In dit rapport ligt de nadruk op de effecten van lage rivierpeilen op grondwaterstanden in ecotopen. De effecten van temperatuur, neerslag, verdamping, diepe kwel, sedimentatie en hogere rivierafvoeren zijn niet in dit rapport betrokken (zie paragraaf 2.2 voor een onderbouwing hiervan).

1.2 Doelstelling van het project

Doelstelling van dit rapport is het bepalen van de vochttoestand van ecotooptypen in het riviereengebied bij verschillende klimaatscenario's. Deze toetsing is uitgevoerd voor de huidige ecotopenverdeling (kaarten van vierde cyclus ecotopenkartering) als voor het wensbeeld (de ecotopenverdeling in 2050). Deze informatie heeft WEnR vervolgens gebruikt voor de optimalisatie van het wensbeeld van ecotooptypen in de hotspot gebieden in 2050 (Van der Sluis et al., 2020).

De effecten van gewijzigde grondwaterstanden op de huidige ecotopenverdeling zijn in dit rapport besproken. De resultaten van het wensbeeld voor 2050 dienen als achtergronddocumentatie voor het rapport van WEnR (Van der Sluis et al., 2020); deze resultaten zijn weergegeven in bijgevoegde Excel-file (getiteld: PAGW 2050 scenario's) en worden niet bediscussieerd in dit rapport.

De analyses in dit rapport betreffen zowel de hotspot gebieden (Gelderse Poort, IJssel-Vechtdelta, Grensmaas) als de diverse riviertrajecten in het bovenriviereengebied van Rijntakken en Maas. De Biesbosch is buiten beschouwing gelaten vanwege het ontbreken van recente ecotopenkaarten. Bovendien wordt de ecologische toestand in dit gebied voornamelijk gestuurd door de stijging van de zeespiegel, in combinatie met een toenemende zoutindringing. De effecten van laatstgenoemde twee factoren op natuur in de Biesbosch zijn beschreven in Beumer et al. (2009) en Maarse et al. (2011).

In deze studie is een eerste verkenning uitgevoerd naar de effecten van lage rivierpeilen (ten gevolge van klimaatverandering en rivierinsnijding) op de grondwaterstand in ecotopen in uiterwaarden; de effecten op natuur via watertemperatuur, stroming, inundaties zijn vooralsnog niet gekwantificeerd, maar ten dele wel kwalitatief beschreven.

1.3 Aanpak

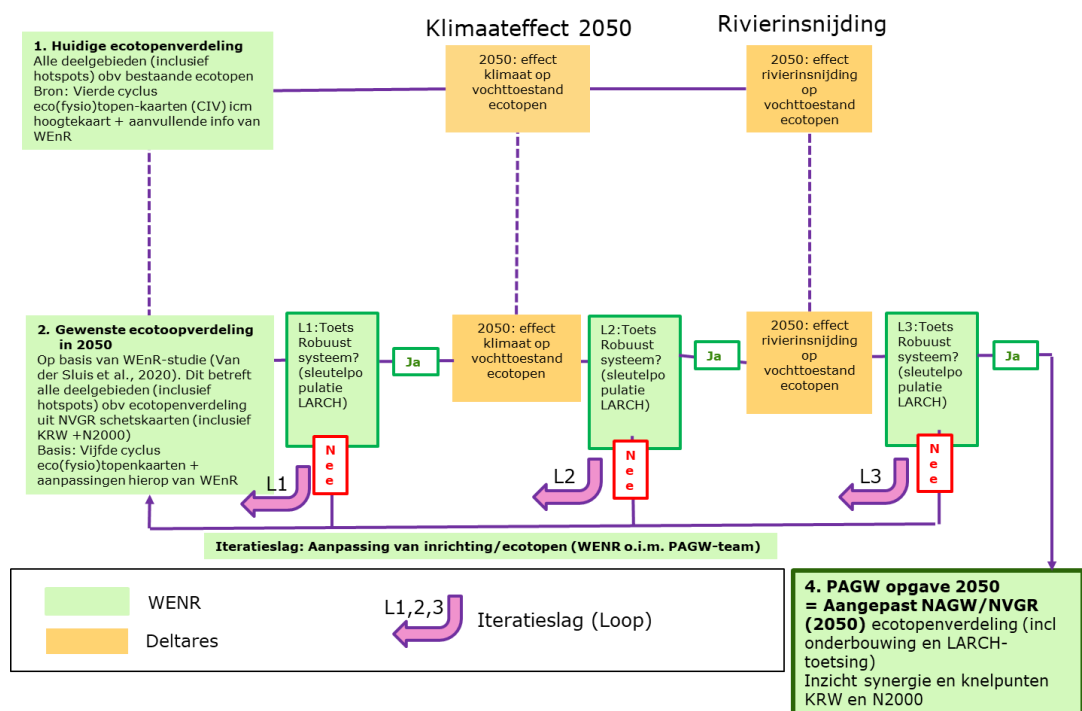
Rijkswaterstaat en de ministeries van I&W en LNV hebben zich ten doel gesteld om een klimaatbestendig wensbeeld te ontwikkelen voor natuur van en langs de grote rivieren, zoals verwoord in de Natuurambitie Grote Wateren en PAGW. De ontwikkeling van dit wensbeeld kent verschillende stappen (Figuur 1.2), die zijn op te vatten als inrichtingsvarianten, namelijk:

- 1 de huidige ecotopenverdeling (kaarten van vierde cyclus ecotopenkartering);
- 2 het wensbeeld van de ecotopenverdeling in 2050, na implementatie van maatregelen ingevolge de Natuurambitie Grote Wateren (NAGW) en Natuurverkenning Grote rivieren (NVGR) en Programmatische Aanpak Grote Wateren (PAGW). Deze kaart is opgesteld door WEnR (Van der Sluis et al., 2020), en is gebaseerd op aangepaste kaarten van de vijfde cyclus ecotopenkartering.

Deze inrichtingsvarianten zijn weergegeven in de eerste kolom van Figuur 1.2. Voor beide inrichtingsvarianten zijn de effecten bepaald van klimaatverandering en rivierinsnijding. Dit zijn resp. de tweede en derde kolom in Figuur 1.2.

In overleg met Rijkswaterstaat en WEnR is afgesproken dat de klimaatveranderingsbestendigheid wordt verkend aan de hand van berekening van de effecten van klimaatverandering (met en zonder rivierinsnijding) op de (grond)waterstanden van ecotopen. Deze analyses zijn uitgevoerd voor de huidige situatie (variant 1, zie Figuur 1.2) en het wensbeeld in 2050 (variant 2). WEnR heeft de resultaten van stap 2 gebruikt om te toetsen of de gewenste ecotopenverdeling in 2050 klimaatbestendig is (Van der Sluis et al., 2020).

De analyses zijn uitgevoerd voor drie van de vier hotspot gebieden uit Van der Sluis et al. (2020), namelijk de Gelderse Poort, IJssel-Vechtdelta, Grensmaas. Hiernaast zijn ook de andere riviertrajecten in het bovenrivierengebied van Rijn en Maas bij de analyses betrokken. De Biesbosch is buiten beschouwing gelaten vanwege het ontbreken van recente ecotopenkaarten.



Figuur 1.2 Stappenplan voor de ontwikkeling van een klimaatbestendig wensbeeld voor natuur in het rivierengebied van Rijn en Maas, in relatie tot verandering van rivierafvoer (klimaatverandering) en bodemerrosie (rivierinsnijding). Voor details voor de uitgevoerde stappen van WEnR wordt verwezen naar Van der Sluis et al. (2020).

1.4 Leeswijzer

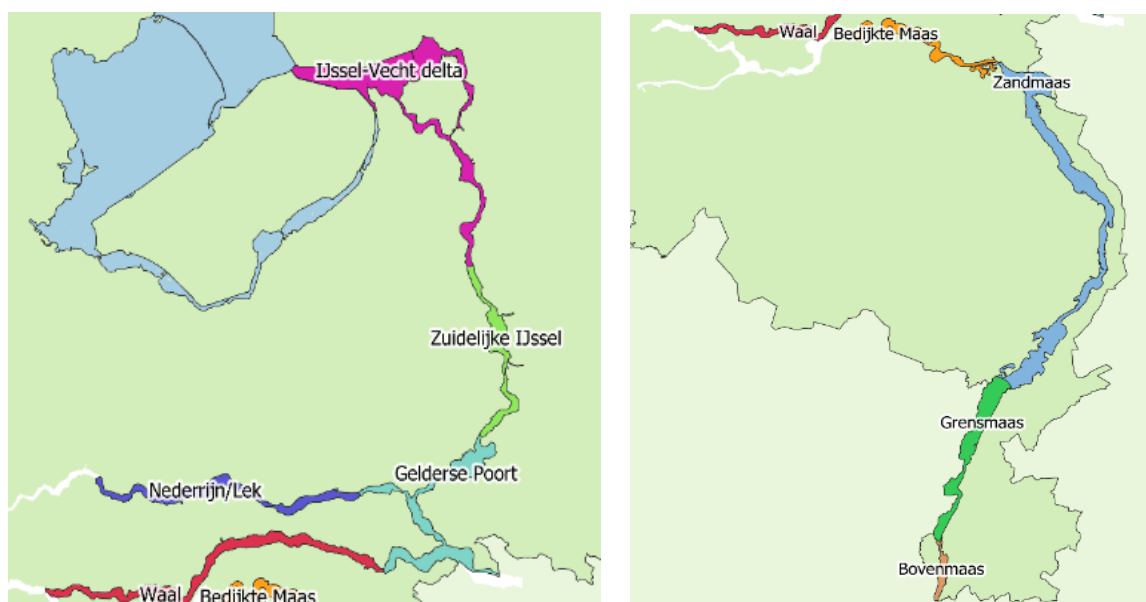
In hoofdstuk 2 wordt een beeld geschetst van het peilverloop van de rivieren, zowel in de huidige situatie als voor verschillende toekomstscenario's. Hoofdstuk 3 geeft een omschrijving van de gebruikte methodes om de effecten van veranderde rivierwaterstanden op de grondwaterstand in uiterwaardecotopen te bepalen. In hoofdstuk vier worden de resultaten van stap 1 (effect op grondwaterstanden voor de huidige ecotoopverdeling) bediscussieerd. Hoofdstuk 5 geeft de conclusies en aanbevelingen voor vervolg.

De resultaten van stap 2 (wensbeeld 2050) dienen als achtergronddocumentatie voor het rapport van WEnR (Van der Sluis et al., 2020); deze resultaten zijn weergegeven in bijgevoegde Excel-file (getiteld: PAGW 2050 scenario's) en worden niet bediscussieerd in dit rapport.

2 Methode van effectbepaling

2.1 Aanpak op hoofdlijnen

Voor de analyses in dit rapport zijn alle effecten van toekomstige ontwikkelingen doorgerekend voor drie Deltascenario's voor 2050 (resp. Rust, Warm en WH_{DRY}; zie Wolters et al., 2018, 2019) in vergelijking met een referentiescenario. Het referentiescenario betreft qua weersomstandigheden de periode 1911–2011 (dus 101 jaar), de Deltascenario's zijn qua weersomstandigheden transformaties op deze tijdserie op basis van veranderingen in onder andere de luchttemperatuur en neerslag. Hierdoor is een specifiek jaar, bijvoorbeeld 1976, terug te herkennen in de Deltascenario's. Voor deze scenario's zijn de waterhuishoudkundige effecten voor 2050 gebruikt. Dit betreft voorspellingen van het rivierpeil op basis van het Landelijk SobekModel Light (LSM Light). Deze gegevens zijn voor alle scenario's op gedetailleerd niveau (per rivierkilometer of minder) beschikbaar voor locaties langs de verschillende deelgebieden (Figuur 2.1).



Figuur 2.1. Ligging van de deelgebieden van de Rijn en Maas

Voor de Rijn zijn de volgende deelgebieden onderscheiden en beschouwd (zie Figuur 2.1):

- Gelderse Poort (hotspot gebied in Van der Sluis et al., 2020);
- Waal, van Nijmegen tot Vuren;
- Zuidelijke IJssel (tussen Doesburg en Deventer);
- IJssel-Vechtdelta (hotspot gebied);
- Gestuwde panden van Neder-Rijn en Lek, tot de stuw bij Hagestein.

Voor de Maas zijn de volgende deelgebieden onderscheiden en beschouwd (Figuur 2.1):

- Bovenmaas;
- Grensmaas (hotspot gebied);
- Zandmaas;
- Bedijkte Maas tot de stuw bij Lith.

De begrenzing van bovengenoemde gebieden wijkt op enkele punten af van de gehanteerde grenzen van de Natuurverkenning Grote rivieren (NVGR). Binnendijkse gebieden (zoals de Groenlanden of Rijnstrangen) zijn niet meegenomen, en ook de begrenzing van de buitendijkse gebieden wijkt op details af.

2.2 Afbakening en uitgangspunten

Klimaatverandering heeft invloed op vele processen in rivierecosystemen. In dit rapport wordt alleen ingegaan op de effecten van lage rivierpeilen; de effecten van hogere (water)temperatuur, inundaties en verminderde stroming zijn vooralsnog buiten beschouwing gelaten.

Voor de toekomst worden tijdens de zomermaanden lagere waterstanden in de rivier verwacht. Deze lage waterstanden kunnen het gevolg zijn van rivierinsnijding, al dan niet in combinatie met lagere rivierafvoeren. Het rivierpeil is direct van invloed op de grondwaterstand in aangrenzende uiterwaarden of winterbed/rivierbed. De grondwaterstand in uiterwaarden fluctueert namelijk mee met schommelingen in het rivierpeil, zij het (sterk) vertraagd. Tijdens dalende rivierpeilen infiltreert er grondwater vanuit de uiterwaarden richting de hoofdstroom, terwijl deze stroming omgekeerd is bij een hoger rivierpeil. Aanvullend hierop wordt de grondwaterstand in uiterwaarden beïnvloed door neerslag, verdamping, wegzijging en kwel vanuit aangrenzende gebieden (zoals de Maasterrassen, Veluwe of Utrechtse heuvelrug). In dit rapport worden alleen de effecten van lage rivierstanden bepaald. De effecten van kwel zijn niet meegenomen, omdat hierover onvoldoende nauwkeurige informatie beschikbaar is.

Naast lage rivierpeilen zorgt klimaatverandering ook voor hogere rivierafvoeren tijdens de wintermaanden. In de korte doorlooptijd van dit project bleek het echter technisch niet mogelijk om veranderingen in overstromingsduur voldoende nauwkeurig te kwantificeren. Bovendien hebben lagere rivierpeilen in het groeiseizoen (resultierend in verdroging van uiterwaarden) naar verwachting een sterker ecologisch effect dan hogere winterafvoeren.

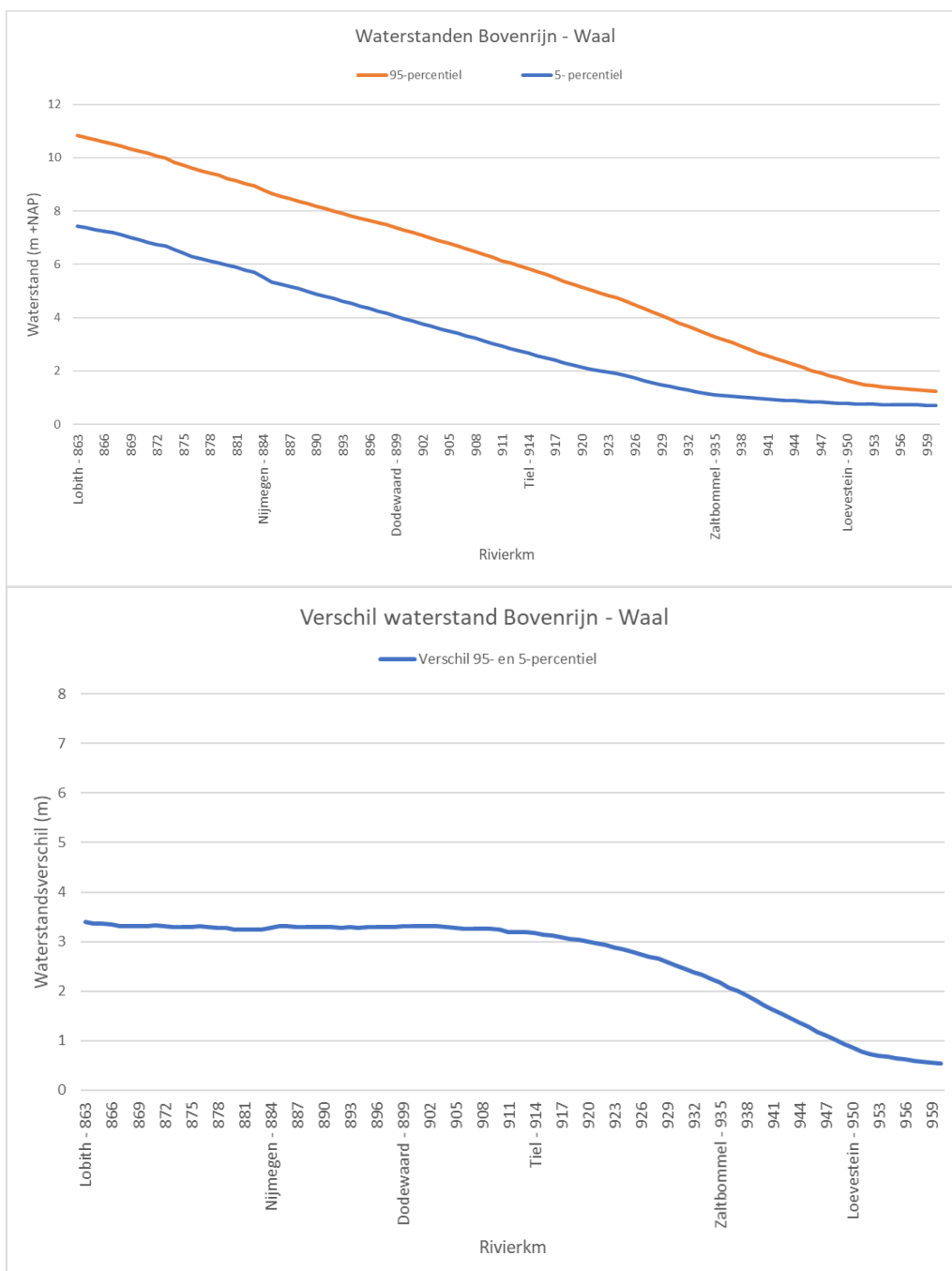
2.3 Hydrologie van Rijn en Maas

Tussen de trajecten van de Rijn en Maas zijn er grote verschillen in rivierafvoer, verhang en ondergrond, waardoor de processen van stroming, erosie en sedimentatie in elk riviertraject anders verlopen. De effecten van lage rivierafvoeren worden in belangrijke mate bepaald door verschillen in het peilverloop tussen de verschillende riviertrajecten. Dit is in onderstaande paragraaf nader omschreven.

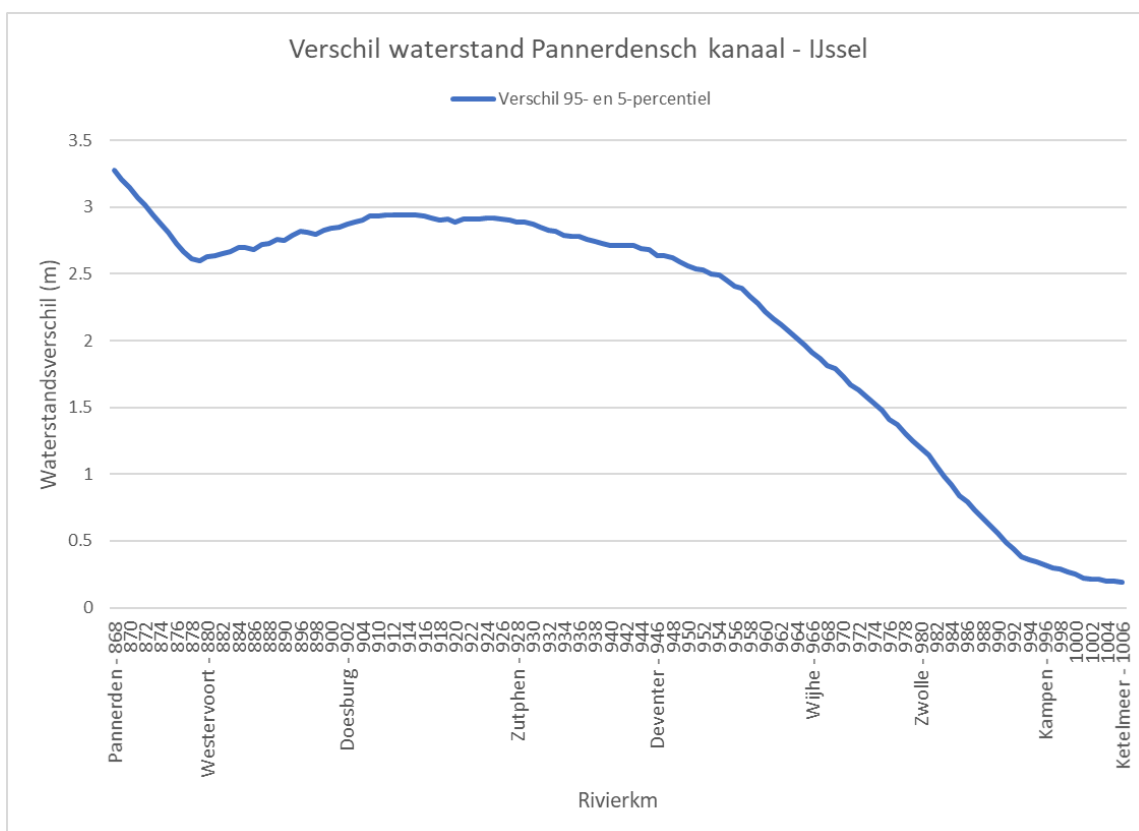
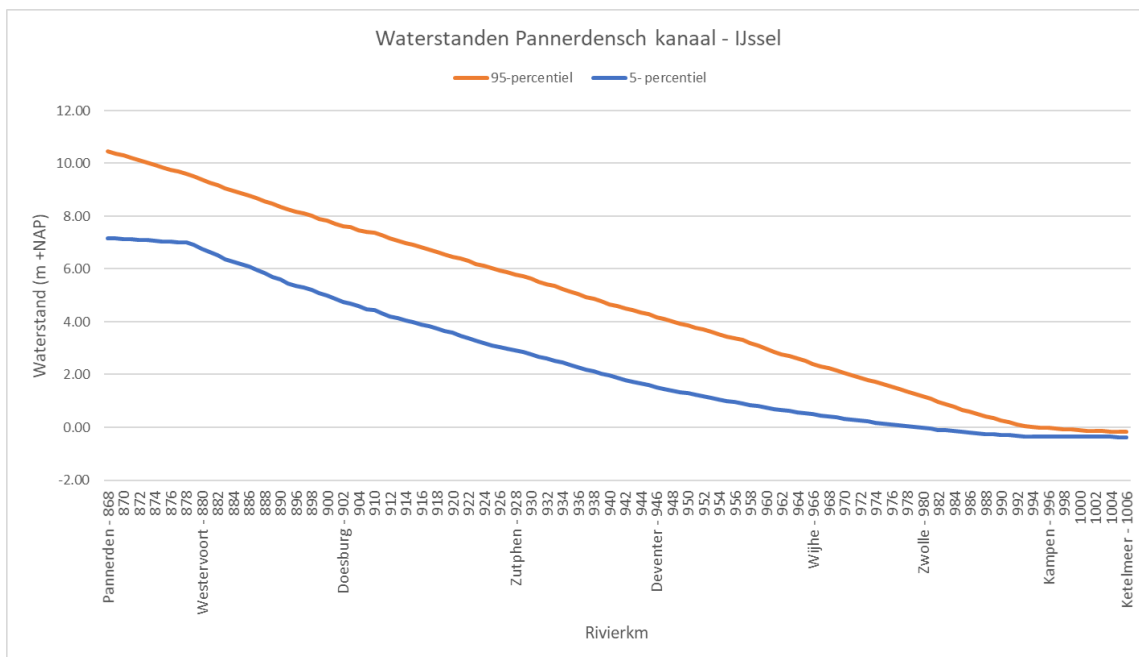
2.3.1 Peilregime van de Rijn

In Figuur 2.2 t/ 2.4 is de huidige toestand van het waterstandsverloop van de drie Rijntakken weergegeven. Tussen de Rijntakken bestaan grote verschillen in waterstandsfluctuaties in de hoofdstroom en zijn er tevens grote verschillen tussen boven- en benedenstreams. De grootste verschillen treden op in het bovenstroomse traject nabij Lobith. Dit geldt zowel binnen één groeiseizoen als tussen groeiseizoenen van opeenvolgende jaren. Langs de ongestuwde Waal en IJssel dempen de fluctuaties in stroomafwaartse richting uit. Deze uitdemping verloopt zeer geleidelijk. Langs grote delen van de Waal kan het peilverschil tijdens het groeiseizoen (mei - oktober) tot vier meter bedragen (Figuur 2.2), en over een aanzienlijke lengte van de IJssel treden peilverschillen tot drie meter op (Figuur 2.3).

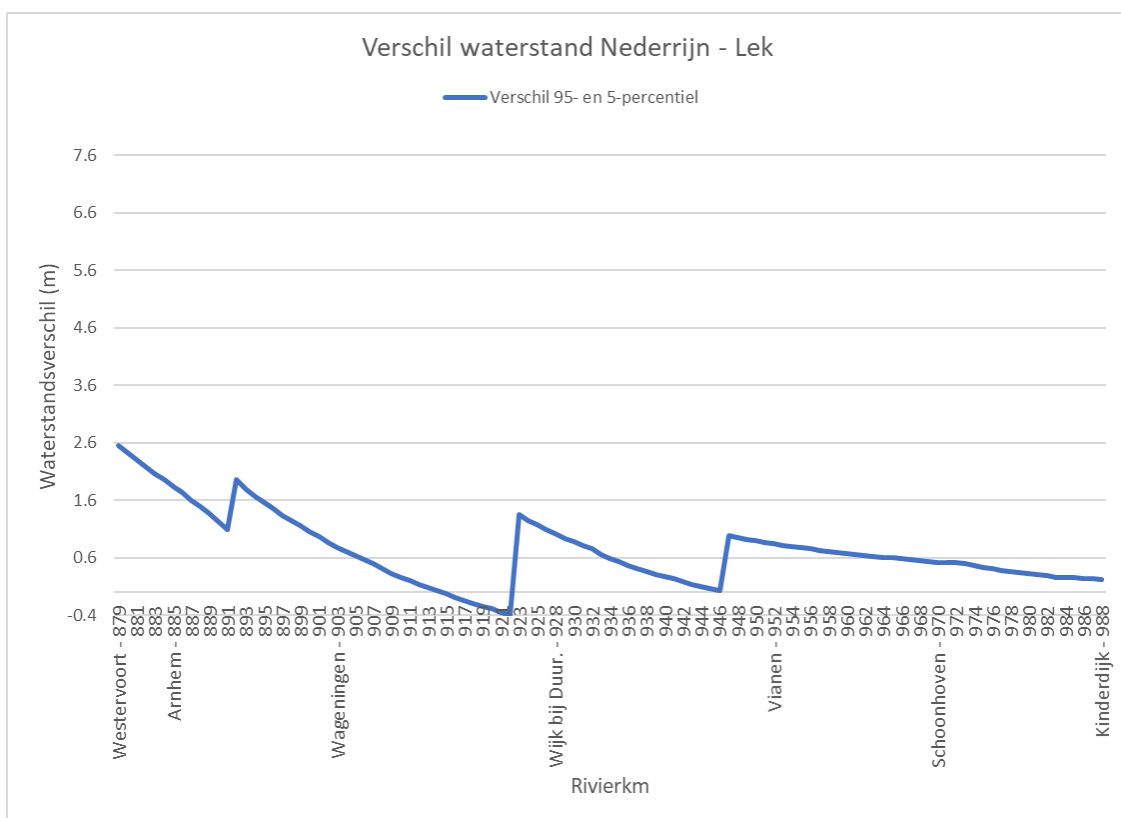
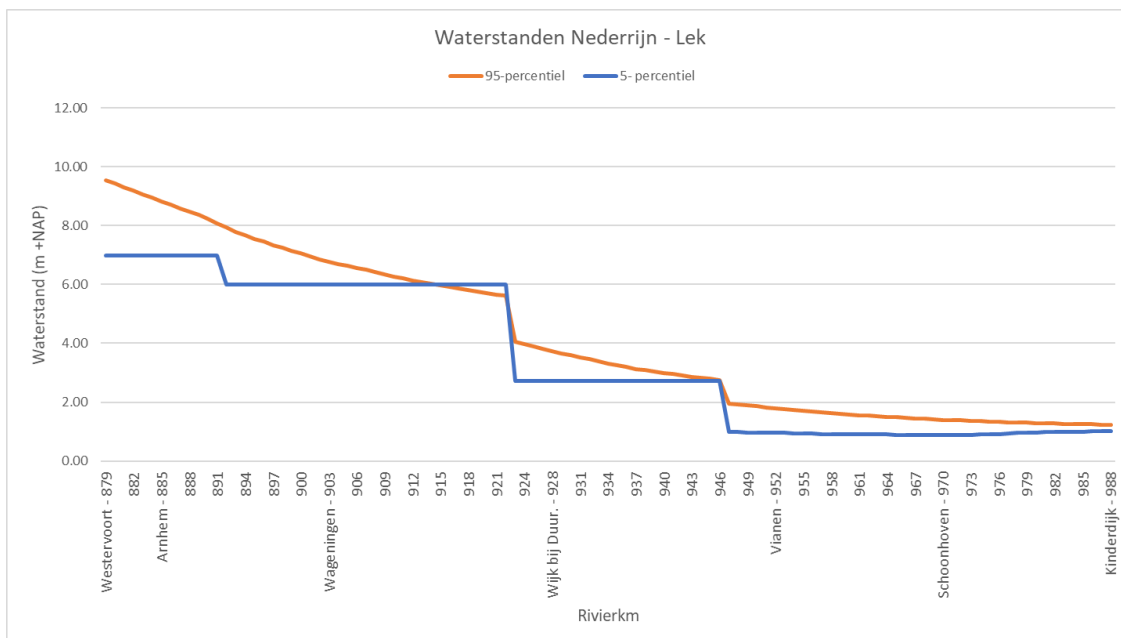
Oorspronkelijk bestond deze stroomafwaartse uitdemping ook in de Neder-Rijn/Lek, maar hier is de variatie vrijwel verdwenen door de kanalisatie met drie stuwen, die in de vorige eeuw zijn gebouwd. Deze stuwen beïnvloeden uitsluitend de rivierpeilen bij lage afvoer maar hebben geen invloed op het overstromingsregime van de uiterwaarden. Zodoende is het natuurlijke peilregime – met periodiek lage rivierpeilen in het groeiseizoen – in dit traject vervangen door een stabiel en gemiddeld hoger waterpeil (Figuur 2.4).



Figuur 2.2 Peilverloop van de Waal in benedenstroomse richting bij verschillende rivierpeilen in het groeiseizoen (mei t/m okt). In de onderste figuur is het verschil tussen deze rivierpeilen weergegeven (95-percentiel – 5-percentiel (tussen mei – okt, 1998-2017); overeenkomend met waterstanden van resp. 10,85 en 7,44 m +NAP bij Lobith). Deze figuren zijn gebaseerd op verhanglijnen uit 2018 die door RWS zijn aangeleverd. Deze verhanglijnen geven de relatie weer tussen de waterstand bij Lobith en stroomafwaarts gelegen locaties langs de betreffende Rijntakken.



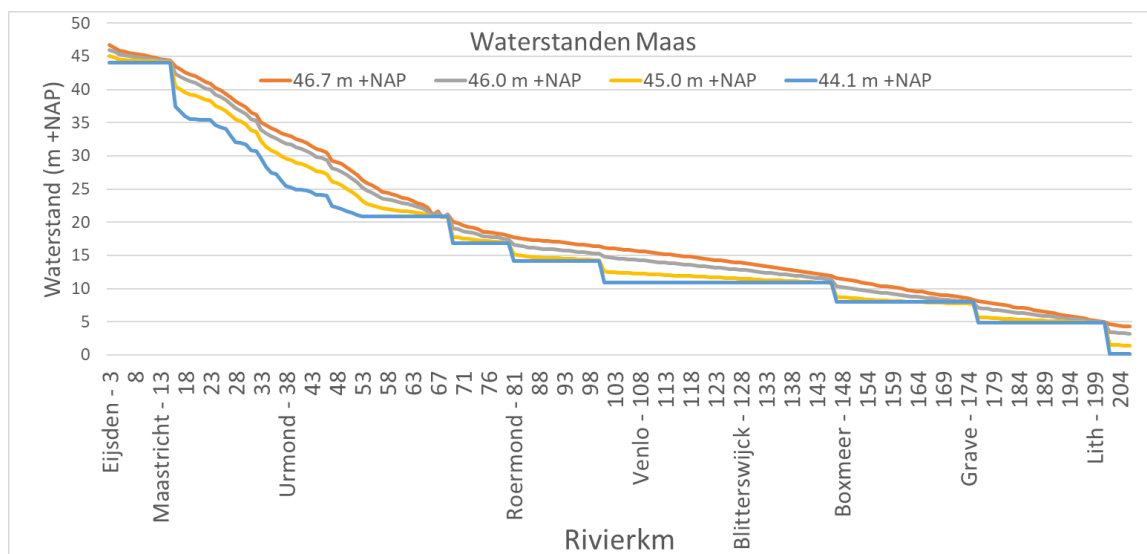
Figuur 2.3 Peilverloop van de IJssel in benedenstroomse richting bij verschillende rivierpeilen in het groeiseizoen (mei t/m okt). In de onderste figuur is het verschil tussen deze rivierpeilen weergegeven (95-percentiel – 5-percentiel (tussen mei – okt, 1998-2017); overeenkomend met waterstanden van resp. 10,85 en 7,44 m +NAP bij Lobith). Deze figuren zijn gebaseerd op verhanglijnen uit 2018 die door RWS zijn aangeleverd. Deze verhanglijnen geven de relatie weer tussen de waterstand bij Lobith en stroomafwaarts gelegen locaties langs de betreffende Rijntakken.



Figuur 2.4 Peilverloop van de Neder-Rijn en Lek in benedenstroomse richting bij verschillende rivierpeilen in het groeiseizoen (mei t/m okt). In de onderste figuur is het verschil tussen deze rivierpeilen weergegeven (95-percentiel – 5-percentiel (tussen mei – okt, 1998-2017); overeenkomend met waterstanden van resp. 10,85 en 7,44 m +NAP bij Lobith). Deze figuren zijn gebaseerd op verhanglijnen uit 2018 die door RWS zijn aangeleverd. Deze verhanglijnen geven de relatie weer tussen de waterstand bij Lobith en stroomafwaarts gelegen locaties langs de betreffende Rijntakken.

2.3.2 Peilregime van de Maas

In Figuur 2.5 is het waterstandsverloop van de Maas weergegeven. In vergelijking met de Rijn zijn de peilfluctuaties op de Maas een stuk kleiner. Met uitzondering van de Grensmaas zijn de verschillende trajecten van de Maas gestuwd. Deze stuwen beïnvloeden uitsluitend de rivierpeilen bij lage afvoer maar hebben geen invloed op het overstromingsregime van de uiterwaarden. Hierdoor is het rivierpeil stabiel tijdens het groeiseizoen (Figuur 2.5).



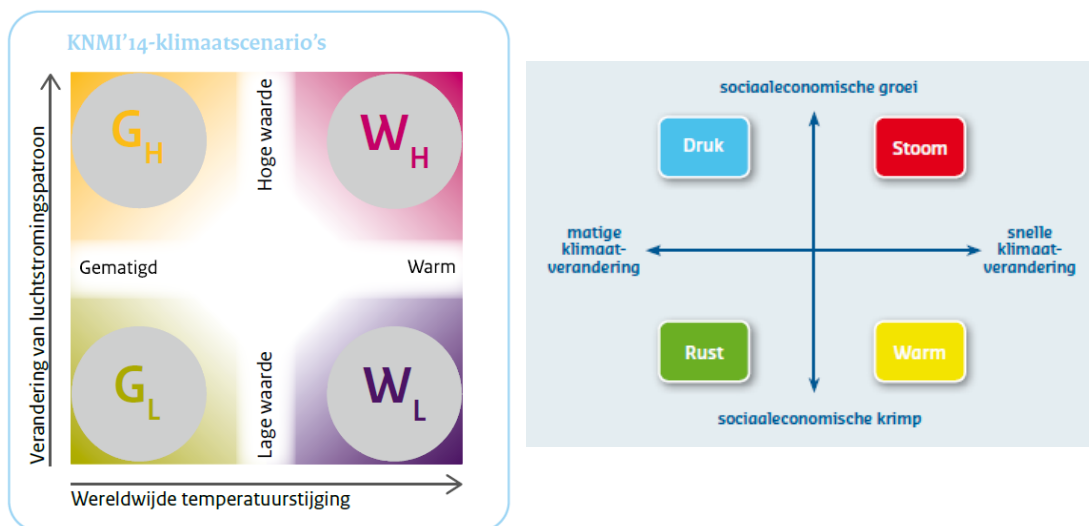
Figuur 2.5. Peilverloop van de Maas in benedenstroomse richting bij verschillende rivierpeilen

2.4 Gebruikte scenario's

2.4.1 Delta Programma Zoet Water (DPZW) - scenario's

Afleiding van scenario's

De gebruikte klimaatscenario's zijn afkomstig van het DeltaProgramma ZoetWater (DPZW). Elk van deze Deltascenario's is een combinatie van een klimaatscenario (KNMI'14) en een sociaaleconomisch scenario. Deze twee ontwikkelingen, klimaatverandering en sociaaleconomische ontwikkeling, zijn te beschouwen als autonoom: ze zijn afhankelijk van externe krachten waarop Nederland weinig directe invloed heeft. De snelheid van deze ontwikkelingen is zeer onzeker, hoewel de richting (zeker voor klimaatverandering) wel bekend is. De Deltascenario's beschrijven zo goed mogelijk de plausibele bandbreedte in deze ontwikkelingen, in hun onderlinge samenhang en met hun mogelijke consequenties voor ruimtegebruik en watervraag. Hiermee spannen of rekken we de bandbreedte van de mogelijke toekomstige zoetwaterproblematiek op.



Figuur 2.6 Links: KNMI '14 scenario's, rechts: Deltascenario's (voor een verdere toelichting, zie Wolters et al., 2018, 2019)

De KNMI'14 scenario's omvatten vier scenario's voor de toekomstige klimaatverandering: G_L , G_H , W_L en W_H (zie Figuur 2.6, links). In de (in 2017 geactualiseerde) Deltascenario's wordt het scenario's G_L als ondergrens (matige klimaatverandering) en het scenario W_H (sterke klimaatverandering) als bovengrens gebruikt (Figuur 2.6, rechts). De Deltascenario's Warm en Stoom zijn gebaseerd op het KNMI'14 scenario W_H . De Deltascenario's Druk en Rust zijn gebaseerd op KNMI'14 scenario G_L . Aanvullend is voor lage Rijnafvoeren en Maasafvoeren een droger scenario afgeleid dat gebaseerd is op het KNMI'14 scenario W_H : het zogeheten $W_{H,dry}$ - scenario.

Voor 2050 zijn in dit rapport de volgende scenario's gepresenteerd:

- Rust;
- Warm;
- $W_{H,dry}$ (een extra droog scenario, zie hierboven).

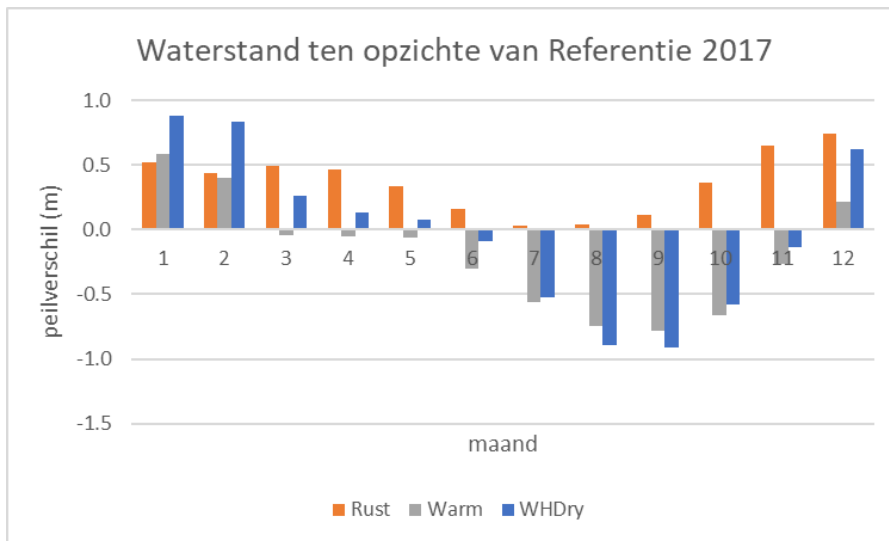
De resultaten van deze scenario's worden vergeleken met het referentiescenario. Dit referentiescenario betreft qua weersomstandigheden de periode 1911 – 2011 (dus 101 jaar). De resultaten voor de scenario's Druk en Stoom worden niet gepresenteerd, omdat de effecten hiervan vrijwel identiek waren aan de resultaten van resp. Rust en Warm.

Waterstanden in scenario's

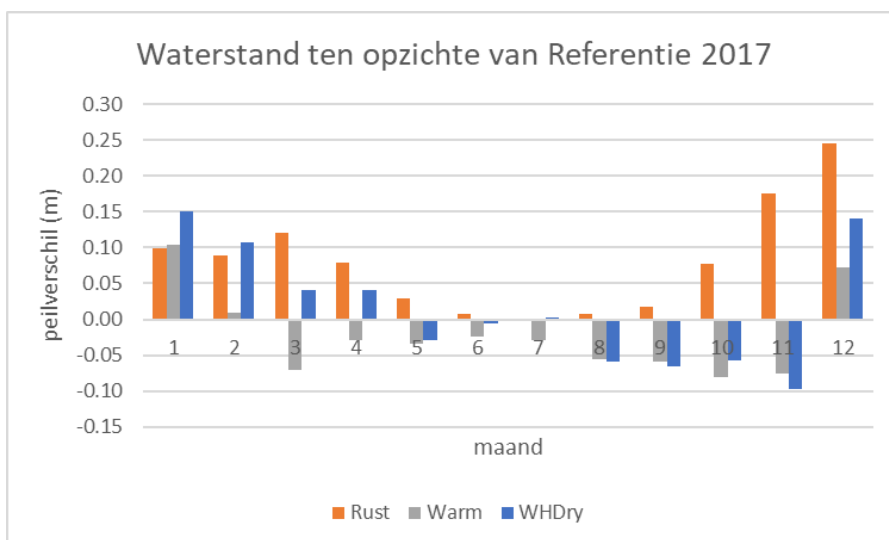
In Figuur 2.7 en Figuur 2.8 zijn de verschillen in waterstanden (uitgemiddeld per maand) voor de Rijn (bij Lobith) en de Maas (bij Eijsden) uitgezet, voor de scenario's Rust, Warm en $W_{H,dry}$ ten opzichte van de referentie. Voor de scenario's is gebruik gemaakt van het gemiddelde peil in mei, omdat de vegetatie in uiterwaarden in deze maand begint te groeien. De vochttoestand in deze maand bepaalt in belangrijke mate welke soorten tot ontwikkeling komen.

Uit de resultaten blijkt dat bij 'Rust' de rivierpeilen in mei hoger zijn, en het niet lager wordt in de zomermaanden. Voor de scenario's Warm en $W_{H,dry}$ daarentegen is er voor de Rijn nauwelijks verschil in mei-peil ten opzichte van de referentie, en is het rivierpeil in de zomermaanden fors lager, met name in augustus en september (0,7 – 0,9 meter lager dan de referentie). Voor de Maas zijn deze peildalingen bij de scenario's Warm en $W_{H,dry}$ veel kleiner (5-10 cm; Figuur 2.8).

In de scenario's zijn de effecten op het rivierpeil doorgerekend voor de huidige rivierinrichting, dat wil zeggen: met gestuwde condities in de Maas en Neder-Rijn/Lek, maar nog zonder de effecten van langsdammen en andere (toekomstige) rivierkundige maatregelen, zoals de Maaswerken en KRW maatregelen.



Figuur 2.7: Verschillen in maandgemiddelde waterstanden in de Rijn bij Lobith voor de scenario's Rust, Warm en WH_{Dry} voor 2050 ten opzichte van de referentie



Figuur 2.8: Verschillen in maandgemiddelde waterstanden in de Maas bij Eijsden voor de scenario's Rust, Warm en WH_{Dry} voor 2050 ten opzichte van de referentie

In de berekeningen voor de scenario's is geen rekening gehouden met voortschrijdende rivierinsnijding. De effecten van rivierinsnijding zijn in een afzonderlijke analyse onderzocht (zie volgende paragraaf).

2.4.2 Rivierinsnijding

In de Rijn en Maas treedt noemenswaardige bodemerosie alleen op in de bovenstroomse delen van de vrij afstromende Rijntakken. Dit omvat de trajecten Gelderse Poort, Waal en Zuidelijke IJssel. In de Gelderse Poort is de rivierbodem 1 – 2 meter ingesneden in de afgelopen 100 jaar; voor de Waal en Zuidelijke IJssel is deze waarde 0,2 – 0,8 meter over deze periode (Ylla Arbos et al., 2019).

Op dit ogenblik kunnen geen voorspellingen worden gedaan voor de snelheid van bodemerosie voor de komende decennia. Deze is namelijk sterk afhankelijk van eventuele maatregelen om de erosie van de rivierbodem tegen te gaan. Voor de analyses is uitgegaan van een hypothetische bodemerosie van resp. 20, 40 en 60 cm daling van de rivierbodem ten opzichte van het jaar 2017. Ter indicatie: voor de Gelderse Poort zou in 2050 circa 60 cm bodemdaling worden bereikt bij een voortschrijdende erosie van juist die 2 cm/jaar.

2.5 Methode

2.5.1 Beschikbaar kaartmateriaal

De analyses zijn uitgevoerd voor twee inrichtingsvarianten, namelijk:

- 1 De huidige situatie (gebaseerd op kaarten van de vierde cyclus ecotopenkartering);
- 2 Het wensbeeld voor ecotopenverdeling in 2050 (gebaseerd op de kaart die is aangeleverd door WEnR; Van der Sluis et al., 2020).

De gebruikte ecotopenkaart voor stap 1 betreft de meest recente ecotopenkaart Rijntakken-Oost (vierde cyclus ecotopenkartering). Deze kaart is door Wageningen Environmental Research aangepast, waarbij de kaartvlakken zijn versneden op een raster van 250 x 250 meter. Aan deze ecotopenkaart zijn data toegekend over intensiteit van kwel en wegzijging, en de gemiddelde jaarlijkse overstromingsduur.

De ecotopenkaart voor het wensbeeld van de ecotoopverdeling in 2050 is gebaseerd op de kaart die in het kader van een PAGW-studie door WEnR is opgesteld (Van der Sluis et al., 2020). Het startpunt voor dit wensbeeld waren de kaarten van de vijfde cyclus ecotopenkartering die in laatstgenoemd rapport zijn aangepast voor de gewenste situatie in 2050.

De analyses zijn uitgevoerd voor drie van de vier hotspot gebieden uit Van der Sluis et al. (2020), namelijk de Gelderse Poort, IJssel-Vechtdelta, Grensmaas. Hiernaast zijn ook de andere riviertrajecten in het bovenrivierengebied van Rijn en Maas bij de analyses betrokken. De Biesbosch is buiten beschouwing gelaten vanwege het ontbreken van recente ecotopenkaarten.

2.5.2 Aanpassingen aan ecotopenkaart

De grondwaterstand in de uiterwaarden is sterk afhankelijk van de hoogteligging van het gebied ten opzichte van het rivierpeil in de aangrenzende hoofdstroom van de rivier. De door WEnR aangeleverde ecotopenkaart is opgeknipt in kleinere polygonen om zo preciezere resultaten te verkrijgen voor de hoogteligging van de uiterwaarden. Hierbij is het gedeelte van de ecotopenkaart dat overlap heeft met het AHN3 opgedeeld in stukken van maximaal 25 x 25 meter, met behoud van het oorspronkelijke (gedetailleerdere) schaalniveau van de ecotopenkaart. Op deze wijze is een zo nauwkeurig mogelijke hoogteligging toegekend aan de ecotopen.

Vervolgens zijn uiterwaardplassen en met de rivier verbonden open wateren uit de ecotopenkaart als aparte groep geïnclassificeerd (zie paragraaf 2.5.4). De resterende ecotopen zijn in dit project opgevat als het terrestrische deel van de uiterwaarden. Voor iedere polygoon in het terrestrische deel van de ecotopenkaart zijn de volgende eigenschappen bepaald:

- De gemiddelde hoogteligging volgens het AHN3_5m_maaiveld (meter +NAP);
- Het dichtstbijzijnde uitvoerpunt van het Landelijk Sobek Model (LSM light);
- Het riviertraject waarin de ecotoop gelegen is (zie paragraaf 2.1, voor trajectindeling van Rijn en Maas).

2.5.3 Berekening van grondwaterstanden in terrestrische ecotopen

Bij de berekening van grondwaterstanden in het terrestrische deel van de uiterwaarden is er vanuit gegaan dat het gemiddelde rivierpeil in resp. mei en oktober gelijk is aan het grondwaterpeil in aangrenzende uiterwaarden in deze twee maanden.

Door middel van een Python-script zijn de maandgemiddelde waterstanden van de LSM-data per rivierkilometer (of kortere afstand) gekoppeld aan de ecotopen in aangrenzende uiterwaarden. Door de waterstanden te vergelijken met de hoogteligging van een ecotoop kan de diepte van de grondwaterstand worden geschat.

Omdat gekeken wordt naar langjarige effecten wordt binnen het betreffende scenario het gemiddelde rivierpeil over alle jaren gebruikt. Omdat de maanden mei en oktober ecologisch gezien de beslissende maanden zijn voor het al dan niet voorkomen van soorten, is ervoor gekozen om de resultaten voor deze maanden te gebruiken. Voor beide maanden is de oppervlakte van de verschillende ecotooptypen voor uiterwaarden binnen een riviertraject geïnclassificeerd in een mate van drooglegging (aan de hand van de berekende grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld, volgens tabel 2.1). Hierbij is geprobeerd om deze indeling te koppelen aan de grondwatertrappen-indeling van ooibossen (Wolf et al., 2001). De stappen van laatstgenoemde indeling zijn echter vrij grof (klasse 0 tot -50 cm t.o.v. maaiveld viel bijvoorbeeld in één categorie). Hierdoor is deze indeling minder geschikt om de effecten van rivierinsnijding te bepalen. Om deze reden is een kleinere klassen-indeling gehanteerd. De grens van 1,2 meter beneden het maaiveld komt echter wel overeen met deze indeling (overeenkomend met de bovengrens voor hardhoutooibos (Wolf et al., 2001)). Voor een goede effectbeoordeling van lagere rivierpeilen is het essentieel dat ook voor andere ecotooptypen een soortgelijke (ecologisch onderbouwde) indeling met grondwatertrappen beschikbaar komt. Aan de hand van deze informatie kan vervolgens de mate van verdroging gekwantificeerd worden (zie paragraaf 4.4: Aanbevelingen voor vervolg). In dit rapport zijn de (kwalitatieve) oordelen over verdroging gebaseerd op expert judgement.

Tabel 2.1. Indeling van de grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld voor de verdeling van ecotopen in vochtigheidsklassen

Drooglegging	Bovengrens grondwater) (meter - maaiveld)	Ondergrens grondwater (meter - maaiveld)
Overstroomd	-	< 0,0
Nat	0	< 0,4
Vochtig	0,4	< 0,8
Droog	0,8	< 1,2
Zeer droog	1,2	-

De ecotopen in de uiterwaarden zijn samengevoegd tot een aantal ecotoopclusters (zie tabel 2.2). Vervolgens zijn de ecotoopclusters 'bebouwd' en 'overstromingsvrij' verwijderd. Laatstgenoemd cluster omvatte namelijk een aanzienlijk binnendijs areaal in de IJssel-vecht Delta en Gelderse Poort; bovendien is de hoogteligging van overstromingsvrije terreindelen in uiterwaarden zo hoog, dat aangenomen is dat de invloed van grondwater hier verwaarloosbaar is. Voor de resterende ecotoopclusters is de grondwaterstandverdeling per riviertraject gepresenteerd in hoofdstuk drie.

Tabel 2.2. Indeling van terrestrische ecotopen in ecotoopclusters. De ecotopen in onderstaande tabel zijn aangeleverd door WEnR; deze ecotopen zijn in dit project samengevoegd tot ecotoopclusters. De resultaten worden in hoofdstuk 3 per ecotoopcluster gepresenteerd. Overstromingsvrije en bebouwde ecotopen zijn vooraf uit de analyses verwijderd.

Ecotoopcluster	Ecotoop
Akker/boomgaard	Oeverwal of uiterwaard akker
Akker/boomgaard	Uiterwaard akker
Akker/boomgaard	Uiterwaard hoogstamboomgaard
Akker/boomgaard	Uiterwaard laagstamboomgaard
Akker/boomgaard	Hoogstamboomgaard in oever
Akker/boomgaard	Akker in oever
Antropogeen onbegroeid	Onbegroeid (antropogeen) in oever
Antropogeen onbegroeid	Oeverwal of uiterwaard onbegroeid (antropogeen)
Antropogeen onbegroeid	Uiterwaard onbegroeid (antropogeen)
Bos	Uiterwaard natuurlijk bos
Bos	Zachthout ooibos in oever
Bos	Zachthout struweel in oever
Bos	Productiebos in oever
Bos	Uiterwaard productiebos
Bos	Oeverwal of uiterwaard productiebos
Bos	Oeverwal of uiterwaard natuurlijk bos
Grasland	Oeverwal of uiterwaard grasland (natuurlijk of productie)
Grasland	Oeverwal of uiterwaard natuurlijk grasland
Grasland	Oeverwal of uiterwaard productiegasland
Grasland	Uiterwaard grasland (natuurlijk of productie)
Grasland	Uiterwaard natuurlijk grasland
Grasland	Productiegasland in oever
Grasland	Oeverwal of uiterwaard grasland (natuurlijk of productie)
Grasland	Uiterwaard productiegasland
Moeras	Zoetwater biezenegors
Moeras	Helofytenmoeras (riet/moerasplanten) in oever
Moeras	Moerasruigte in oever
Moeras	Moerassig overstromingsgrasland in oever
Moeras	Moerassig overstromingsgrasland/productiegasland in oever
Moeras	Uiterwaard riet
Ruigte	Uiterwaard ruigte
Ruigte	Oeverwal of uiterwaard ruigte
Schaars begroeid	Vegetatie met lage bedekking (5 - 25%) in oever
Schaars begroeid	Uiterwaard vegetatie met lage bedekking (5 - 25%)
Schaars begroeid	Oeverwal of uiterwaard onberoeid (natuurlijk)
Schaars begroeid	Oeverwal of uiterwaard vegetatie met lage bedekking (5 - 25%)
Struweel	Uiterwaard struweel
Struweel	Oeverwal of uiterwaard struweel
Zandplaten	Zoete zandplaten
Grindbanken	Grindbanken
Hard substraat	Matig tot sterk dynamisch hard substraat onder invloed van zoet water

2.5.4 Berekening van droogval in geïsoleerde uiterwaardplassen

Voor de veranderingen in waterdiepte en droogval van geïsoleerde uiterwaardplassen is dezelfde werkwijze gehanteerd als in de Natuureffectmodule Grote Rivieren van DPZW (Van Geest et al., 2019). De waterdiepte is per uiterwaardplas uitgerekend. Hiertoe zijn vanuit de ecotopenkaart van Rijkswaterstaat ecotopen van het type I.1, I.1_m, I.3, I.5, RwD, RwM, RwO en RwX geïnterpreteerd als zijnde een geïsoleerde uiterwaardplas. De gemiddelde waterdiepte van deze ecotopen is overgenomen van de ecotoopspecifieke eigenschappen zoals gespecificeerd op de ecotopenkaart. Hierbij zijn de volgende dieptecategorieën toegekend:

Ecotoop	Gemiddelde diepte (m)
Dynamisch ondiep	0,25
Ondiep	0,50
Matig diep	2,00
Zeer diep	4,00

Aan iedere plas is de betreffende dieptecategorie toegekend. Op basis van meetgegevens van 100 geïsoleerde ondiepe uiterwaardplassen langs de Rijn is vastgesteld dat de maximale waterdiepte in een plas doorgaans twee maal de gemiddelde waterdiepte betreft.

Om de waterdiepte in mei af te leiden, is aangenomen dat de waterstand in de plas dan gelijk is aan de gemiddelde rivierstand in de maand mei ter hoogte van de plas. De rivierstanden zijn gegenereerd met de LSM-modellen van het Deltaprogramma Zoetwater en er is aangenomen dat het dichtstbijzijnde uitvoerpunt in de hoofdstroom representatief is voor de waterstand nabij de specifieke plas.

De waterstand in de plas in oktober is berekend met de formule uit Tabel 2.3. Deze formule is eveneens gebaseerd op veldgegevens van 100 geïsoleerde uiterwaardplassen langs de Nederlandse Rijntakken, waarbij de peildaling van juli 1999 t/m oktober 1999 is gemeten, evenals de kortste afstand tot de rivier en het sedimenttype (zand/klei) in de plas. In dit jaar traden in begin juli de hoogste waterstanden van het groeiseizoen op.

In deze formule is de waterstand in de rivier in mei opgenomen als indicator voor het plaspeil aan het begin van de zomer. Het verschil in rivierstand tussen mei en oktober bepaalt de grootte van de waterstandsverandering gecorrigeerd voor bodemtype en afstand tot de rivier of een aan de rivier aangetakt water. Zoals uit de formule in Tabel 2.3 blijkt, is de peildaling in de plas sterker naarmate het verschil in rivierpeil tussen mei en oktober groter is, naarmate de plas dichter bij de rivier ligt en de bodem ervan uit (goed doorlaatbaar) zand bestaat.

Voor het bodemtype geldt: klei = 0, zand = 1. Vooralsnog is bij een gebrek aan gegevens over de bodemopbouw in uiterwaarden uitgegaan van het bodemtype 'zand' voor alle plassen. Hierdoor kunnen de resultaten gezien worden als 'worst-case scenario', aangezien zand een beduidend grotere doorlatendheid heeft voor waterstroming dan klei. Dat wil zeggen dat de plassen snel reageren op waterstandsveranderingen in de rivier. De afstand tot de rivier is bepaald door in GIS de kortste afstand van de geïsoleerde plas tot de rivier of een daarmee verbonden water te bepalen. Voor het berekenen van de waterdiepte in oktober wordt eenzelfde benadering gevolgd.

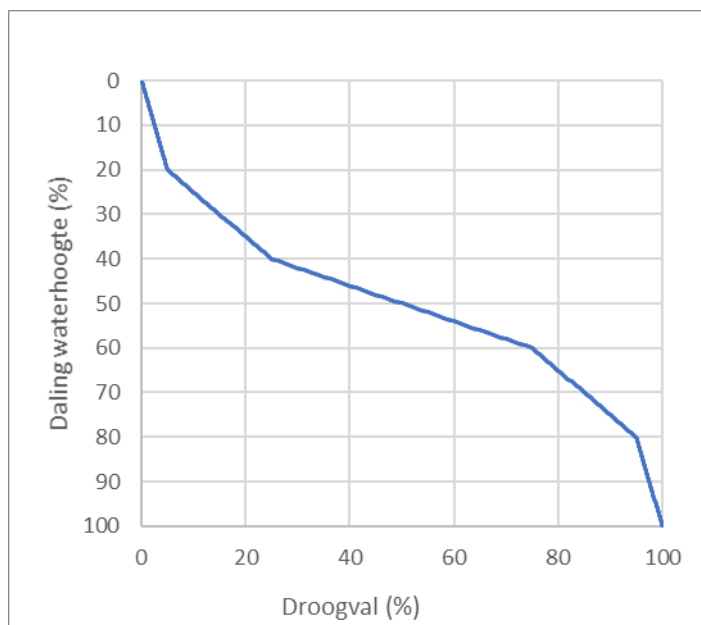
Tabel 2.3. Overzicht van de rekenstappen voor berekening van waterdiepte en droogval in geïsoleerde uiterwaardplassen.

Milieufactor	Formule
Waterdiepte mei	de waterstand in de plas is gelijk aan de gemiddelde rivierstand in de maand mei ter hoogte van de plas
Waterdiepte oktober	$WaterstandPlasOktober (m +NAP) = WaterstandRivierOktober (m +NAP) - 0.356 * Verschil\ Mei-Oktober (m) + 0.156 * Bodemtype - 0.079 * \ln(Afstand\ tot\ open\ water\ rivier (m))$
Droogval mei-okt	Berekend uit verschil waterpeil (mei-okt) en diepteprofiel, zie toelichting bij Figuur 2.2

Voor geïsoleerde plassen is een droogvalpercentage berekend aan de hand van de volgende factoren:

- de berekende waterdiepte in een bepaalde maand;
- de berekende waterpeildaling tussen mei en oktober in een bepaald jaar;
- een standaard diepteverdeling voor de plassen die is afgeleid uit veldgegevens van een honderdtal uiterwaardplassen (zie Figuur 2.9).

De bodems van de (Grens)maas bestaan veelal uit grind, dat sterk doorlatend is voor grondwatertransport. In deze studie is aangenomen dat het gemiddelde rivierpeil in mei en oktober gelijk staat aan het grondwaterpeil in aangrenzende uiterwaarden in deze maanden. Gezien de hoge doorlatendheid van grindbodems, is deze aanname aannemelijk voor de (Grens)maas. Langs de Rijntakken kan dit beeld afwijken, vanwege vertraging van de grondwaterstromen door kleilagen.



Figuur 2.9 Relatie tussen het droogvalpercentage in de plas en de daling van het waterpeil (uitgedrukt als percentage van de maximale waterdiepte)

De sigmoïde vorm van de curve is gebaseerd op de dieptefrequentieverdelingen van de 100 bemonsterde geïsoleerde uiterwaardplassen. Uit deze figuur blijkt dat bij waterstands daling van circa 40% van de maximale waterdiepte er circa 25% van het plasoppervlak is drooggevallen, bij een waterstands daling van 60% bedraagt het drooggevallen deel echter al 75% (zie Figuur 2.9).

2.5.5 Berekening van waterdiepte en droogval in permanent met de rivier verbonden uiterwaardwateren

Naast geïsoleerde uiterwaardplassen (die alleen bij hoge rivierafvoer overstromen) is er nog een tweede categorie plassen, namelijk wateren die permanent met de rivier verbonden zijn. Dit betreft nevengeulen en strangen die tijdens de zomermaanden in open verbinding staan met de rivier.

De veranderingen in waterdiepte en droogval in deze wateren zijn alleen berekend voor het wensbeeld in 2050. Hierbij is aangenomen dat de verandering in het waterpeil van deze plassen identiek is aan de verandering in het rivierpeil ter hoogte van deze plassen. Aan ieder water is een bepaalde diepteklasse en diepteprofiel toegekend. Vervolgens is bepaald welk deel van de plas droogvalt bij de verschillende scenario's; de methode die hierbij is gehanteerd is identiek aan die van geïsoleerde uiterwaardplassen (zie paragraaf 2.5.4).

2.6 Consequenties van aannames

In deze studie is aangenomen dat het maandgemiddelde rivierpeil voor de maanden mei en oktober gelijk is aan het gemiddelde grondwaterpeil in aangrenzende uiterwaarden in deze maanden. Bij deze aanname wordt echter geen rekening gehouden met verschillen in doorlatendheid van de bodem, afstand tot de rivier en kwel en wegzijging. In kleibodems is de doorlatendheid geringer dan in zandbodems, en de snelheid van verandering van de grondwaterstand neemt af met toenemende afstand tot de rivier. In gevallen waarin sprake is van (diepe) kwel uit omringende Pleistocene hogere gronden kan verwacht worden dat de grondwaterstand hoger is dan berekend.

Bovengenoemde aanname is dus waarschijnlijk een significante fout in de berekening van de grondwaterstand. Deze fout is echter wel consistent over alle scenario's en alle jaren, waardoor de verschilberekeningen tussen de scenario's naar verwachting de juiste trend aangeven. Het verschil in vertraging tussen klei- en zandbodems in uiterwaarden langs de Midden-Waal ligt in de orde van enkele weken (Wolters, 2002). De bodem van uiterwaarden langs de Rijn bestaat veelal uit een kleidek, dat op grotere diepte overgaat in een zandbodem. Door deze bodemopbouw kunnen schijngrondwaterspiegels ontstaan. De grondwaterstand zakt immers slechts traag uit in de slecht doorlatende kleilaag, terwijl het grondwaterpeil in de onderliggende zandlaag veel sneller mee daalt met het rivierpeil. In het rivierdal van de Bovenmaas, Grensmaas en Zandmaas zal het grondwaterpeil de fluctuaties van het rivierpeil waarschijnlijk veel sneller volgen, vanwege de grotere doorlaatbaarheid van grindbodems langs deze riviertrajecten. Inzicht in de fout die door zulke processen ontstaat is van belang voor vervolganalyses van WEnR. Aanbevolen wordt om hiervoor gevoeligheidsanalyses uit te voeren (zie HS 4).

2.6.1 Bepaling van verandering in stroomsnelheid

Voor de bepaling van verandering in stroomsnelheid zijn analyses gedaan voor de gestuwde trajecten van de Maas en Nederrijn/Lek. Deze trajecten zijn hierbij opgedeeld in deelgebieden op basis van de KRW-waterlichamen en stuwpanden omdat deze naar verwachting verschillende stroomsnelheden hebben. Het Nationaal Water Model zoals gebruikt in het DPZW geeft uitvoer voor stroomsnelheid op LSM-segmenten, deze segmenten zijn gekoppeld aan de verschillende deelgebieden. Op basis van deze gebiedsindeling zijn voor de jaren 1976 t/m 2003 daggemiddelde stroomsnelheden per deelgebied berekend. Deze stroomsnelheden zijn vervolgens ingedeeld in de volgende klassen welke zijn gebaseerd op informatie over stromingspreferenties van rheofiele vissoorten (Buijse, 2016):

- ≤ 0.05 m/s
- 0.05 - 0.1 m/s
- 0.1 - 0.3 m/s
- 0.3 - 0.5 m/s
- 0.5 – 1.0 m/s
- > 1.0 m/s

In de opgeleverde Excel-sheet (getiteld: PAGW stroming scenario's) kan de verdeling over de stroomsnelheidsklassen per deelgebied en klimaatscenario inzichtelijk gemaakt worden. Daarnaast is ook onderscheid mogelijk tussen de data over het gehele jaar of alleen van de zomerperiode (maart t/m oktober).

NB De analyses voor stroomsnelheid zijn alleen uitgevoerd voor gestuwde riviertrajecten. Voor de vrij afstromende rivieren is aangenomen dat hier geen significante wijziging van de stroming optreedt.

3 Resultaten en discussie

In dit hoofdstuk worden alleen de resultaten besproken van de effecten van verandering van rivierafvoer op de (grond)waterstanden op de huidige ecotopenverdeling. De resultaten van soortgelijke analyses op de waterstanden voor de gewenste ecotopenverdeling in 2050 zijn weergegeven in bijgevoegde Excel-file (PAGW 2050 scenario's). Deze file dient als achtergronddocumentatie bij het project van WEnR (Van der Sluis *et al.*, 2020).

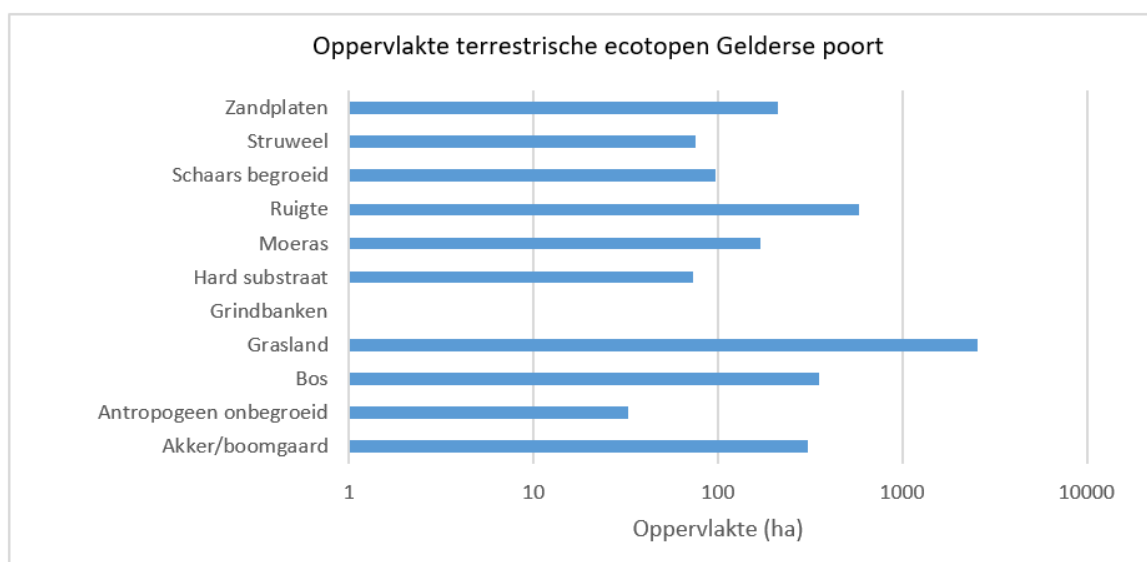
3.1 Rijntrajecten

Onderstaand worden de resultaten van de verschillende scenario's gepresenteerd voor de Rijn takken en Maas. Aanvullend zijn voor de Gelderse Poort, Waal en Zuidelijke IJssel de effecten van rivierinsnijding gekwantificeerd. Voor andere riviertrajecten is deze analyse niet uitgevoerd, omdat rivierinsnijding hier gering is. De ligging van de Rijntrajecten is aangegeven in Figuur 2.1.

3.1.1 Gelderse Poort

Terrestrische ecotopen

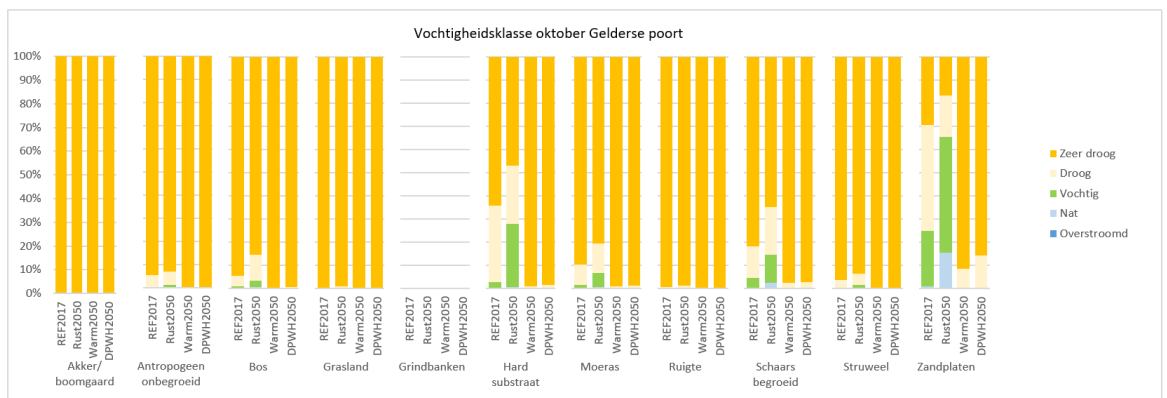
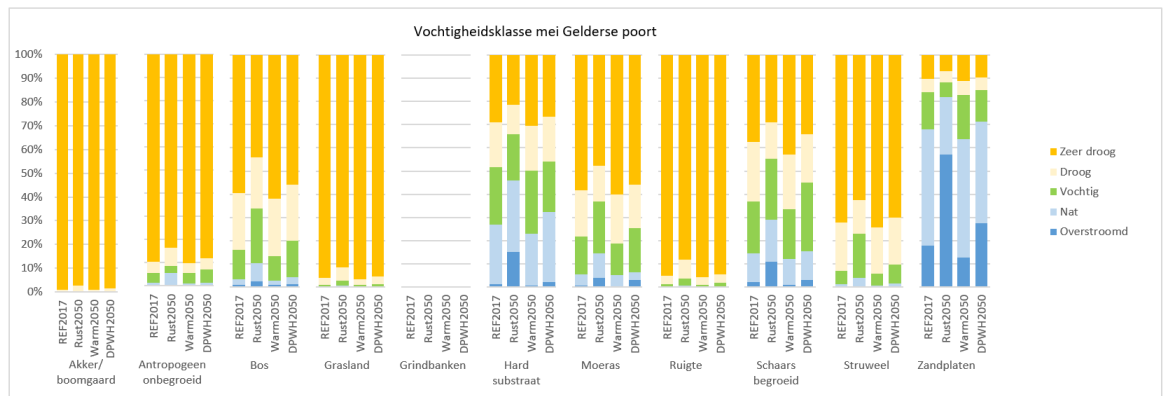
In het buitendijkse deel van de Gelderse Poort overheersen grasland en ruigtes. Ook is er aanzienlijk areaal aan bos, moeras, struweel, zandplaten en schaars begroeide terreindelen (Figuur 3.1).



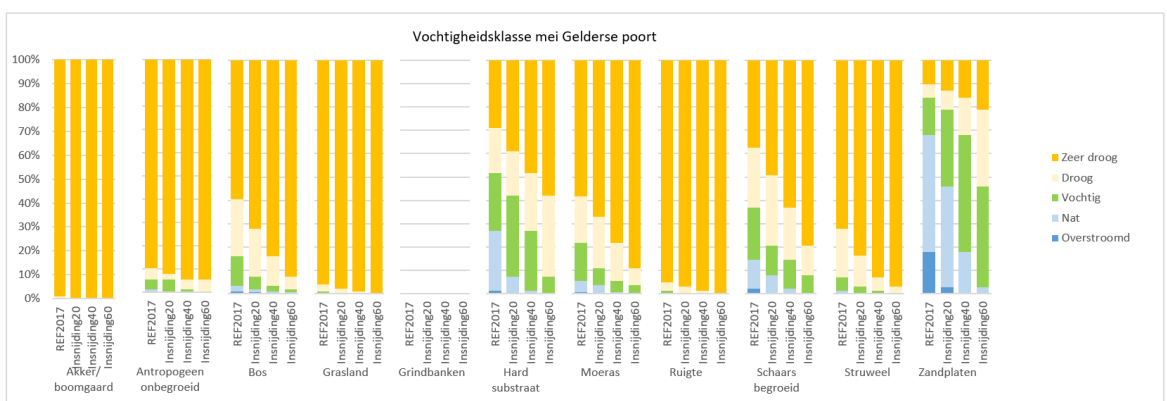
Figuur 3.1. Oppervlak van terrestrische ecotoopclusters in buitendijkse gebieden van de Gelderse Poort. Let op de logaritmische schaal op de x-as.

Uit Figuur 3.2 blijkt dat vooral zandplaten (rivieroeveren), schaars begroeide terreindelen en hard substraat (oeverbeschoeiing) in de Gelderse Poort een hoge grondwaterstand hebben. Daarentegen hebben terreindelen die als moerassen en graslanden zijn gekarteerd juist een lage grondwaterstand in mei. In oktober zijn echter vrijwel alle ecotoopclusters 'droog' tot 'zeer droog', ook in de huidige situatie (Figuur 3.2). Hierbij moet echter opgemerkt worden dat nog niet gekeken is naar het effect van dergelijke grondwaterstanden op het ecologisch functioneren van ecotopen. Voor een goede effectinschatting is een dergelijke evaluatie wel noodzakelijk; in de aanbevelingen voor vervolg wordt hier nader op ingegaan.

De verschillende scenario's voor rivierafvoer hebben niet veel invloed op bovenstaand beeld. Alleen in het 'Rust' scenario leidt het hogere gemiddelde rivierpeil in mei en oktober tot iets hogere grondwaterstanden, tot maximaal 10% (Figuur 3.2). Niettemin kunnen de zeer droge ecotopen toch nog droger worden, als gevolg van (langdurig) lagere grondwaterpeilen. Zoals hierboven aangegeven, is eerst een effectinschatting van de grondwaterstand op ecotopen alvorens de resultaten ecologisch kunnen worden geïnterpreteerd.



Figuur 3.2. Verdeling van de drooglegging van terrestrische ecotoopclusters in de Gelderse Poort voor de huidige situatie (referentie scenario) en prognose voor verschillende scenario's in mei en oktober rond 2050. Zie tabel 2.1 voor indeling van vochtigheidsklassen.



Figuur 3.3. Drooglegging van terrestrische ecotoopclusters in buitendijkse delen van de Gelderse Poort in de maand mei voor verschillende gradaties van rivierinsnijding (20, 40 of 60 cm) en de huidige situatie (referentiescenario). Zie tabel 2.1 voor indeling van vochtigheidsklassen.

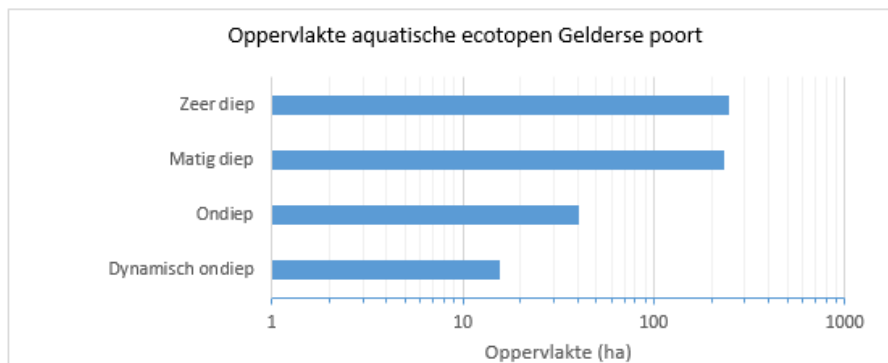
Rivierinsnijding heeft een veel grotere invloed op de grondwaterstand van de ecotopen (Figuur 3.3) dan de effecten van klimaatverandering op de rivierafvoer. Wanneer de insnijding tot 2050 in het huidige tempo (2 cm/jaar) voortschrijdt, dan zijn vrijwel alle natte en vochtige ecotopen in de Gelderse Poort verdwenen; de enige uitzondering hierop zijn zandplaten langs de rivieroever.

Aquatische ecotopen

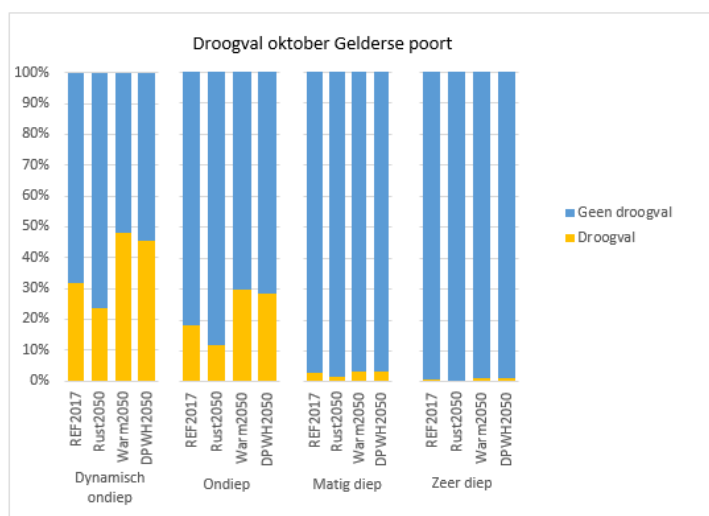
In het buitendijkse deel van de Gelderse Poort overheersen zeer diepe plassen en matig diepe plassen. Ook is er een kleiner areaal aan ondiepe plassen (Figuur 3.4).

In Figuur 3.5 zijn de verschillen in (gemiddelde) droogval weergegeven voor de scenario's en referentie. Als eerste valt op dat voor de referentie in de Gelderse Poort een aanzienlijk droogvalpercentage wordt berekend. Dit is conform de huidige situatie in het veld. In dit riviertraject treden namelijk aanzienlijke peilfluctuaties tussen jaren op, waardoor een bepaalde plas in het ene jaar wel kan droogvallen, en in het andere jaar niet. Aangezien deze droogvalpercentages worden uitgemiddeld over de jaren, wordt ook voor de huidige situatie een aanzienlijk droogvalpercentage berekend.

Voorts komt naar voren dat droogval toeneemt bij de scenario's Warm en WH_{Dry}, wat het gevolg is van de aanzienlijke peildaling in de nazomer van deze scenario's (zie figuur 2.5). Logischerwijs hebben deze peildalingen het meest effect in ondiepe plassen, en neemt droogval af naarmate de waterdiepte toeneemt.

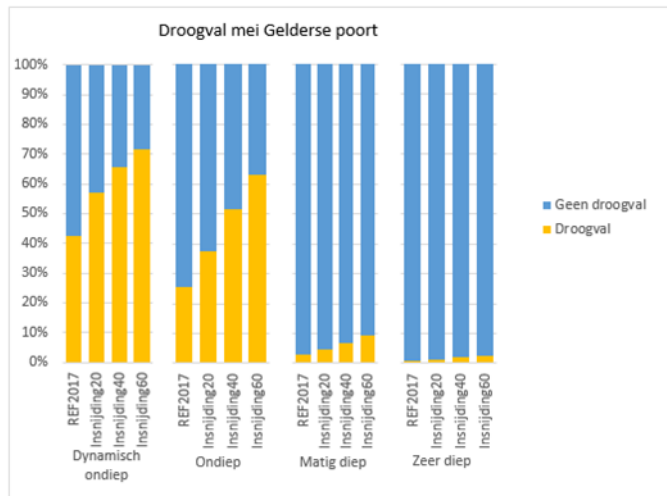


Figuur 3.4. Oppervlak van aquatische ecotopen in buitendijkse gebieden van de Gelderse Poort. Let op de logaritmische schaal op de x-as.



Figuur 3.5. Verdeling van droogval van aquatische ecotopen in buitendijkse gebieden van de Gelderse Poort voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in oktober rond 2050

Rivierinsnijding heeft een veel grotere invloed op de verdroging van uiterwaardplassen (Figuur 3.6) dan veranderingen in rivierafvoer ten gevolge van klimaatverandering. Wanneer de insnijding tot 2050 in het huidige tempo (2 cm/jaar) voortschrijdt, dan treedt een aanzienlijke verdroging op van ondiepe plassen in buitendijkse gebieden van de Gelderse Poort (circa 30%, zie Figuur 3.6). Deze plassen veranderen waarschijnlijk in (semi-)terrestrische habitats, zoals moeras en schaars begroeide ecotopen.

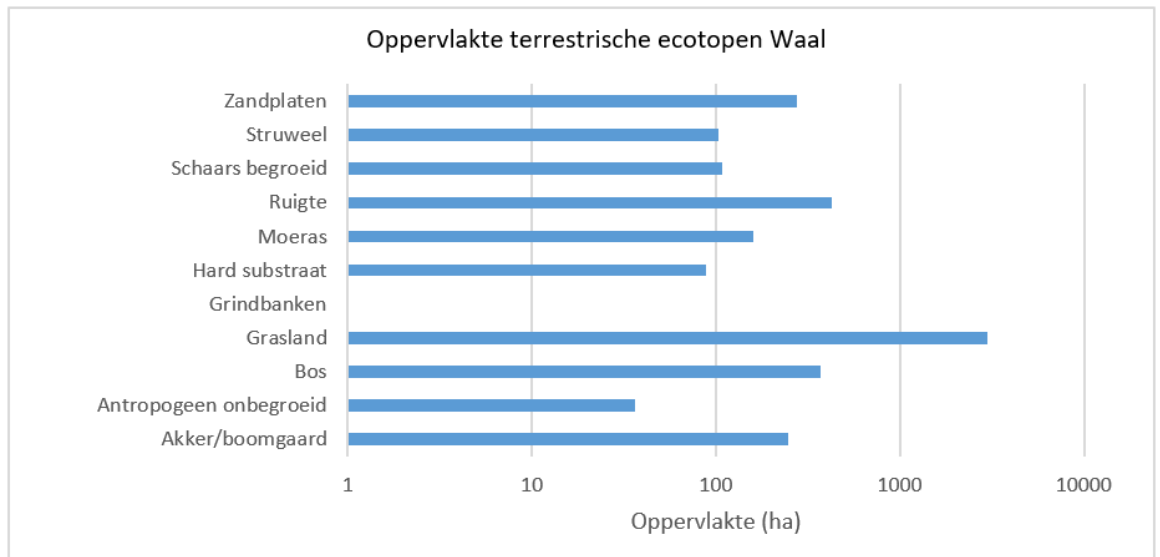


Figuur 3.6. Verdeling van droogval van aquatische ecotopen in buitendijkse gebieden van de Gelderse Poort in de maand mei voor verschillende gradaties van rivierinsnijding (20, 40 of 60 cm) en de huidige situatie (referentiescenario)

3.1.2 Waal

Terrestrische ecotopen

Net als bij de buitendijkse delen van de Gelderse Poort overheersen langs de Waal graslanden en ruigtes. Ook zijn er aanzienlijke arealen aan bos, moeras, struweel en schaars begroeide terreindelen (Figuur 3.7). De oppervlaktes van ecotoopclusters langs de Waal lijkt sterk op die van de Gelderse Poort.

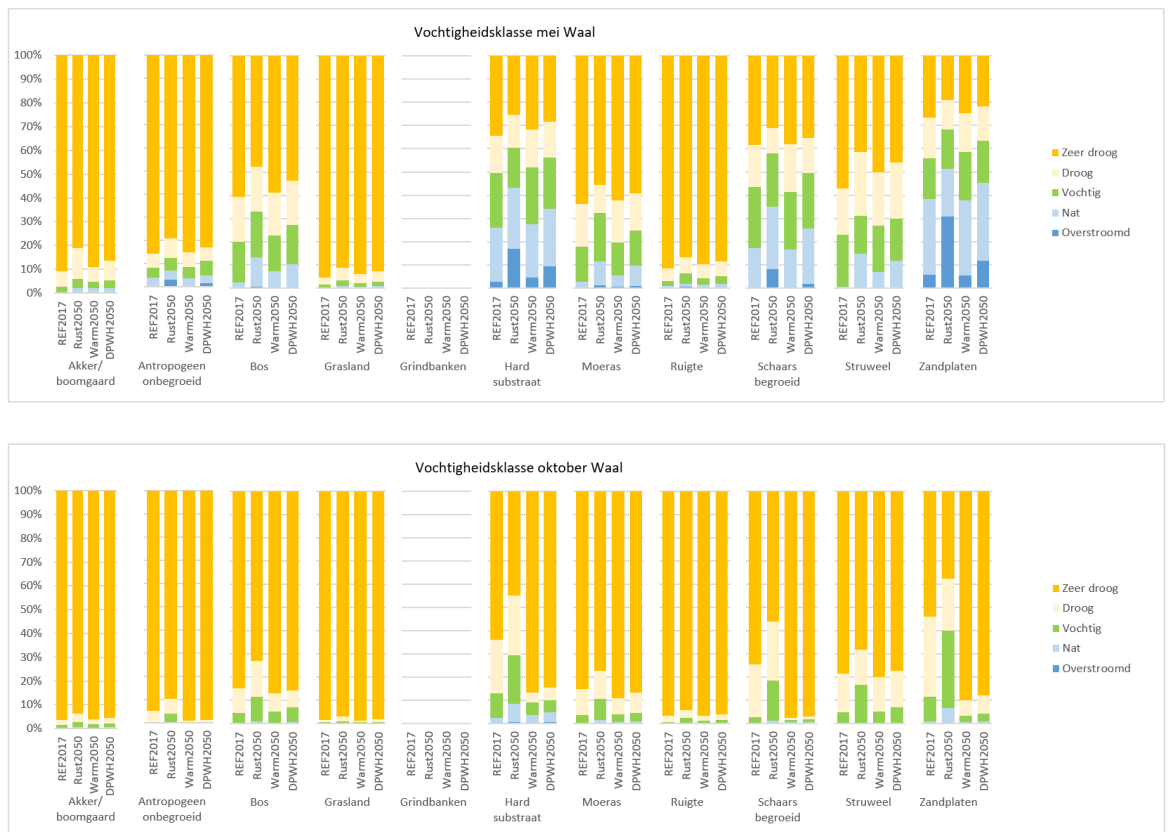


Figuur 3.7. Oppervlak van terrestrische ecotoopclusters in de Waal. Let op de logaritmische schaal op de x-as.

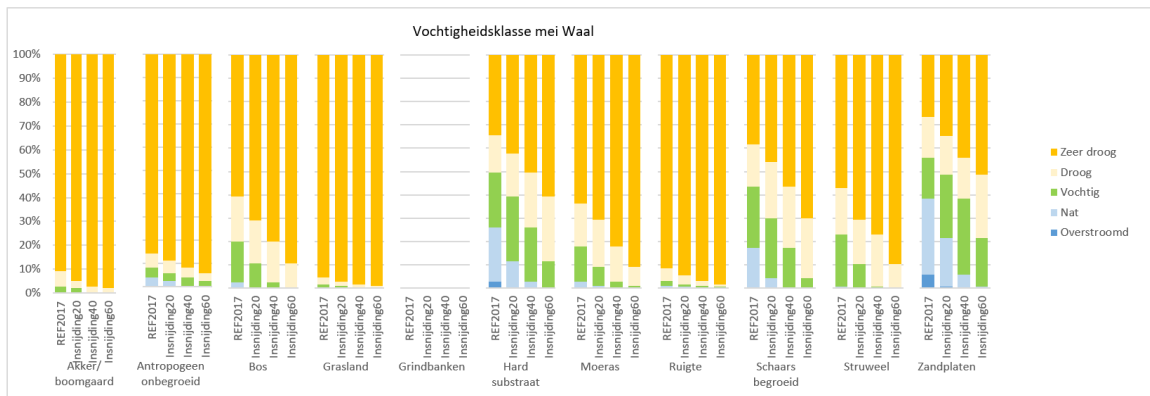
Uit Figuur 3.8 blijkt dat vooral zandplaten (rivieroever), schaars begroeide terreindelen en hard substraat (oeverbeschoeiing) langs de Waal een hoge grondwaterstand hebben. Daarentegen hebben terreindelen die als moerassen en graslanden zijn gekarteerd ook hier juist een lage grondwaterstand in mei. Net als in de Gelderse Poort zijn in oktober vrijwel alle ecotoopclusters 'droog' tot 'zeer droog', ook in de huidige situatie (Figuur 3.8).

De verschillende scenario's voor rivierafvoer hebben niet veel invloed op bovenstaand beeld. Alleen in het scenario 'Rust' leidt het hogere gemiddelde rivierpeil in mei tot iets nattere ecotoopclusters, met een toename van maximaal 10% (Figuur 3.8).

Rivierinsnijding heeft daarentegen wel een grote invloed op de grondwaterstand. Voor veel ecotoopclusters geldt dat een rivierinsnijding van 20 cm reeds tot een sterke afname van natte en vochtige ecotopen leidt, en bij 60 cm rivierinsnijding is vrijwel het gehele areaal droog (Figuur 3.9). Uitzondering hierop de zandplaten langs de rivieroever, die minder sterk in areaal achteruit gaan.



Figuur 3.8. Verdeling van de drooglegging van terrestrische ecotoopclusters langs de Waal voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in mei en oktober rond 2050. Zie tabel 2.1 voor indeling van vochtigheidsklassen.



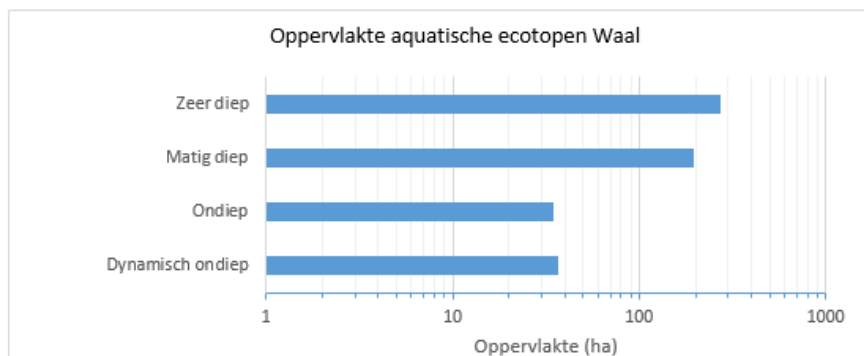
Figuur 3.9. Drooglegging van terrestrische ecotoopclusters langs de Waal in de maand mei voor verschillende gradaties van rivierinsnijding (20, 40 of 60 cm) en de huidige situatie (Referentiescenario). Zie tabel 2.1 voor indeling van vochtigheidsklassen.

Aquatische ecotopen

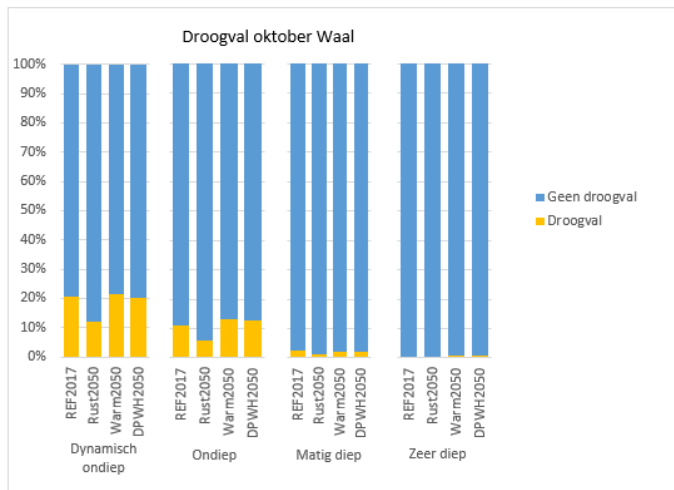
Langs de Waal overheersen zeer diepe plassen en matig diepe plassen met een lage overstromingsduur. Ook is er een klein areaal aan ondiepe plassen (Figuur 3.10).

In figuur 3.11 zijn de verschillen in (gemiddelde) droogval weergegeven voor de scenario's en de referentie. Als eerste valt op dat voor de referentie een aanzienlijk droogvalpercentage wordt berekend. Dit is conform de huidige situatie in het veld. Het rivierpeil varieert hier namelijk van jaar tot jaar, waardoor een bepaalde plas in het ene jaar wel kan droogvallen, en in het andere jaar niet. Aangezien deze droogvalpercentages worden uitgemiddeld over de jaren, wordt ook voor de huidige situatie een aanzienlijk droogvalpercentage berekend.

Voorts komt naar voren dat droogval toeneemt bij de scenario's Warm en WH_{Dry}, wat het gevolg is van de aanzienlijke peildaling in de nazomer van deze scenario's. Logischerwijs hebben deze peildalingen het meest effect in ondiepe plassen, en neemt droogval af naarmate de diepte van de plassen toeneemt.

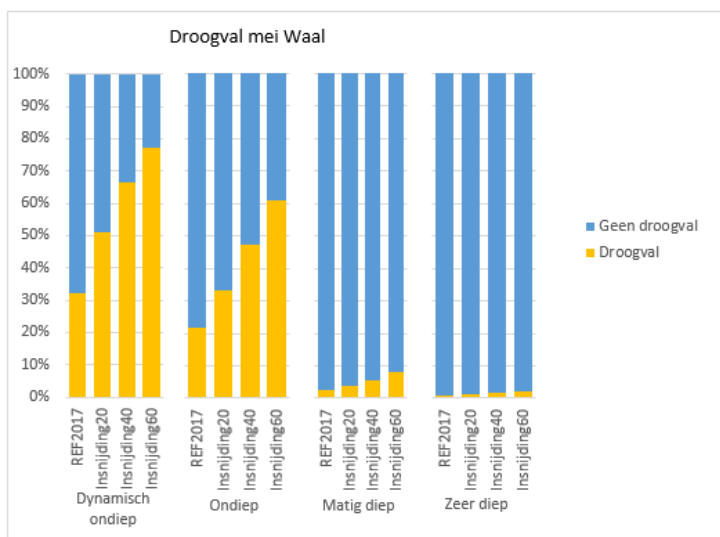


Figuur 3.10. Oppervlak van aquatische ecotopen langs de Waal. Let op de logaritmische schaal op de x-as.



Figuur 3.11. Verdeling van droogval van aquatische ecotopen langs de Waal voor de huidige situatie (Referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in oktober rond 2050

Rivierinsnijding heeft een veel grotere invloed op droogval van uiterwaardplassen (Figuur 3.12) dan veranderingen in rivierafvoer ten gevolge van klimaatverandering. Bij voortschrijdende rivierinsnijding kan een aanzienlijk deel van de plassen langs de Waal verdrogen. Een deel van deze plassen zal waarschijnlijk in terrestrische habitats veranderen.

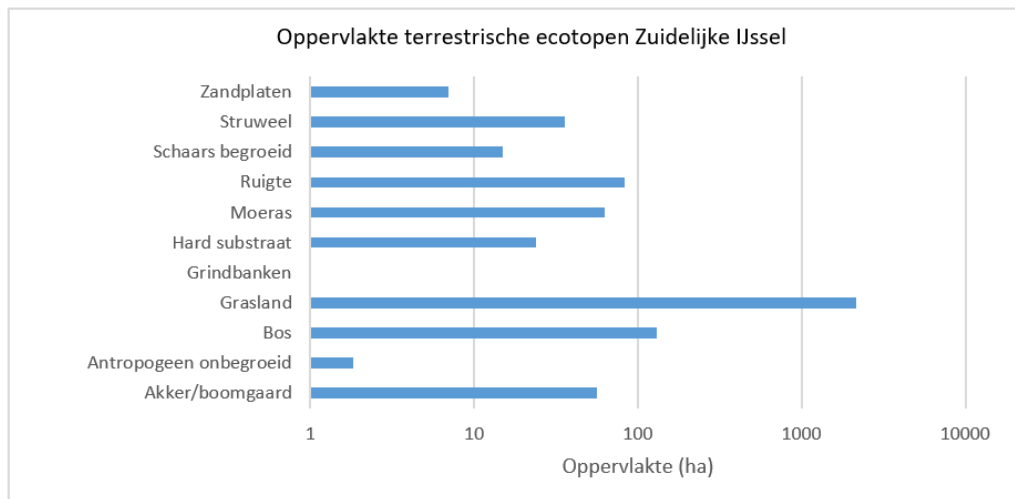


Figuur 3.12. Verdeling van droogval van aquatische ecotopen langs de Waal in de maand mei voor verschillende gradaties van rivierinsnijding (20, 40 of 60 cm) en de huidige situatie (Referentiescenario)

3.1.3 Zuidelijke IJssel

Terrestrische ecotopen

De uiterwaarden van de Zuidelijke IJssel worden overheerst door grasland; verder komen ruigtes, moeras en bos over een aanzienlijk oppervlak voor (Figuur 3.13). Het areaal aan zandplaten is hier veel kleiner dan in de Gelderse Poort en langs de Waal, omdat de oevers van de IJssel grotendeels zijn vastgelegd met stortstenen en de rivier veel minder dynamisch is.

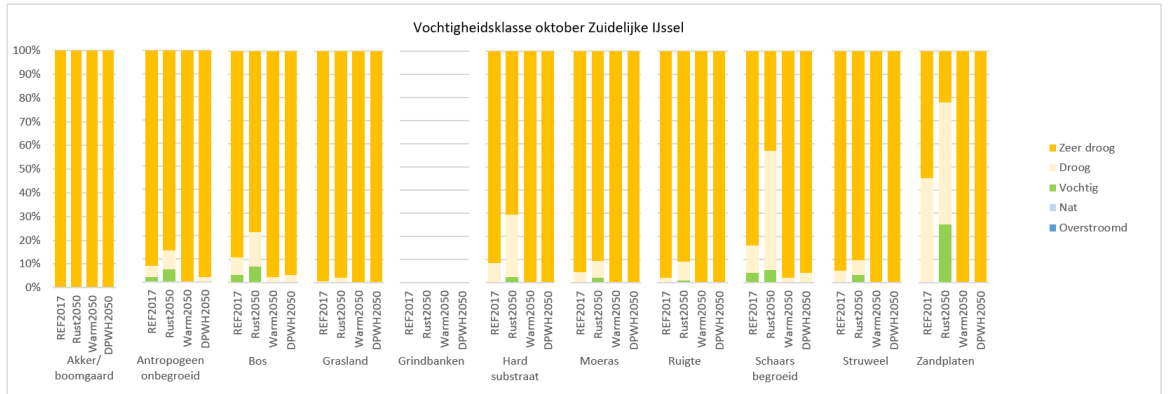
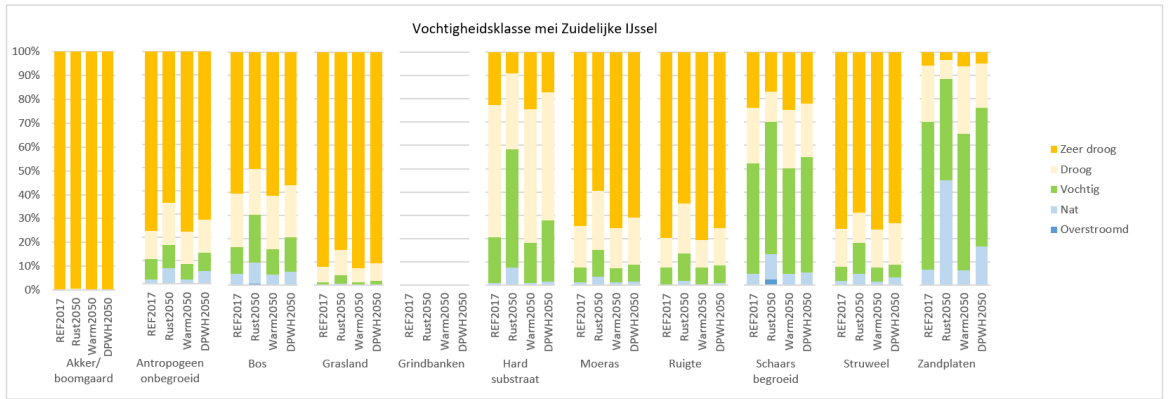


Figuur 3.13. Oppervlak van terrestrische ecotoopclusters langs de Zuidelijke IJssel. Let op de logaritmische schaal op de x-as.

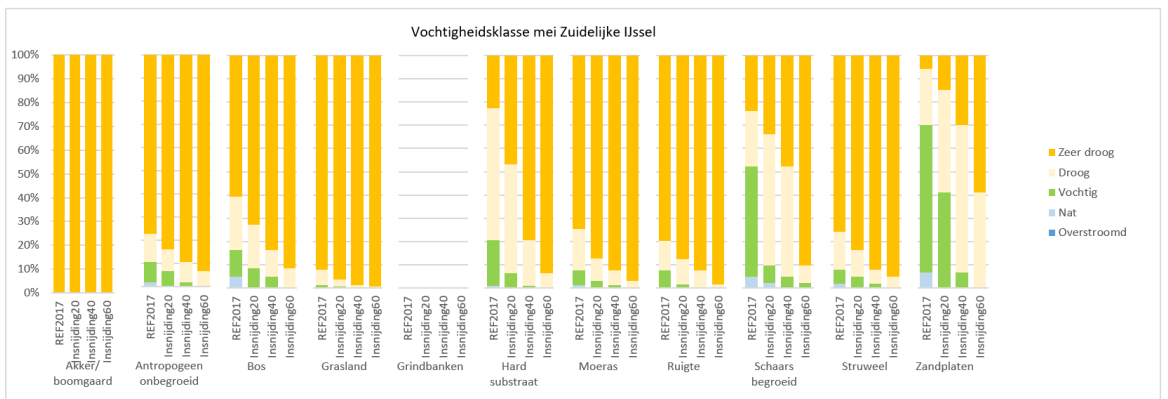
Uit Figuur 3.14 blijkt dat vooral zandplaten (rivieroeveren) en hard substraat (oeverbeschoeiing) langs de Zuidelijke IJssel een hoge grondwaterstand hebben. Daarentegen hebben terreindelen die als bossen, moerassen, ruigtes en graslanden zijn gekarteerd juist een lage grondwaterstand in mei. Net als in de Gelderse Poort en langs de Waal zijn in oktober vrijwel alle ecotoopclusters 'droog' tot 'zeer droog', ook in de huidige situatie (Figuur 3.14).

De verschillende scenario's voor rivierafvoer hebben niet veel invloed op bovenstaand beeld. Alleen in het scenario 'Rust' leidt het hogere gemiddelde rivierpeil in mei tot een toename van de grondwaterstand in ecotopen, met name van oeverbeschoeiing (hard substraat, ca. 40% toename), maar ook van schaars begroeide terreindelen (ca. 20%, zie Figuur 3.14). Het (beperkte) areaal aan natte en vochtige ecotopen neemt in oktober duidelijk af bij de scenario's Warm en Wh_{Dry}.

Zoals verwacht heeft rivierinsnijding wel een grote invloed op de grondwaterstand. Voor veel ecotoopclusters langs de Zuidelijke IJssel geldt dat een rivierinsnijding van 20 cm reeds tot een sterke afname van natte en vochtige ecotopen leidt, en bij 60 cm rivierinsnijding is vrijwel het gehele areaal droog, ook de zandplaten langs de rivieroeveren (Figuur 3.15).



Figuur 3.14. Verdeling van de drooglegging van terrestrische ecotoopclusters langs de Zuidelijke IJssel voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in mei en oktober rond 2050. Zie tabel 2.1 voor indeling van vochtigheidsklassen.



Figuur 3.15. Drooglegging van terrestrische ecotoopclusters langs de Zuidelijke IJssel in de maand mei voor verschillende gradaties van rivierinsnijding (20, 40 of 60 cm) en de huidige situatie (referentiescenario). Zie tabel 2.1 voor indeling van vochtigheidsklassen.

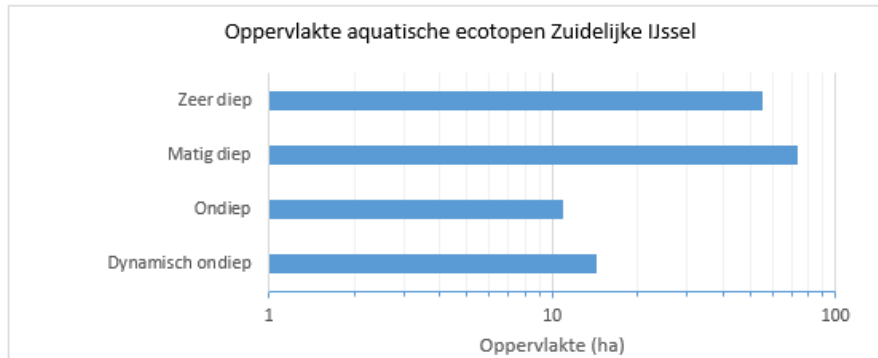
Aquatische ecotopen

Langs de Zuidelijke IJssel overheersen zeer diepe en matig diepe plassen. Aanvullend is er een kleiner areaal aan ondiepe plassen (Figuur 3.16).

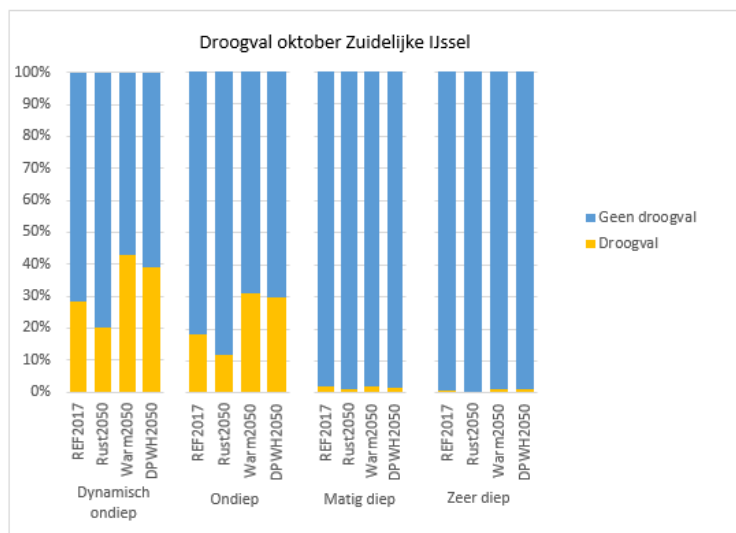
In figuur 3.17 zijn de verschillen in (gemiddelde) droogval weergegeven voor de scenario's en de referentie. Als eerste valt op dat ook voor de referentie een aanzienlijk droogvalpercentage wordt berekend. Dit is conform de huidige situatie in het veld.

Het rivierpeil varieert in dit traject namelijk van jaar tot jaar, waardoor een bepaalde plas in het ene jaar wel kan droogvallen, en in het andere jaar niet. Aangezien deze droogvalpercentages worden uitgemiddeld over de jaren, wordt ook voor de huidige situatie een aanzienlijk droogvalpercentage berekend.

Voorts komt naar voren dat droogval toeneemt bij de scenario's Warm en WH_{Dry}, wat het gevolg is van de aanzienlijke peildaling in de nazomer van deze scenario's. Logischerwijs hebben deze peildalingen het meest effect in ondiepe plassen, en neemt droogval af naarmate de diepte van de plassen toeneemt.

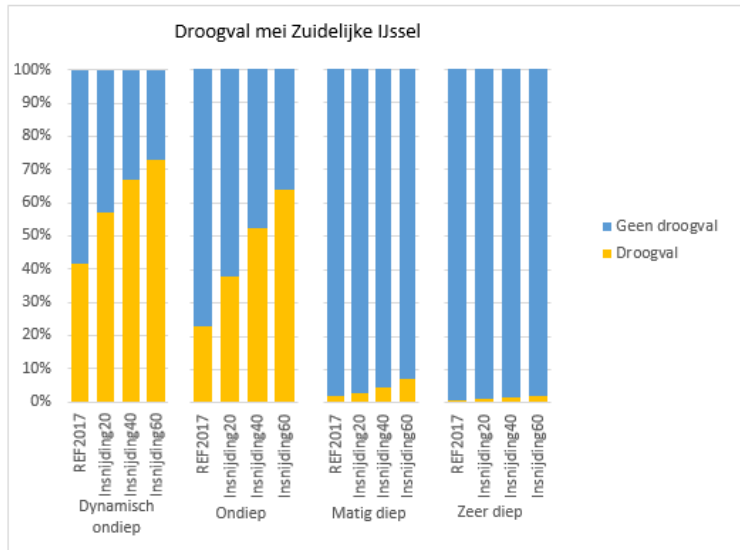


Figuur 3.16. Oppervlak van aquatische ecotopen langs de Zuidelijke IJssel. Let op de logaritmische schaal op de x-as.



Figuur 3.17. Verdeling van droogval van aquatische ecotopen langs de Zuidelijke IJssel voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in oktober rond 2050

Rivierinsnijding heeft een veel grotere invloed op droogval van uiterwaardplassen (Figuur 3.18) dan veranderingen in rivierafvoer ten gevolge van klimaatverandering. Bij voortschrijdende rivierinsnijding kan circa 30% van ondiepe plassen langs de Zuidelijke IJssel verdrogen. Deze plassen zullen waarschijnlijk veranderen in (semi-)terrestrische habitats, zoals moeras en schaars begroeide terreindelen.

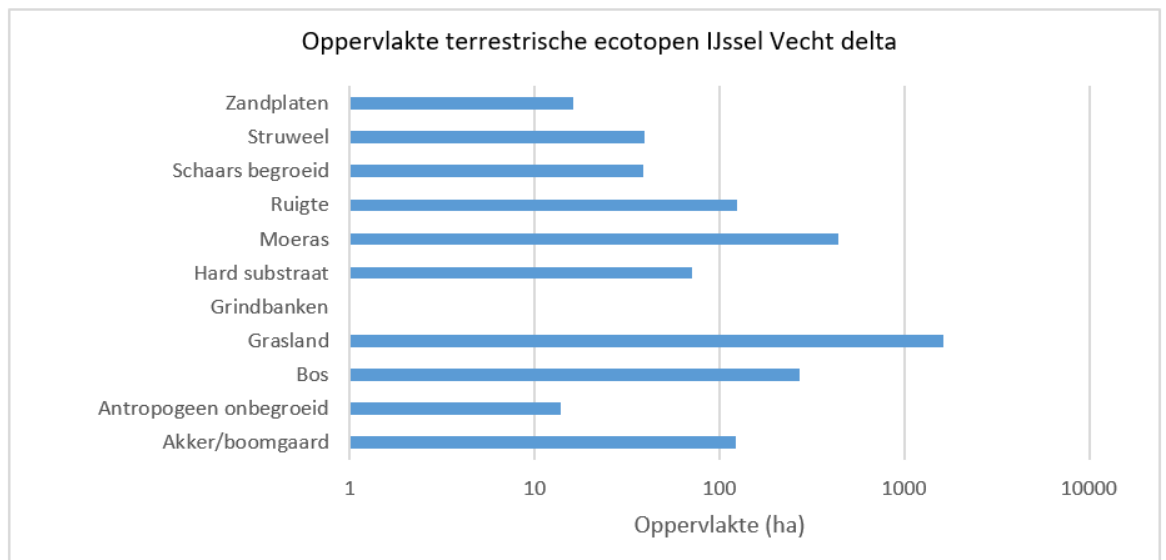


Figuur 3.18. Verdeling van droogval van aquatische ecotopen in mei langs de Zuidelijke IJssel voor verschillende gradaties van rivierinsnijding (20, 40 of 60 cm) en de huidige situatie (referentiescenario)

3.1.4 IJssel-Vechtdelta

Terrestrische ecotopen

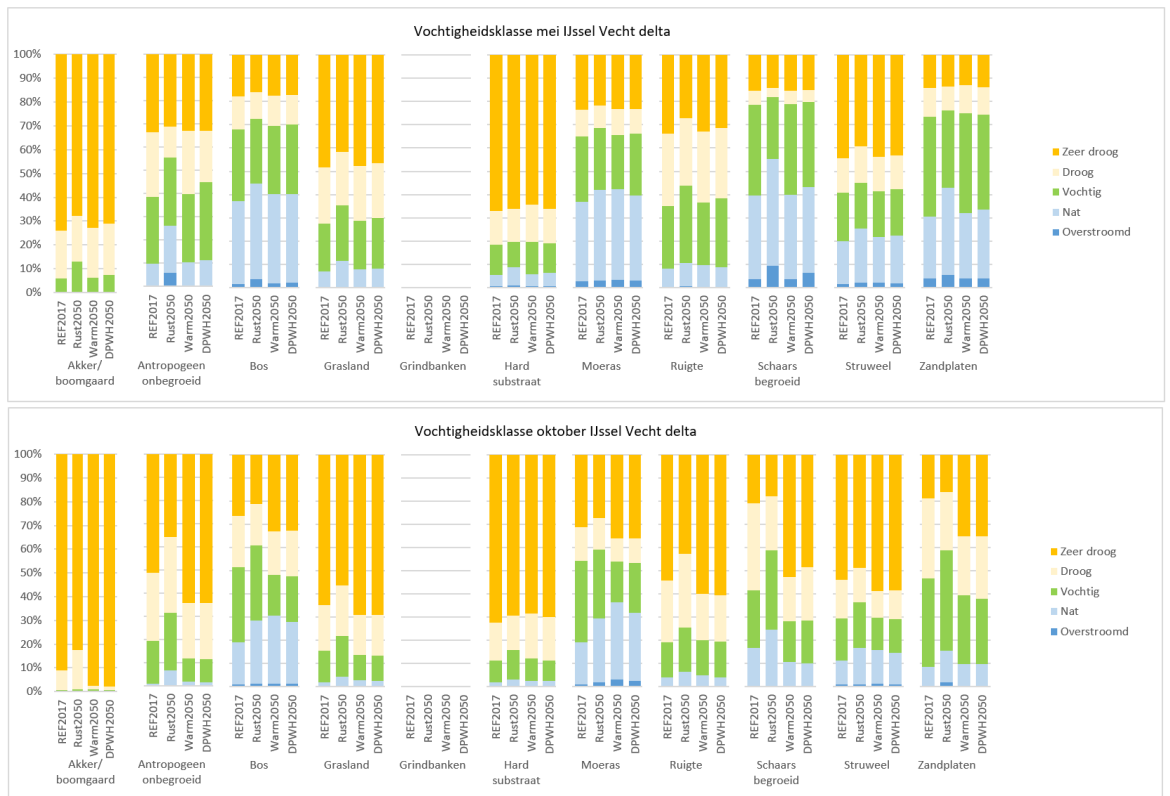
De uiterwaarden van de IJssel-Vechtdelta worden ook overheerst door graslanden, maar hier komen ook moerassen en ruigtes over een aanzienlijk oppervlak voor (Figuur 3.19). Het areaal aan zandplaten is hier aanzienlijk kleiner dan in de Gelderse Poort en langs de Waal, omdat de oevers van de IJssel grotendeels zijn vastgelegd met stortstenen.



Figuur 3.19. Oppervlak van terrestrische ecotoopclusters langs de IJssel-Vechtdelta. Let op de logaritmische schaal op de x-as.

In de IJssel-Vechtdelta hebben vooral moerassen, bossen en schaars begroeide terreindelen een hoge grondwaterstand (60-80% van het totale oppervlak van deze ecotoopclusters, zie figuur 3.20). Ook in oktober is een aanzienlijk deel van dit areaal nog steeds nat tot vochtig. Dit zijn duidelijke verschillen met stroomopwaarts gelegen riviertrajecten, waar de uiterwaarden beduidend droger zijn.

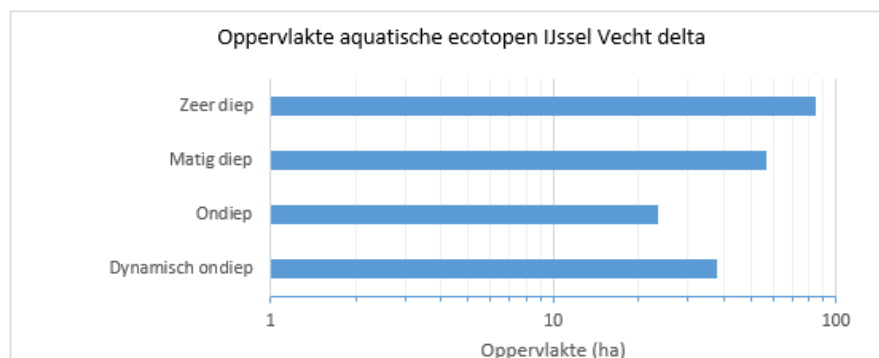
De verschillende scenario's voor rivierafvoer hebben niet veel invloed op bovenstaand beeld. Alleen in het scenario 'Rust' leidt het hogere gemiddelde rivierpeil in mei tot een zeer lichte toename van de grondwaterstand in sommige ecotopen (Figuur 3.20).



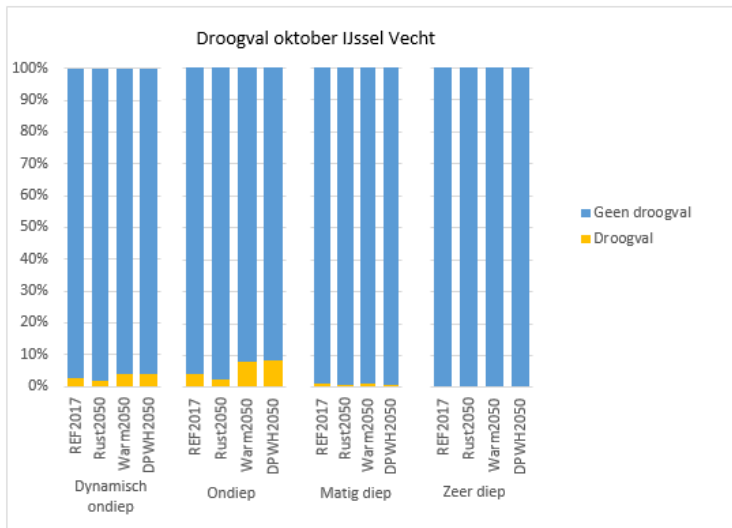
Figuur 3.20. Verdeling van de drooglegging van terrestrische ecotoopclusters in de IJssel-Vechtdelta voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in mei en oktober rond 2050. Zie tabel 2.1 voor indeling van vochtigheidsklassen.

Aquatische ecotopen

In de IJssel-Vechtdelta overheersen zeer diepe en matig diepe plassen; daarnaast is er een kleiner areaal van ondiepe plastypen (Figuur 3.21). Droogval in oktober komt hier nauwelijks voor, omdat de amplitude van peilfluctuaties in dit stroomafwaarts gelegen riviertraject gering is. Dit is een duidelijk verschil met stroomopwaarts gelegen riviertrajecten, waar de kans op droogval duidelijk groter is. De verschillende scenario's voor rivierafvoer hebben niet veel invloed op bovenstaand beeld (Figuur 3.22).



Figuur 3.21. Oppervlak van aquatische ecotopen in de IJssel-Vechtdelta. Let op de logaritmische schaal op de x-as.

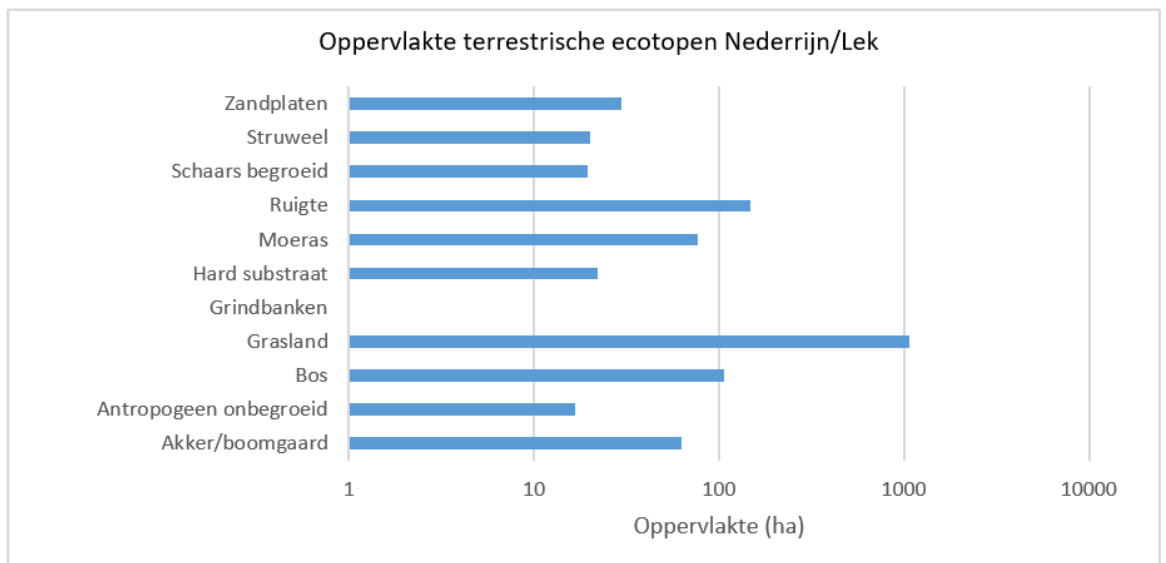


Figuur 3.22. Verdeling van droogval van aquatische ecotopen in de IJssel-Vechtdelta voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in oktober rond 2050

3.1.5 Nederrijn en Lek (gestuwde panden)

Terrestrische ecotopen

De uiterwaarden van de gestuwde Neder-Rijn en Lek worden overheerst door graslanden; aanvullend hierop komen ruigtes, moerassen en bossen over een aanzienlijk oppervlak voor (Figuur 3.23). Het areaal aan zandplaten, schaars begroeide terreinen en struweel is hier aanzienlijk kleiner dan langs de vrij afstromende rivieren in de Gelderse Poort en langs de Waal.

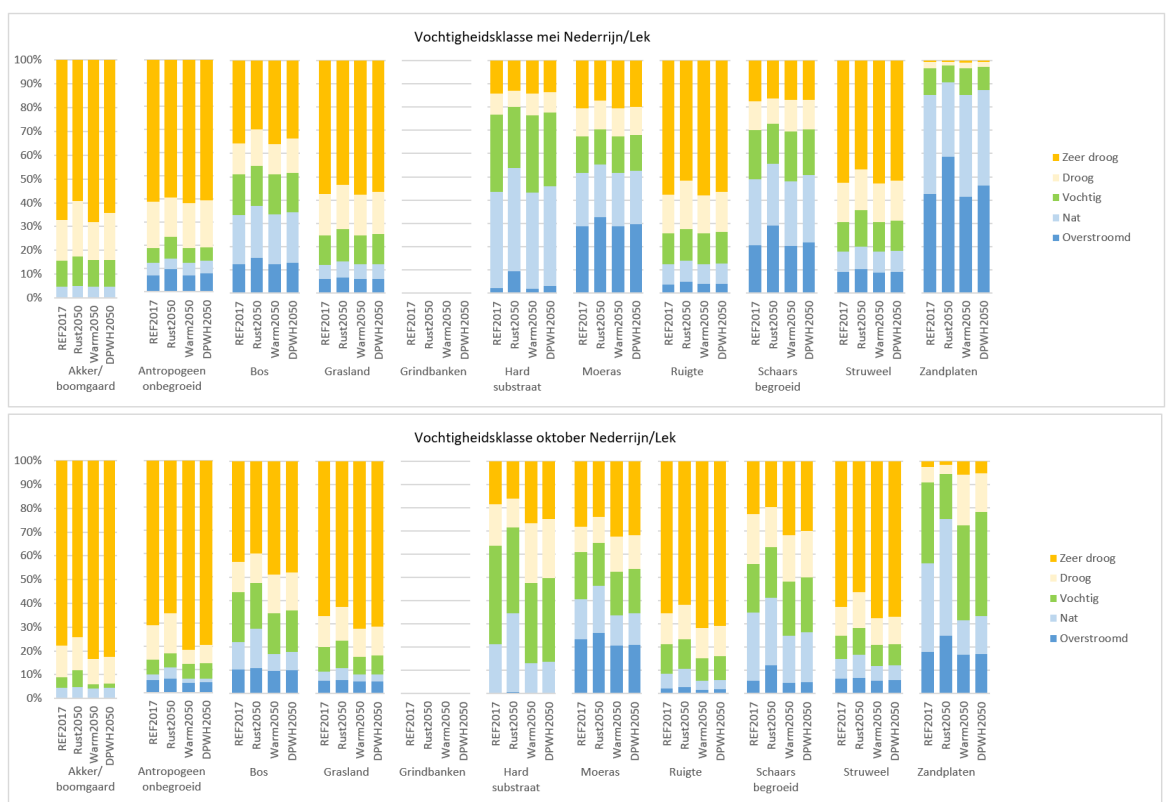


Figuur 3.23. Oppervlak van terrestrische ecotoopclusters langs de gestuwde panden van Neder-Rijn en Lek. Let op de logaritmische schaal op de x-as.

In de gestuwde panden van de Neder-Rijn en Lek hebben vooral moerassen, bossen en schaars begroeide terreindelen een hoge grondwaterstand (60-80% van het totale oppervlak van deze ecotoopclusters, zie Figuur 3.24) als gevolg van de gestuwde rivierpeilen. Daardoor is ook in oktober een aanzienlijk deel van dit areaal nog steeds nat tot vochtig. Hiermee verschilt de Neder-Rijn en Lek duidelijk van de Gelderse Poort, Waal en Zuidelijke IJssel, waar dezelfde ecotoopclusters beduidend droger zijn.

Voorts valt op dat langs de Neder-Rijn en Lek in een aanzienlijk areaal van de ecotoopclusters 'moeras' en 'schaars begroeide terreinen' de grondwaterstand hoger is dan het maaiveld. Dit is het gevolg van het opstuwen van het waterpeil in deze rivier, waardoor de waterstand in de rivier hoger is dan in aangrenzende uiterwaarden, die hier vaak achter zomerkades zijn gelegen. Deze uiterwaarden kunnen in de praktijk alleen droog blijven door drainage naar lagere stuwpannen of onderbemaling.

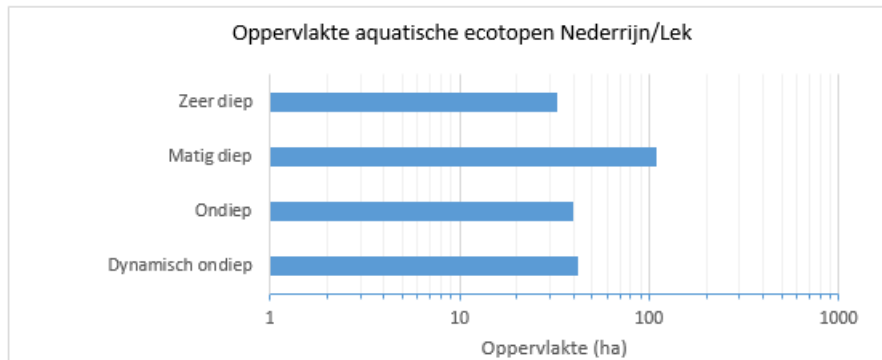
De verschillende scenario's voor rivierafvoer hebben in deze gestuwde rivier dan niet veel invloed op bovenstaand beeld. Alleen in het 'Rust' scenario leidt een hoger gemiddeld rivierpeil in mei tot een lichte toename van de grondwaterstand in sommige ecotopen (Figuur 3.24).



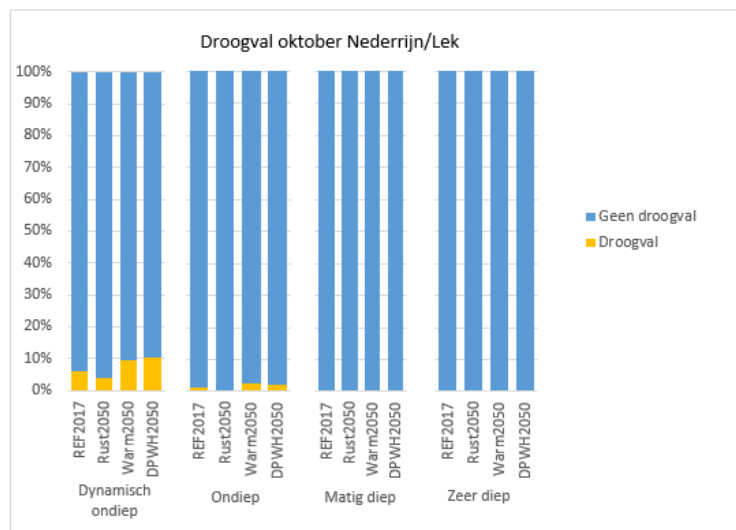
Figuur 3.24. Verdeling van de drooglegging van terrestrische ecotoopclusters langs de gestuwde Neder-Rijn en Lek voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in mei en oktober rond 2050. Zie tabel 2.1 voor indeling van vochtigheidsklassen.

Aquatische ecotopen

Langs de gestuwde delen van Neder-Rijn en Lek overheersen matig diepe plassen; daarnaast is er een kleiner areaal van ondiepe en zeer diepe plassen (Figuur 3.25). Droogval komt hier nauwelijks voor, omdat de Neder-Rijn en Lek gestuwd zijn. Ook de verschillende scenario's voor rivierafvoer hebben daardoor nauwelijks invloed op bovenstaand beeld (Figuur 3.26).



Figuur 3.25. Oppervlak van aquatische ecotopen langs de gestuwde delen van de Neder-Rijn en Lek. Let op de logaritmische schaal op de x-as



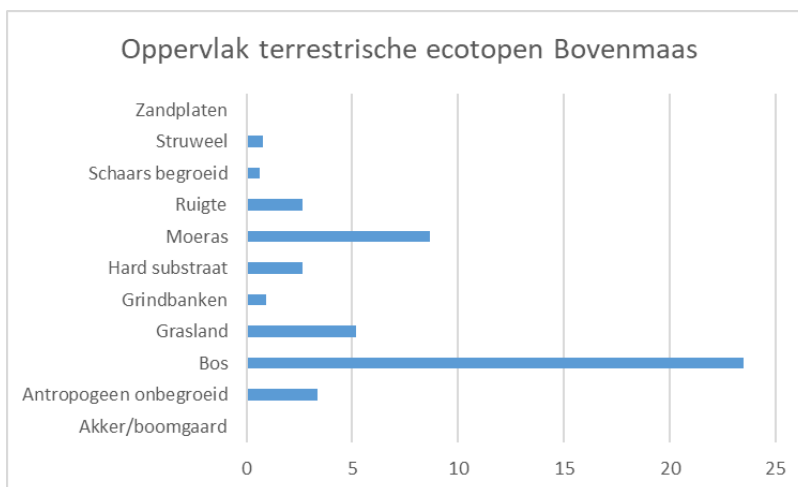
Figuur 3.26. Verdeling van droogval van aquatische ecotopen in de gestuwde trajecten van de Neder-Rijn en Lek voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in oktober rond 2050

3.2 Maastrajecten

De ligging van de Maastrajecten is aangegeven in Figuur 2.1.

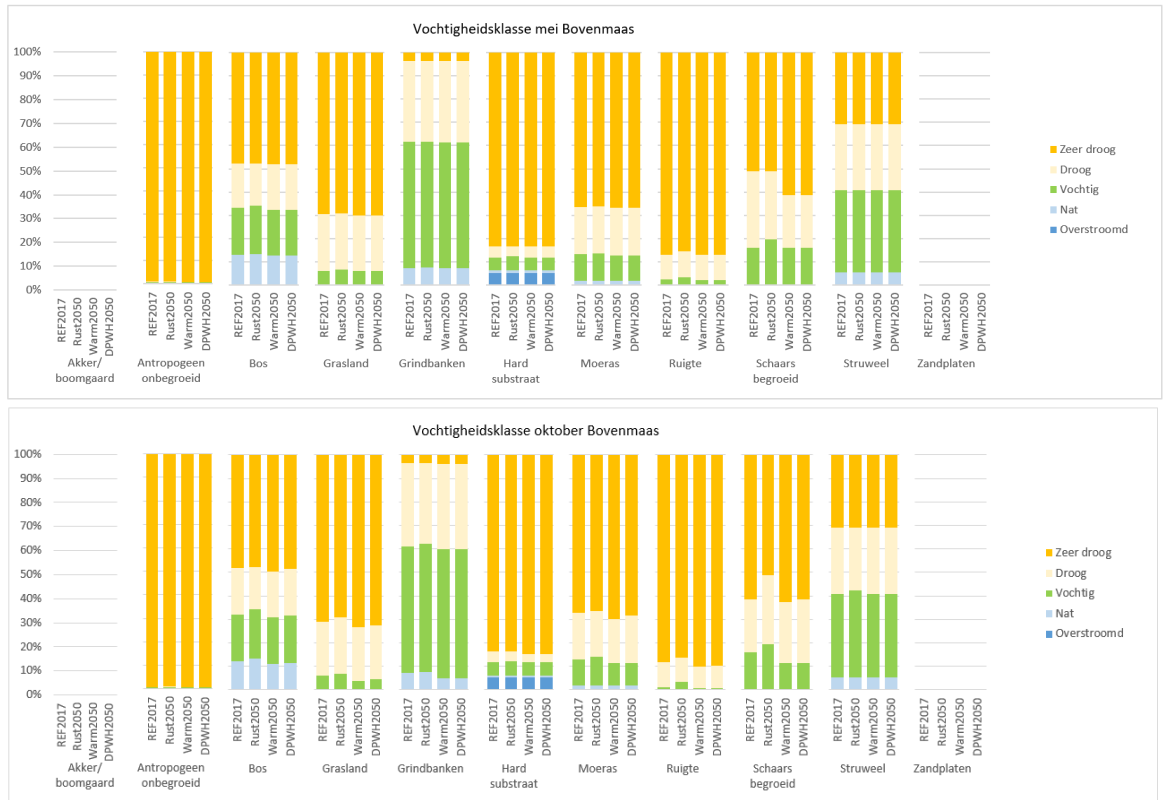
Terrestrische ecotopen

3.2.1 Bovenmaas



Figuur 3.27. Oppervlak van terrestrische ecotoopclusters (hectare) in het rivierdal van de Bovenmaas.

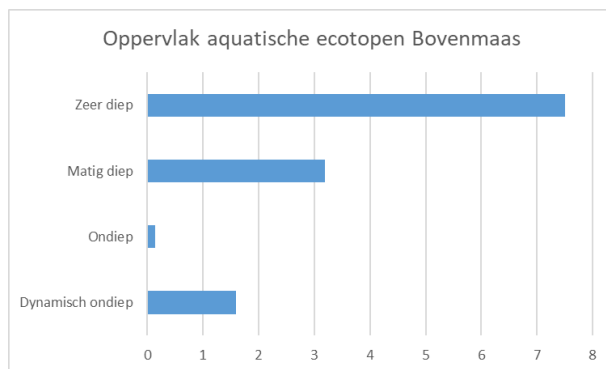
Het rivierdal van de Bovenmaas worden overheerst door bos en in mindere mate door moeras, grasland en ruigtes (Figuur 3.27). De uiterwaarden zijn overwegend droog, alleen de ecotoopclusters bos, grindbanken en struweel bestaan voor tot 30 – 60% uit natte tot vochtige ecotopen. Er zijn nauwelijks verschillen in grondwaterstanden tussen mei en oktober, omdat de Maas grotendeels gestuwd is. Ook de verschillende scenario's voor rivierafvoer hebben nauwelijks invloed op bovenstaand beeld (Figuur 3.28).



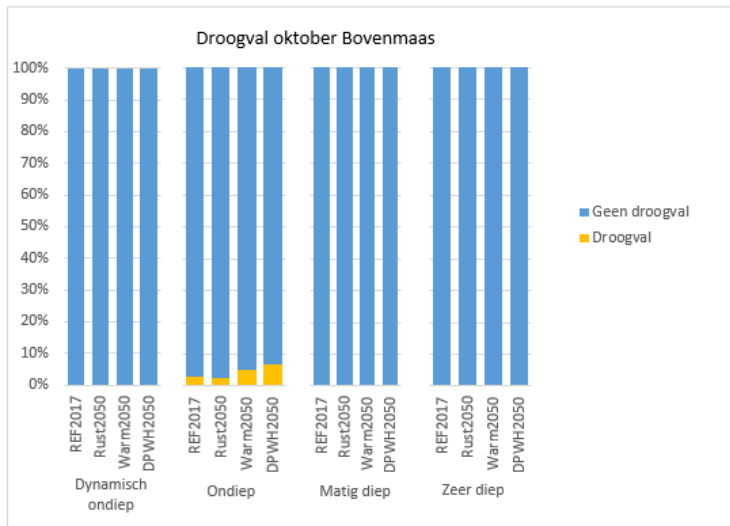
Figuur 3.28. Verdeling van de drooglegging van terrestrische ecotoopclusters langs de Bovenmaas voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in mei en oktober rond 2050. Zie tabel 2.1 voor indeling van vochtigheidsklassen.

Aquatische ecotopen

Langs de BovenMaas overheersen zeer diepe plassen en in mindere mate matig diepe plassen; aanvullend is er een zeer klein areaal van ondiepe plassen (Figuur 3.29). Droogval komt langs dit riviertraject niet of nauwelijks, omdat de Maas gestuwd is. Ook de verschillende scenario's voor rivierafvoer hebben daardoor nauwelijks invloed op bovenstaand beeld (Figuur 3.30).



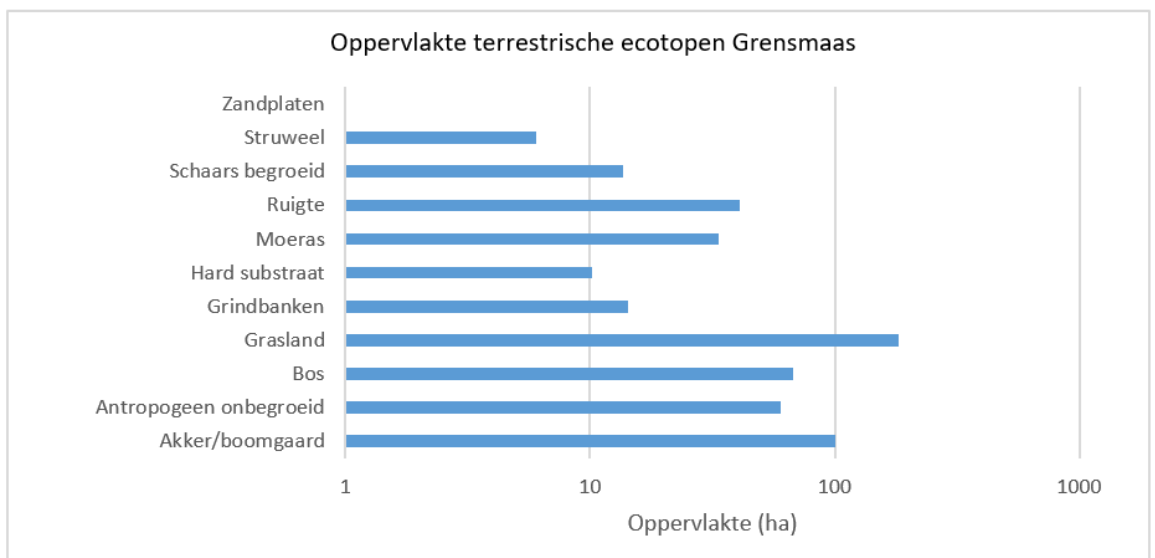
Figuur 3.29. Oppervlak van aquatische ecotopen in het rivierdal van de Bovenmaas (hectare)



Figuur 3.30. Verdeling van droogval van aquatische ecotopen in het rivierdal van de Bovenmaas voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in oktober rond 2050

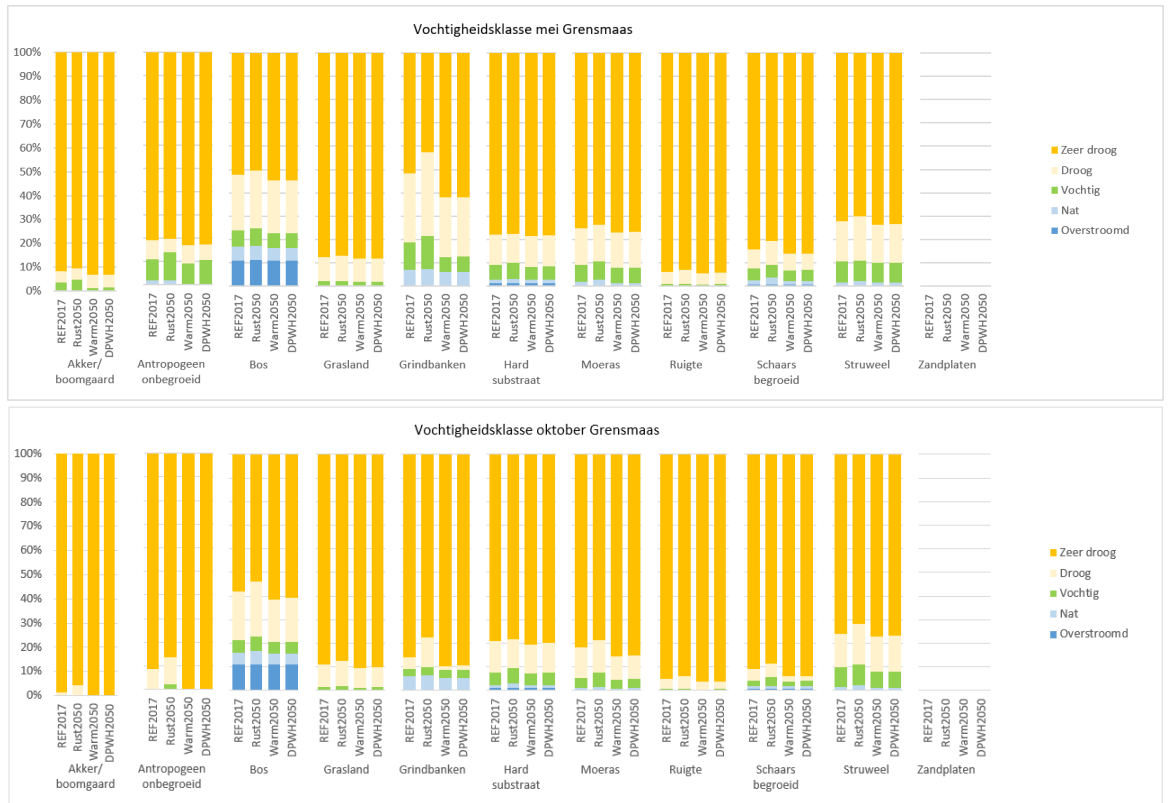
3.2.2 Grensmaas

Terrestrische ecotopen



Figuur 3.31. Oppervlak van terrestrische ecotoopclusters in het rivierdal van de Grensmaas. Let op de logaritmische schaal op de x-as

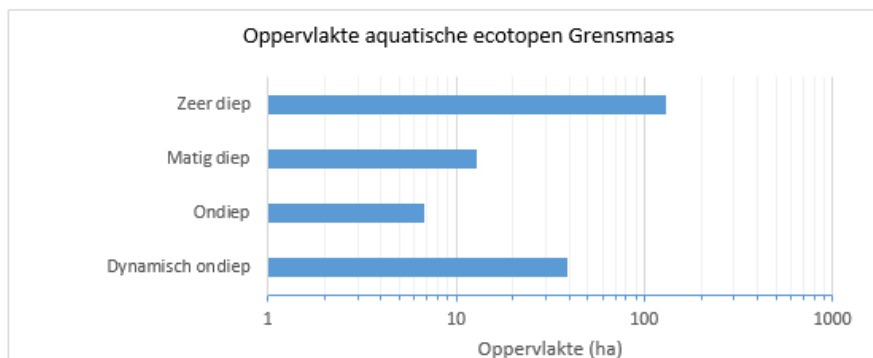
Het rivierdal van de Grensmaas worden overheerst door grasland, bos, ruigte en moeras (Figuur 3.31). De Grensmaas is ongestuurd er zijn bodemdrempels aangelegd ter voorkoming van verdroging van Vlaamse N2000 gebieden in het Maasdal. De uiterwaarden zijn overwegend droog tot zeer droog, alleen 20% van het areaal van bossen bestaat uit overstroomde tot vochtige terreindelen; voor de andere ecotopen is dit percentage maximaal 10%. Er zijn voor de ecotoopclusters nauwelijks verschillen in grondwaterstanden tussen mei en oktober. Ook de verschillende scenario's voor rivierafvoer hebben nauwelijks invloed op bovenstaand beeld (Figuur 3.32).



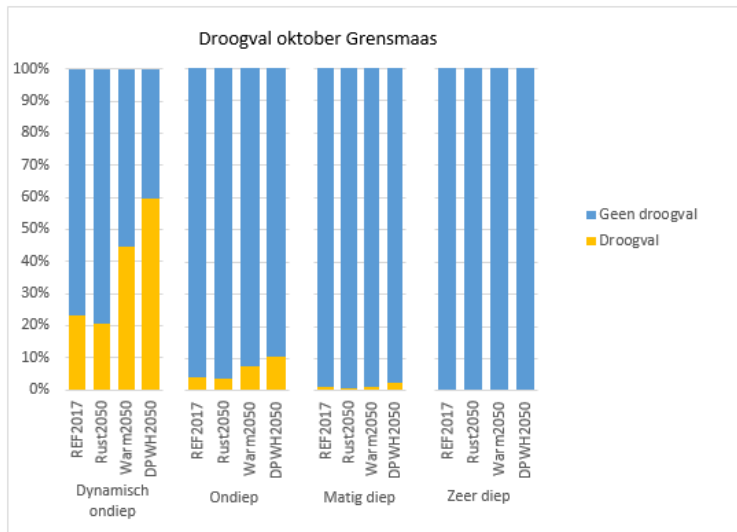
Figuur 3.32. Verdeling van de drooglegging van terrestrische ecotoopclusters langs de Grensmaas voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in mei en oktober rond 2050. Zie tabel 2.1 voor indeling van vochtigheidsklassen.

Aquatische ecotopen

Langs de Grensmaas overheersen zeer diepe plassen. Aanvullend is er een redelijk areaal aan ondiepe plassen (Figuur 3.33). Droogval in oktober komt in dit riviertraject in de huidige situatie beperkt voor, maar neemt toe bij de verschillende scenario's, vooral voor Warm en WH_{Dry} (Figuur 3.34). Dit geldt alleen voor de zeer ondiepe plassen.



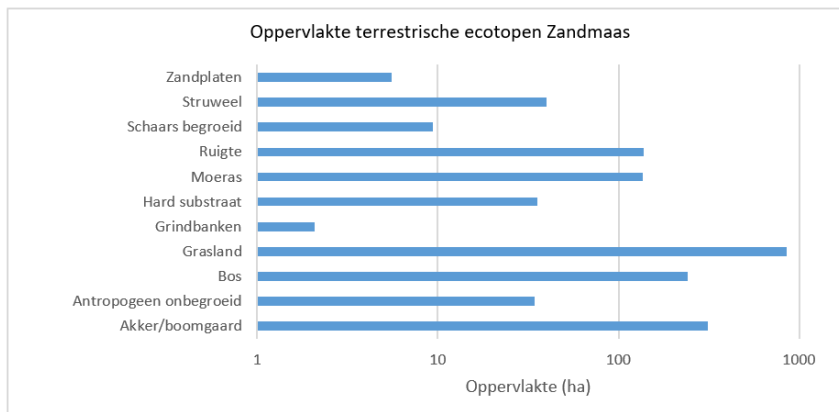
Figuur 3.33. Oppervlak van aquatische ecotopen in het rivierdal van de Grensmaas. Let op de logaritmische schaal op de x-as



Figuur 3.34. Verdeling van droogval van aquatische ecotopen in het rivierdal van de Grensmaas voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in oktober rond 2050

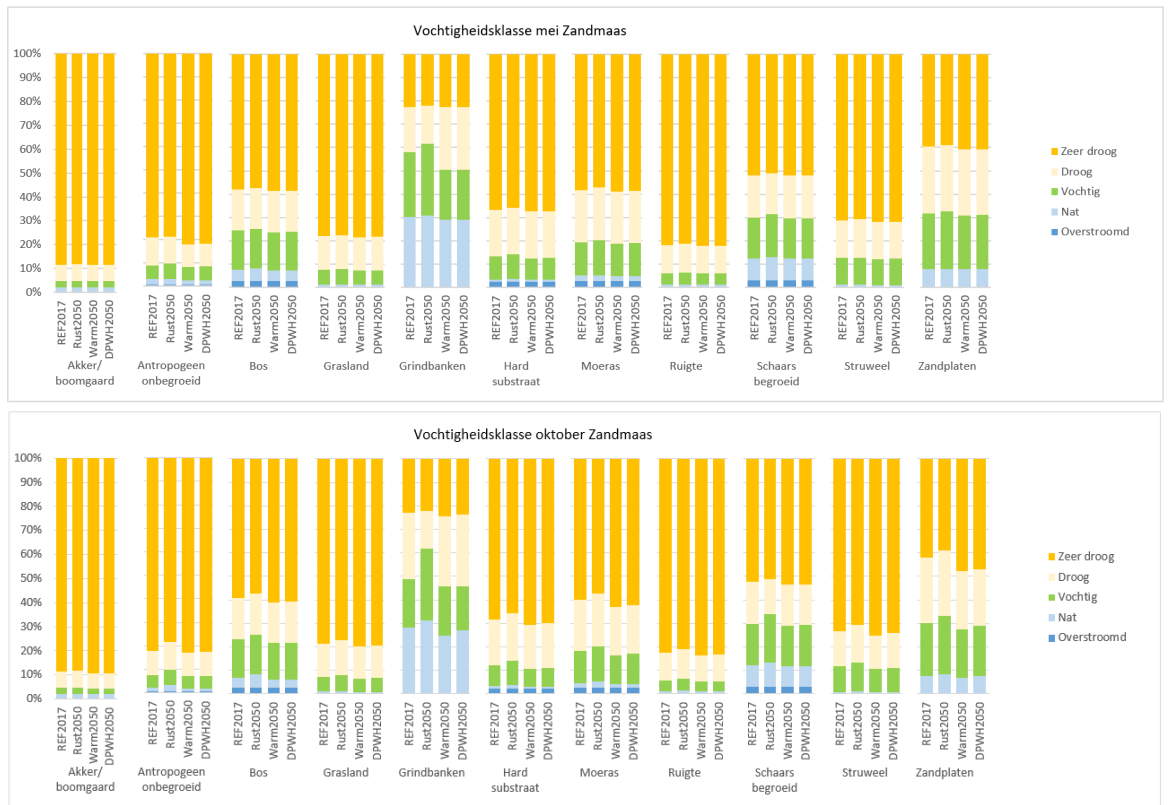
3.2.3 Zandmaas

Terrestrische ecotopen



Figuur 3.35. Oppervlak van terrestrische ecotoopclusters in het rivierdal van de Zandmaas. Let op de logaritmische schaal op de x-as

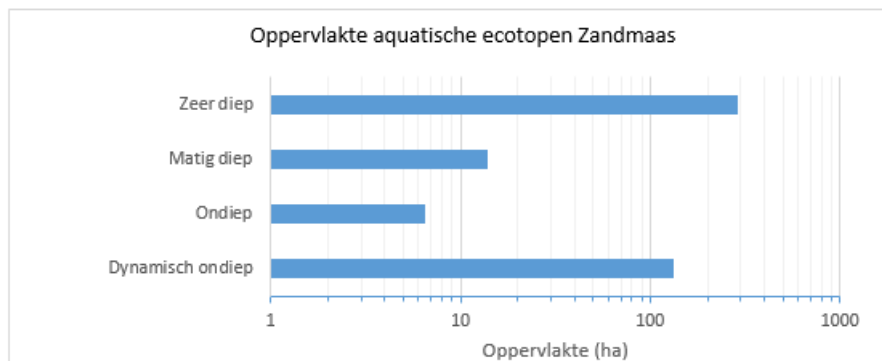
Het rivierdal van de Zandmaas worden overheerst door grasland, bos, ruigte, moeras en akkers (Figuur 3.35). Het rivierdal is overwegend droog, alhoewel veel ecotopen beduidend vochtiger zijn dan langs de Grensmaas, met name zandplaten, schaars begroeide terreinen en grindbanken. Er zijn voor de ecotoopclusters nauwelijks verschillen in grondwaterstanden tussen mei en oktober, omdat de Maas gestuwd is. Ook de verschillende scenario's voor rivierafvoer hebben daardoor nauwelijks invloed op bovenstaand beeld (Figuur 3.36).



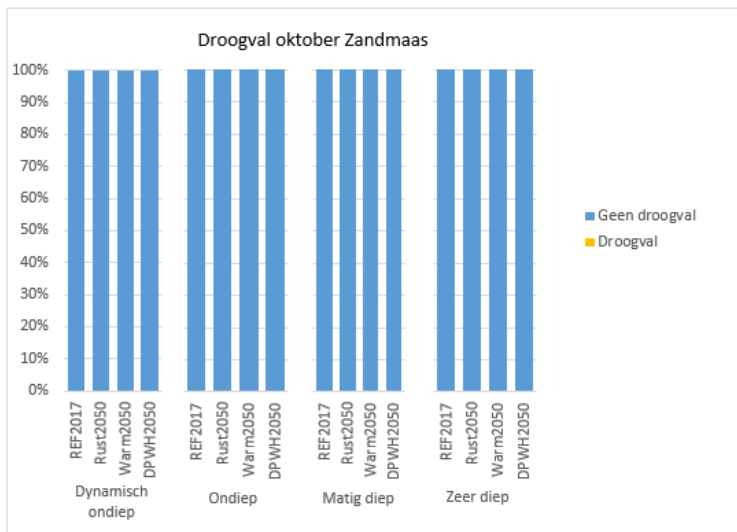
Figuur 3.36. Verdeling van de drooglegging van terrestrische ecotoopclusters langs de Zandmaas voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in mei en oktober rond 2050. Zie tabel 2.1 voor indeling van vochtigheidsklassen.

Aquatische ecotopen

Langs de Zandmaas overheersen zeer diepe en – in mindere mate – dynamisch ondiepe plassen (Figuur 3.37). Droogval komt langs dit riviertraject niet of nauwelijks, omdat de Maas gestuwd is en er voldoende toevoer uit het regionale watersysteem is, zoals door de zijrivier Roer. Ook de verschillende scenario's voor rivierafvoer hebben daardoor nauwelijks invloed op bovenstaand beeld (Figuur 3.38).



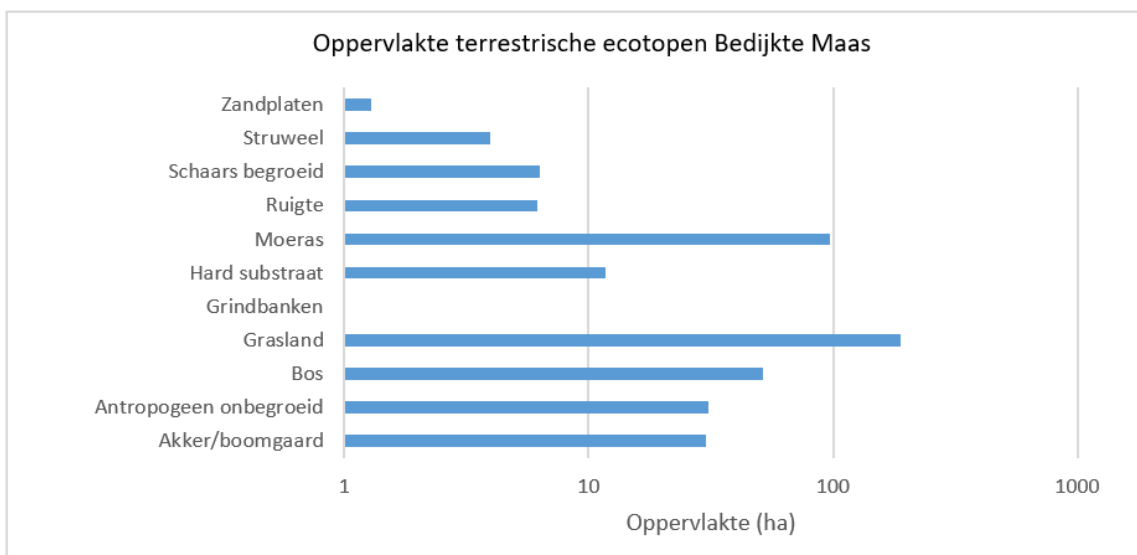
Figuur 3.37. Oppervlak van aquatische ecotopen in het rivierdal van de Zandmaas. Let op de logaritmische schaal op de x-as



Figuur 3.38. Verdeling van droogval van aquatische ecotopen in het rivierdal van de Zandmaas voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in oktober rond 2050

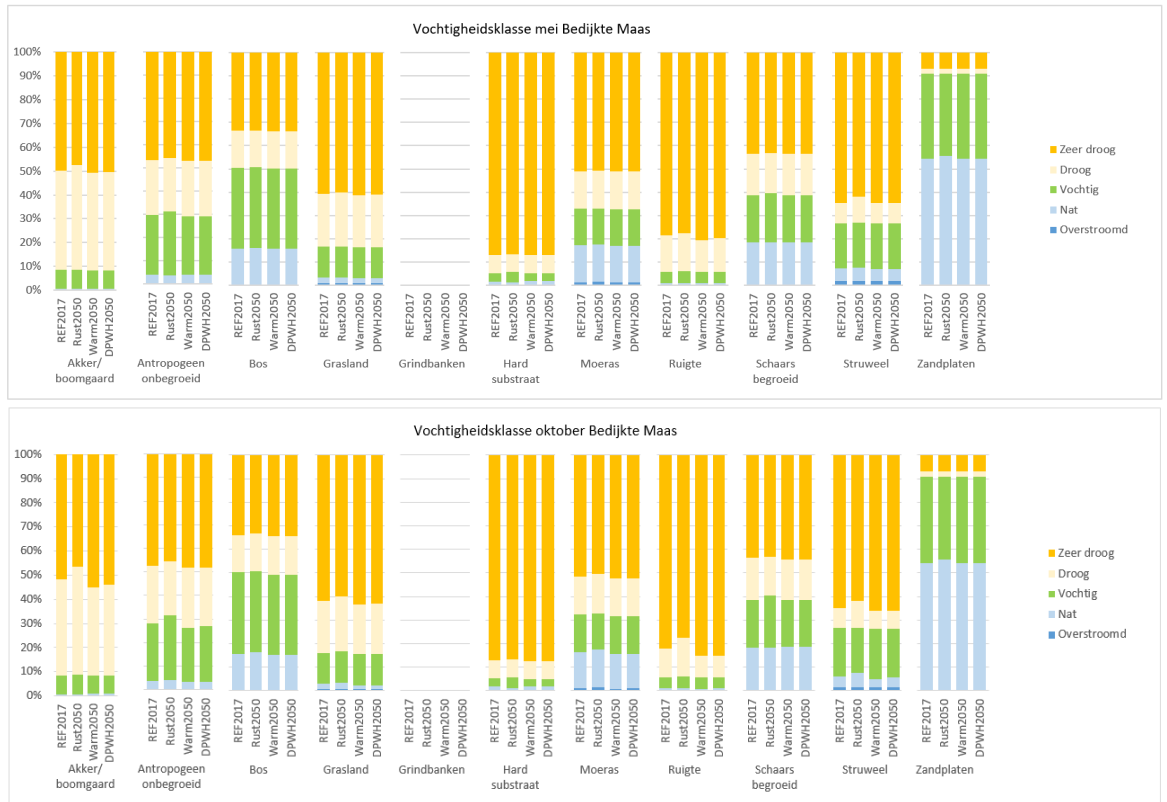
3.2.4 Bedijkte Maas

Terrestrische ecotopen



Figuur 3.39. Oppervlak van terrestrische ecotoopclusters langs de Bedijkte Maas. Let op de logaritmische schaal op de x-as

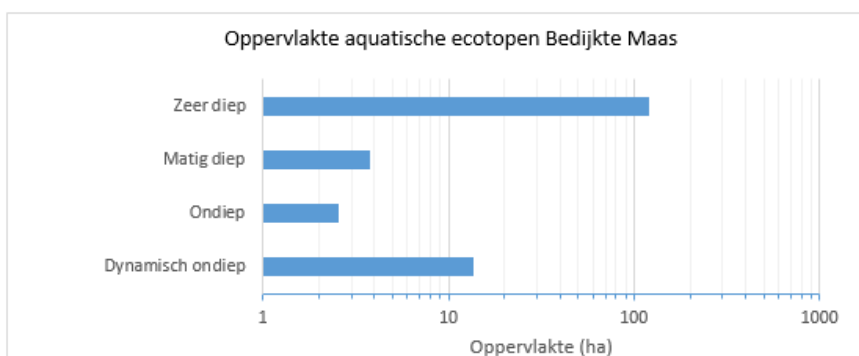
De uiterwaarden van de Bedijkte Maas bestaan voornamelijk uit grasland, moeras, en in mindere mate bos en akkers (Figuur 3.39). De uiterwaarden zijn duidelijk natter dan de weerden langs de Grensmaas en Zandmaas. Met name de ecotoopclusters zandplaten, bos, moeras en schaars begroeide terreinen hebben een hoge grondwaterstand (Figuur 3.40), doordat ook de Bedijkte Maas gestuwd is maar nu in een brede stroomdalvlakte. Er zijn voor de ecotoopclusters nauwelijks verschillen in grondwaterstanden tussen mei en oktober. Ook de verschillende scenario's voor rivierafvoer in 2050 hebben nauwelijks invloed op bovenstaand beeld (Figuur 3.40).



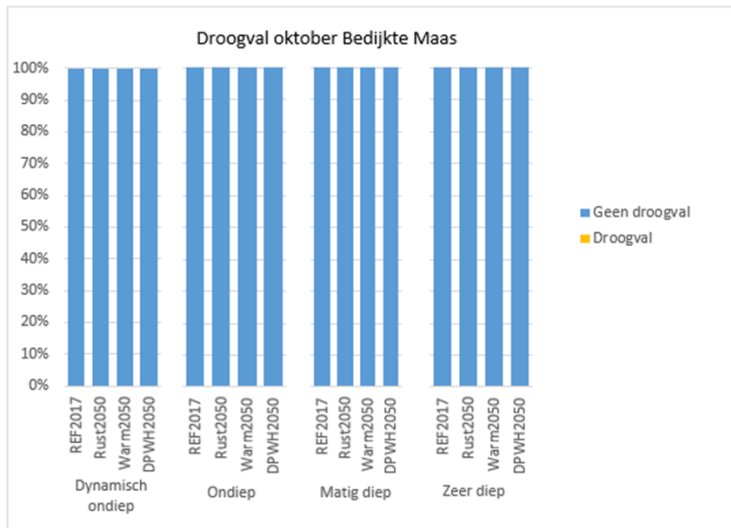
Figuur 3.40. Verdeling van de drooglegging van terrestrische ecotoopclusters langs de Bedijkte Maas voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in mei en oktober rond 2050. Zie tabel 2.1 voor indeling van vochtigheidsklassen.

Aquatische ecotopen

Langs de Bedijkte Maas overheersen zeer diepe plassen. Aanvullend is een klein areaal aan ondiepe plassen (Figuur 3.41). Droogval komt langs dit riviertraject niet of nauwelijks, omdat de Maas gestuwd is en door toevoer van water uit zijrivieren, zoals de Roer. Ook de verschillende scenario's voor rivierafvoer hebben daardoor nauwelijks invloed op bovenstaand beeld (Figuur 3.42).



Figuur 3.41. Oppervlak van aquatische ecotopen langs de Bedijkte Maas. Let op de logaritmische schaal op de x-as



Figuur 3.42. Verdeling van droogval van aquatische ecotopen langs de Bedijkte Maas voor de huidige situatie (referentiescenario) en prognose voor verschillende scenario's in mei rond 2050

4 Conclusies en aanbevelingen voor vervolg

In deze studie is voor de huidige situatie een eerste verkenning uitgevoerd naar de effecten van mogelijk veranderende rivierpeilen (ten gevolge van klimaatverandering en rivierinsnijding) op de grondwaterstanden in uiterwaarden en rivierdalen (van de Maas en Rijn) en daarmee op de vochttoestand van ecotopen in deze milieus. Deze analyses zijn uitgevoerd voor drie van de vier hotspot gebieden (Gelderse Poort, IJssel-Vechtdelta, Grensmaas), als ook voor de andere riviertrajecten in het bovenrivierengebied van Rijn en Maas.

Aanvullend hierop zijn de effecten van veranderende rivierpeilen (door klimaatverandering en rivierinsnijding) bepaald op het wensbeeld voor de ecotoopverdeling in 2050 (Van der Sluis et al., 2020). De resultaten hiervan zijn weergegeven in bijgevoegde Excel-file (getiteld: PAGW 2050 scenario's) en worden niet bediscussieerd in dit rapport. Deze resultaten zijn door Van der Sluis et al. (2020) gebruikt voor optimalisatie van het wensbeeld van de ecotopenverdeling in 2050.

De scenario's voor effecten van klimaatverandering op veranderingen in waterstanden van Rijn en Maas zijn ontleend aan Wolters et al. (2019, 2020). Hierbij zijn de scenario's Rust, Warm en $W_{H, dry}$ (een extra droog scenario, zie paragraaf 2.4) gebruikt. Ieder scenario geeft voor elk riviertraject een gedetailleerd beeld van de verwachte veranderingen in waterstand van de hoofdstroom. Aanvullend zijn ook de effecten van rivierinsnijding bepaald. De resultaten van deze scenario's zijn vergeleken met een referentiescenario. Deze analyses zijn uitgevoerd voor zowel de huidige situatie, als voor het wensbeeld in 2050.

Bij de analyses is aangenomen dat het rivierpeil in mei en oktober gelijk staat aan de grondwaterstand in aangrenzende uiterwaarden. Deze aanname is met de nodige onzekerheden omgeven. Weliswaar reageert het grondwaterpeil in uiterwaarden proportioneel op de rivierwaterstand, maar de snelheid van deze veranderingen hangt sterk af van de bodemtextuur (zand *versus* klei), afstand tot de rivier, recente overstromingen en kwel vanuit pleistocene zandgronden.

Met in achtneming van bovengenoemde onzekerheden kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

4.1 Effecten van lage rivierpeilen

- Er zijn grote verschillen tussen riviertrajecten, afhankelijk van de gevoeligheid van de rivierpeilen voor een veranderend afvoerregime. In sommige trajecten kan een aanzienlijk areaal van de natte tot vochtige ecotopen (sterk) verdrogen (Boven-Rijn/Waal, Zuidelijke IJssel), terwijl in ver stroomafwaarts gelegen (IJssel-Vecht delta) of gestuwde trajecten (Neder-Rijn/Lek, Gestuwde Maas, Zandmaas, Bovenmaas) er nauwelijks effecten worden vastgesteld. Eenzelfde trend is vastgesteld voor ondiepe plassen;
- In vrij afstromende rivieren (Boven-Rijn/Waal, Zuidelijke IJssel) zijn de effecten van rivierinsnijding veel sterker dan de effecten van verandering van rivierpeilen door klimaatverandering;
- De grootste effecten op de grondwaterstand en droogval van plassen zijn berekend voor de Gelderse Poort, Waal en Zuidelijke IJssel. De voorspelde dalingen in grondwaterstand worden hier vooral bepaald door de snelheid van rivierinsnijding, en veel minder door verandering in rivierafvoer. Niettemin resulteert het gecombineerde effect van rivierinsnijding en lagere zomerafvoeren in een nog verdere verdroging van uiterwaarden;

- In gestuwde riviertrajecten (Neder-Rijn en Lek, Bovenmaas, Zandmaas, Bedijkte Maas) en de benedenstrooms gelegen IJssel-Vecht delta treden nauwelijks wijzigingen op in de grondwaterstand bij de verschillende klimaatscenario's. Hier zijn de fluctuaties in het rivierpeil initieel al veel minder groot, waardoor verandering van de rivierafvoer niet tot nauwelijks effect heeft. Aangezien rivierinsnijding in deze riviertrajecten geen rol speelt, zijn de effecten hiervan niet bepaald.
- Bij bovengenoemde resultaten moet opgemerkt worden dat de uiterwaarden in de Gelderse Poort, Waal en Zuidelijke IJssel reeds sterk zijn verdroogd in de huidige situatie. Deze verdroging is het gevolg van rivierinsnijding over de afgelopen decennia. Dit proces treedt alleen op in bovenstroomse delen van riviertrajecten, zoals de Bovenrijn, Waal (bodemdaling van 1 – 2 meter tussen 1950 – 2018) en Zuidelijke IJssel (bodemdaling van 0,2 – 0,8 meter tussen 1950 – 2018).

4.2 Ruimtelijke verschillen in huidige situatie

- Tussen de verschillende riviertrajecten zijn grote verschillen in grondwaterstand berekend voor dezelfde ecotopengroepen. Illustratief hiervoor is de lagere grondwaterstand in 'moerassen' van de Gelderse Poort in vergelijking met de IJssel-Vecht delta en gestuwde riviertrajecten zoals de Neder-Rijn en Lek. Waarschijnlijk is dit deels het gevolg van voortgaande rivierinsnijding over de afgelopen decennia. De oorspronkelijke moerasvegetatie reageert hier vertraagd op ('naijlen'); een soort als Riet kan op verdroogde locaties namelijk lang standhouden. Niettemin hebben deze terreindelen hun betekenis als moerasgebied (bijvoorbeeld als leefgebied voor kleine vis en amfibieën) merendeels verloren, omdat er in het groeiseizoen geen water meer boven het maaiveld staat. Voor een juiste interpretatie is het belangrijk dat er een goede omschrijving komt van de ecologische randvoorwaarden ten aanzien van (variatie in) grondwaterstanden voor de verschillende ecotooptypen (zie paragraaf 4.4).

4.3 Mogelijke effecten van hogere watertemperatuur

In dit rapport zijn de effecten van een hogere watertemperatuur op de natuur van grote rivieren niet gekwantificeerd. Met Rijkswaterstaat is afgesproken dat een samenvatting wordt gegeven van relevante literatuur over dit onderwerp. Naast de mogelijke consequenties van temperatuurstijging worden ook de mogelijkheden tot mitigatie benoemd. Momenteel voert Deltares een uitgebreide literatuurstudie uit naar de effecten van hogere watertemperaturen op de ecologie. Deze studie is een onderdeel van het KPP-PAGW programma en is eind 2020 gereed.

Als gevolg van klimaatverandering neemt de temperatuur van het water toe, wat – direct en indirect – invloed heeft op het rivierecosysteem. Soorten kunnen verdwijnen of verschijnen. Soorten verdwijnen omdat ze zich niet kunnen handhaven bij temperaturen die, tijdelijk of zelfs meer permanent, boven bepaalde drempelwaardes uitkomen. Van verschillende vissoorten is bekend dat warmere winters tot een vervroeging van de paai in het voorjaar leidt. Deze vervroeging kan tot enkele weken oplopen, waardoor het risico bestaat dat er nog geen voedsel beschikbaar is voor de vislarven als de eieren uitkomen (Noordhuis et al., 2019). Veranderingen in de samenstelling van de visgemeenschap kunnen ook tot voedselweb-effecten leiden; een goede onderbouwing hiervan ontbreekt echter nog (Pires en Kramer, 2018).

Exoten zijn veelal toleranter voor hoge watertemperaturen in vergelijking met inheemse soorten, waardoor deze kunnen toenemen door klimaatverandering (Leuven *et al.*, 2007). Hiernaast kan de biobeschikbaarheid van toxische stoffen toenemen bij een stijgende temperatuur, waardoor deze gemakkelijker ophopen in organismen en de (primaire) productie kan afnemen.

Een indirect effect is dat de oplosbaarheid van zuurstof bij een hogere watertemperatuur afneemt en de mineralisatie van organisch materiaal versnelt. Dit kan tot lagere zuurstofconcentraties en meer nutriënten leiden. In het zuurstofarmere water kan dan massale sterfte van vis en bodemfauna optreden.

In de wetenschappelijke literatuur zijn interacties beschreven voor de effecten van temperatuurverandering (en andere klimaatveranderingen) op ecologische omslagpunten. Deze zijn vooralsnog conceptueel van aard en er is nog veel onbekend. Er is echter wel algemene consensus dat hogere temperaturen (ten gevolge van klimaatverandering) de effecten van eutrofiering versterken (zie bv Meerhoff *et al.*, 2012; Jeppesen *et al.*, 2014). Dit betekent dat algen sterker tot ontwikkeling komen bij een hogere watertemperatuur (en dezelfde nutriëntenconcentraties). Dit geldt niet alleen voor stilstaande (uiterwaard)plassen, maar ook voor de hoofdstroom, met name tijdens lage afvoeren. Onder deze condities kunnen intense algenbloeien ontstaan. Deze zijn het gevolg van versterkende effecten tussen hoge watertemperaturen en stagnante condities (van Vliet & Zwolsman, 2007). Een voorbeeld hiervan is de blauwalgenbloeï in gestuwde delen van de Maas in de warme zomers van afgelopen jaren.

Mogelijkheden tot mitigatie

De effecten van eutrofiering (ten gevolge van hogere watertemperaturen) kunnen gemitigeerd worden door maatregelen die de nutriëntenbelasting reduceren. Een andere mitigerende maatregel is het aanbrengen van diversiteit in habitats, met speciale aandacht voor het creëren van verschillen in watertemperatuur (thermische habitatdiversiteit). Het doel van deze maatregel is de aanwezigheid van 'koud water refugia' tijdens warme periodes. Hierbij kan gebruik gemaakt worden van kwelstromen (zowel diepe kwelstromen vanuit pleistocene zandgronden, als ondiepe rivierkwel), en de aanwezigheid van diepe zandwinputten die permanent met de rivier zijn verbonden. Ook de inrichting van de waterbodem en oevers kan hierbij een rol spelen.

4.4 Aanbevelingen voor vervolg

Deze studie is een eerste stap in de verkenning van de effecten van lage rivierpeilen op de klimaatbestendigheid van het wensbeeld van de Natuurverkenning Grote Rivieren en Programmatie Aanpak Grote Wateren. De aanpak die in dit rapport is gehanteerd kan op verschillende manieren verbeterd worden. Onderstaand worden deze toegelicht.

4.4.1 Verbeterde hydrologische beschrijving van grondwaterdynamiek in uiterwaarden

In deze studie is aangenomen dat de gemiddelde rivierstanden in mei en oktober overeenkomen met de grondwaterstand in aangrenzende uiterwaarden. Deze aanname is met de nodige onzekerheden omgeven. Voorgesteld wordt om een betere hydrologische beschrijving te maken van de dynamiek van de waterstand in uiterwaarden in relatie tot het rivierpeil, verschillen in bodemtype en afstand tot de rivier, neerslag, verdamping en kwel. Op dit ogenblik is de berekening van de (grond)waterstand in mei de zwakste schakel in dit proces. Dit knelpunt kan waarschijnlijk op een relatief eenvoudige manier worden opgelost, door gebruik te maken van reeds bestaande hydrologische rekenregels.

Deze stap is ook nodig voor een juiste effectinschatting van klimaatverandering en rivierinsnijding voor de werkzaamheden van WEnR. Voorbeelden van vragen die hierbij relevant zijn: verdwijnen in de buitendijkse gebieden van de Gelderse Poort nu alle moerassen, of blijft een deel behouden? Zo ja, welk deel?

4.4.2 Effecten van sedimentatie op verdroging van uiterwaarden

In deze studie zijn alleen de effecten van lage rivierpeilen en rivierinsnijding meegenomen op de grondwaterstand in uiterwaarden meegenomen. De verdroging van uiterwaarden wordt echter ook veroorzaakt door sedimentatie van klei en zand tijdens rivieroverstromingen; dit geldt voor alle riviertrajecten. De hoogteligging van de uiterwaarden neemt hierdoor toe, met bijgevolg een lagere grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld.

Deze sedimentatie is het sterkst geweest op de oorspronkelijk laag gelegen (moerassige) delen van uiterwaarden, omdat deze delen de hoogste overstromingsfrequentie bezitten. Naar verwachting is het areaal van natte tot vochtige ecotopen hierdoor afgenomen. Tot dusver zijn de effecten van voortgaande sedimentatie van uiterwaarden op verdroging nog niet gekwantificeerd, zowel in de ruimte (verschillen tussen riviertrajecten) als in de tijd.

4.4.3 Verbeteren van effect-relaties

Voor een juiste interpretatie van de resultaten is het essentieel dat een goede ecologische onderbouwing wordt gegeven aan de gewenste grondwaterstanden van de verschillende ecotooptypen. Voor ooibossen is een dergelijke indeling al beschikbaar (Wolf et al., 2001). Voor andere vochtige tot natte ecotooptypen, zoals moerassen, ruigtes, schaars begroeide terreinen en ondiepe plassen, is een dergelijke beschrijving eveneens nodig. Het rapport van Runhaar en Hennekens (2015) kan hiervoor als input dienen. Op basis van deze informatie kan de verdroging van ecotopen gekwantificeerd worden. Hierbij is het belangrijk om de juiste definitie van verdroging te hanteren, omdat deze niet alleen afhangt van de diepte van het grondwater ten opzichte van het maaiveld, maar ook van veranderingen in de kwaliteit van het (grond)water. Voorts is er een reële kans dat een beschrijving voor hetzelfde ecotooptype verschilt tussen boven- en benedenstroomse riviertrajecten. Een voorbeeld hiervan is 'moeras', die in de Natuurverkenning Grote Rivieren reeds uitgesplitst is in riviermoeras (bovenstroomse riviertrajecten, tijdens groeiseizoen regelmatig droogvallend) en rietmoeras (benedenstrooms, met meer permanent water; Zuidhof et al., 2017).

In deze studie zijn alleen de effecten van lage rivierpeilen onderzocht. De effecten van hogere watertemperaturen en (verminderde) stroomsnelheid zijn daarentegen slechts beperkt of niet beschreven. Aanbevolen wordt om deze onderwerpen nader te onderzoeken. Vooral in gestuwde rivierpanden bestaat het risico dat de stroming (vrijwel) wegvalt tijdens lage rivierafvoeren, wat grote gevolgen kan hebben voor stroomminnende macrofauna- en vissoorten. Onder deze condities kunnen ook blauwalgenbloeien optreden, met name bij hoge watertemperaturen.

Aanbevolen wordt om eveneens de gecombineerde effecten van lage afvoer en hoge watertemperatuur mee te nemen, bijvoorbeeld verhoogde kansen op zuurstofloosheid van het water. Ook de effecten van toenemende (winter)overstromingen moeten beter in beeld gebracht worden.

Tot slot moet ook de vierde hotspot van het rivierengebied in deze studie betrokken worden, namelijk de effecten van klimaatverandering op de Biesbosch. Dit gebied wordt niet alleen beïnvloed door verandering van de rivierafvoer, maar ook door stijging van de zeespiegel en zoutindringing.

5 Literatuurlijst

- Beumer V., Vernimmen R., Holzhauer H. (2009) Effecten natuurwaarden benedenrivierengebied als gevolg van klimaatmaatregelen. Met een doorvertaling naar de effecten op de ecologische KRW doelen. Rapport Deltares.
- Buijse T. (2016) Notitie AqMaD vissen. Memo Deltares.
- Dionisio Pires, M., Kramer, N. (2018) Klimaatverandering IJsselmeergebied. Rapport Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat.
- Jeppesen, E., M Meerhoff, T.A. Davidson, D. Trolle, M. Sondergaard, T.L. Lauridsen, M. Beklioglu, S. Brucet, P. Volta, I. Gonzalez-Bergonzoni, A. Nielsen (2014) Climate change impacts on lakes: an integrated ecological perspective based on a multi-faceted approach, with special focus on shallow lakes. *Journal of Limnology* 73: 88-111.
- Leuven, R.S.E.W., N.A.H. Slooter, J. Snijders, M.A.J. Huijbregts & G. van der Velde (2007) The influence of global warming and thermal pollution on the occurrence of native and exotic fish species in the river Rhine. In: Van Os, A.G. (Ed.) Proceedings NCR-days 2007. A sustainable river system. Publication 32-2007, NCR, Delft
- Maarse M., Beumer V., Klijn F., Woelders L., Van Zetten J. (2011) Eerste generatie oplossingsrichtingen voor klimaatadaptatie in de regio Rijnmond-Drechtsteden
- Deelrapport: effecten op natuur. Rapport Deltares.
- Meerhoff, M. F. Teixeira-de Mello, C. Kruk, C. Alonso, I. González-Bergonzoni, J.P. Pacheco, G. Lacerot, M. Arim, M. Beklioğlu, S. Brucet, G. Goyenola, C. Iglesias, N. Mazzeo, S. Kosten & E. Jeppesen (2012) Environmental warming in shallow lakes. A review of potential changes in community structure as evidenced from space-for-time substitution approaches. *Advances in Ecological Research* 46: 259-349.
- Ministerie van Economische Zaken (2014). Natuurambitie Grote Wateren, 2050 en verder.
- Noordhuis R., De Rijk S., Van Geest G., Maarse M., Vergouwen S., Boon A. (2019) KlimaatScan: wat zijn de gevolgen van klimaatverandering voor het ecologisch functioneren van de Nederlandse Grote Wateren? Rapport Deltares.
- Runhaar, H. en S. Hennekens (2015) Hydrologische randvoorwaarden natuur; gebruikershandleiding (Waternoodapplicatie versie 3). Rapport STOWA 2015-22.
- Van Geest, G., W. Altena, O. de Keizer (2019) Natuureffectmodule voor de grote rivieren. Deltares-rapport.
- Van der Sluis Th., Pedroli B., Woltjer I., Van Elburg I. & Maas G. (2020) Uitwerking PAGW Natuuropgave Hotspots Grote Rivieren. Eindrapport Rapport WEnR, versie 6 mei 2020.
- Van Vliet, M. & G. Zwolsman (2007) Klimaatverandering en de waterkwaliteit van de Maas. *H₂O* 40: 29-33.
- Wolf, R.J.A.M., A.H.F. Stortelder & R.W. de Waal (redactie) (2001) Ooibossen; Boscosecosystemen van Nederland 2.

Wolters, H.A., G.J. van den Born, E. Dammers, S. Reinhard, 2018, Deltascenario's voor de 21e eeuw, actualisering 2017, Deltares, Utrecht.

Wolters, H.A., J. Hunink, J. Delsman, G. de Lange, G.J. van den Born, S. Reinhard, 2018, Deltascenario's voor de 21e eeuw, actualisering 2017, Achtergrondinformatie over gebruiksfuncties en sectoren, Deltares, Utrecht.

Wolters, H. (2002) Onderzoek Ecologie Rivierengebied – Hydrologie. Werkdocument RIZA – Rijkswaterstaat.

Ylla Arbos, C., A. Blom, S. Van Vuren, R.M.J. Schielen (2019) Bed level change in the upper Rhine Delta since 1926 and rough extrapolation to 2050. Research report. Delft University of Technology. Delft.

Zuidhof, A., J. Lankester, B. Pedroli, G. Maas, W. van Heusden, G. Snels (2017). Natuurverkenning Grote Rivieren, veerkrachtig ecosysteem voor de grote rivieren. Rapport van Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) in samenwerking met Wageningen Environmental Research (WEnR).

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