



Kennisnetwerk OBN

Klimaat effecten op riviernatuur



Klimaateffecten op riviernatuur



Radboud University





ontwikkeling+beheer natuurkwaliteit

o+bn

©2022 IPO, Vereniging het Interprovinciaal Overleg, BIJ12, uitvoeringsorganisatie van de gezamenlijke provincies, Utrecht.

Rapport- en projectnummer OBN-2020-121-RI

Deze publicatie is tot stand gekomen met een financiële bijdrage van de 12 provincies en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.

Teksten mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

Wijze van citeren: *M. Dorenbosch, M. de la Haye, R. van de Haterd, F. Huthoff, A. van Kleunen & W. Liefveld, 2022, **Klimaat effecten op riviernatuur**, Rapport nummer OBN-2020-121-RI, Kennisnetwerk OBN, Driebergen.*

Deze uitgave is online gepubliceerd op www.natuurkennis.nl

Samenstelling Martijn Dorenbosch, Michelle de la Haye, Rob van de Haterd,
Freek Huthoff, André van Kleunen & Wendy Liefveld.

Met medewerking van Frank Collas, Gerben van Geest & Mark Jalink

Foto voorkant De Grensmaas bij Bunde Foto: Wendy Liefveld

Productie Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren (VBNE)
Adres : Princenhof Park 7, 3972 NG Driebergen
Telefoon : 0343-745250
E-mail : info@vbne.nl

Voorwoord

Behoud maar zeker ook het herstel van biodiversiteit behoort tot de kerndoelen van de overheid. Om dit doel te realiseren ontwikkelt en verspreidt het Kennisnetwerk Ontwikkeling en Beheer Natuurkwaliteit (OBN) daarvoor toepasbare kennis over herstelmaatregelen voor Natura 2000, de aanpak van stikstof, de leefgebiedenbenadering, de ontwikkeling van nieuwe natuur én het cultuurlandschap.

De effecten van klimaatverandering zijn onzeker, maar dat er effecten zijn is iets wat wel duidelijk is. Denk maar aan de droge zomers van de afgelopen jaren, of de extreme regenbuien met overstromingen als gevolg. Ook in het rivierengebied moet de natuur zich hieraan aanpassen. Hoe zorgen we ervoor dat onze waardevolle habitats niet verdrogen of verzuipen?

Dit onderzoek zet alle kennis op het gebied van klimaateffecten op de natuur in het rivierengebied op een rij en beoordeelt welke beheer- en inrichtingsmaatregelen het meest kansrijk zijn voor het behouden en versterken van kenmerkende riviernatuur in een veranderd klimaat. Dit geeft beheerders een mooie handreiking, hoewel het in een dynamisch ecosysteem met onvoorspelbare klimaateffecten altijd zaak blijft goed naar de lokale omstandigheden te kijken en waar nodig bij te sturen.

Ik wens u veel leesplezier

Teo Wams

Voorzitter van de OBN Adviescommissie

Inhoud

1	<i>Inleiding.....</i>	11
1.1	Waarom deze studie?	11
1.2	Gevolgen voor de rivierbeheerder	11
1.3	Vraagstelling	12
1.4	Onderzoeksaanpak	12
1.5	Afbakening	13
1.6	Leeswijzer	15
2	<i>Klimatologische veranderingen langs de rivieren : wat is nu al zichtbaar?.....</i>	16
2.1	Klimaat effecten in het rivierengebied	16
2.2	Effecten op neerslag en afvoeren van Rijn en Maas	18
2.3	Temperatuur van lucht en water	23
2.4	Effecten op watertemperatuur in rivierhabitats.....	27
2.5	Effecten op grondwater en kwel	31
2.6	Effecten op waterkwaliteit.....	33
2.7	Effecten op bodem	38
3	<i>Verwachte ontwikkelingen van afvoerpatronen, doorstroming en watertemperatuur.....</i>	40
3.1	Klimaat scenario's	40
3.2	Effecten op waterstanden.....	42
3.3	Effecten op inundatiearealen	46
3.4	Effecten op (door)stroming	50
3.5	Effecten op piekafvoeren in voorjaar en zomer	52
3.6	Toename van de watertemperatuur.....	55
4	<i>Effecten van klimaatverandering op kenmerkende soorten en habitats</i>	56
4.1	Primaire productie en planten	56
4.2	Ongewervelden en macrofauna	57
4.3	Vissen	60
4.4	Effecten opwarming op aquatische fauna.....	63
4.5	Amfibieën	65
4.6	Vogels	70
4.7	Habitattypen en leefgebieden.....	75
5	<i>Beheerders aan het woord</i>	89
6	<i>Mitigerende maatregelen</i>	93
6.1	Inleiding	93
6.2	Mitigerende maatregelen temperatuur	94
6.3	Mitigerende maatregelen droogte	96
6.4	Maatregelen veerkracht	103

6.5	Maatregelen op hoger schaalniveau.....	104
6.6	Binnendijkse riviernatuur	105
6.7	Maatregelen voor het beheer	105
6.8	Voorbeelden van maatregelen uit de praktijk.....	107
6.9	Menukaart mitigerende maatregelen.....	113
7	<i>Conclusies en aanbevelingen</i>	115
7.1	Conclusies	115
7.2	Aanbevelingen voor onderzoek, beheer en klimaatmitigatie.....	118
8	<i>Referenties</i>	121

Samenvatting

Door klimaatverandering veranderen de leefomstandigheden voor mens, plant en dier. Ook langs de Nederlandse rivieren. De potentiële effecten zijn in veel studies uitgebreid onderzocht, variërend van wereldschaal tot op lokaal niveau (bijv. voor een stad). Wat het precies gaat betekenen voor het Nederlandse rivierengebied is complex en nog niet voor elk schaalniveau concreet. Op regionaal niveau met betrekking tot hoogwaterbescherming worden er al wel maatregelen getroffen die rekening houden met hogere piekafvoeren in de winter (en zomer). Maar welke maatregelen voor de bescherming van de ecologische waarden nodig zijn is nog niet zo duidelijk.

Dit komt mede doordat nog niet heel duidelijk is welke natuurwaarden in de knel zullen komen en welke mitigerende maatregelen daarvoor in beeld zijn. Duidelijk is wel dat het daarbij niet zozeer om de effecten van hoge piekafvoeren in de winter gaat, maar eerder om de omstandigheden in voorjaar en zomer, die gemiddeld droger en warmer zullen worden. De zomer van 2021 liet duidelijk zien dat ook in de zomer onregelmatige afvoerpieken kunnen optreden door verstoorde neerslagpatronen.

De voorliggende literatuurstudie en kennismontage heeft als doel een inschatting te geven van de te verwachten effecten van klimaatverandering voor de ecologie in het rivierengebied, op het land en in het water, met alle daaraan verbonden. Hierbij gaat het er vooral om voor de terrein- en waterbeheerders inzichtelijk te maken welk handelingsperspectief zij hebben, op kleine schaal, in lopende of geplande projecten en beheer, maar ook voor inbreng in regionaal of landelijk klimaatbeleid.

Kennisvragen

In deze studie staan de volgende vragen centraal:

- Wat zijn de te verwachten effecten van klimaatverandering op kenmerkende riviernatuur langs Maas en Rijn?
- Welke beheer- en inrichtingsmaatregelen zijn het meest kansrijk voor het behouden en versterken van kenmerkende (mogelijk nieuwe) riviernatuur in een veranderd klimaat?

Hierbij is gekeken naar een breed spectrum van soortgroepen en beschermde natuurwaarden. De informatie is gebaseerd op interpretatie van bestaande literatuur, op bijeengebrachte data uit andere studies en op nieuw gegenereerde data (combinatie hydrologische berekeningen en effecten op habitattypen). Daarnaast is met een aantal praktijkbeheerders gesproken om te horen tegen welke problemen zij nu al aanlopen en welke maatregelen zij inzetten ter mitigatie. Overkoepelend doel van de studie is om beheerders, plannenmakers en beleidsmakers betere instrumenten en kennisonderbouwing mee te geven voor het opstellen van beheerplannen, inrichtingsprojecten en beleidsprogramma's. De effecten van klimaatverandering op de zeespiegelstijging zijn geen onderdeel van deze studie, maar worden waar relevant wel kort benoemd.

Te verwachten effecten van klimaatverandering in het rivierengebied

Er zijn nu al klimaateffecten zichtbaar in het rivierengebied. Hierbij krijgen langs rivieren vooral de winterhoogwaters veel aandacht, maar zijn veel meer relevante veranderingen. Denk aan opwarming van het water, verdroging van uiterwaarden, droogval van nevenwateren en rivieroever, verschuiving van afvoerpatronen, zomerinundaties en toename van de verstuwingsgraad in de gestuwde riviertrajecten. Verdroging van de uiterwaarden vormt een groot risico in het rivierengebied omdat veel kenmerkende riviernatuur op één of andere manier in relatie staat tot de waterstanden en afvoerpatronen van de rivier. Door klimaatverandering veranderen de afvoerpatronen en de algemene

tendens is dat de waterstanden in de winter hoger worden, maar in het groeiseizoen vanaf het vroege voorjaar tot en met de nazomer gemiddeld steeds lager worden. Hierbij speelt bovendien in de bovenloop van de Waal en de IJssel tegelijk het effect van steeds sterkere insnijding van het zomerbed van de rivier, waardoor het waterpeil nóg verder zakt. Voor de ecologie in het rivierengebied zijn het vooral deze lage afvoeren die problematisch zijn.

Om een inschatting van het toekomstperspectief voor soorten en habitattypen langs Rijn en Maas te kunnen maken, zijn waterstandsberekeningen uitgevoerd voor het klimaatscenario dat de effecten van droogte en opwarming in het groeiseizoen het duidelijkst in beeld brengt (WHdry scenario). Hierbij is ook de bodemdaling van het zomerbed meegenomen, omdat de riviernatuur met de resultante van zowel verminderde rivierafvoer als bodemdaling te maken krijgt. Bij de berekening van de verwachte inundatiearealen is rekening gehouden met het huidige stuwregime op de gestuwde trajecten (Maas en Nederrijn/Lek). De resultaten van deze berekeningen zijn als 'worst case' meegenomen in de effectbepaling op riviergebonden habitattypen. Voor deze habitattypen is de jaarlijkse inundatieduur (en het moment van inundatie) een belangrijke standplaatsfactor die beïnvloed wordt door klimaatverandering.

Uit de berekeningen blijkt dat de effecten per riviertraject sterk verschillen: langs de Rijntakken neemt vooral het areaal dat tussen 10-20 dagen per jaar overstroomt sterk af, dit is het sterkst in de meest stroomopwaarts gelegen riviertrajecten (bovenstroom IJssel, Nederrijn, Waal en Bovenrijn). Voor deze stroomopwaarts gelegen Rijntrajecten neemt het totale areaal dat overstroomt af. Voor de IJssel stroomafwaarts van Deventer neemt het areaal dat kortdurend overstroomd (1, 10 en 20 dagen overstroomd) juist toe. Ook voor het benedenstroomse deel van Maas (beneden Lith) is er sprake van een toename van zowel kortdurend als langdurig overstroomde arealen. In de bovenstrooms Grensmaas en het Maasplassengebied in Limburg neemt het totale areaal dat overstroomt juist af.

Globaal is het beeld dat onder het doorgererekende klimaatscenario (inclusief bodemdaling) vooral langs de Rijntakken en de Grensmaas grote arealen 'droger' zullen worden (minder frequent overstroomd). Bodemdaling van het zomerbed van de rivier versterkt dit verdrogende effect op de aangrenzende uiterwaarden. Deze bodemdaling is voornamelijk merkbaar in de bovenloop van de Waal en de IJssel. In de benedenstroomse en gestuwde trajecten zijn de verdrogingseffecten minder zichtbaar dankzij de stuwen en het dempende effect van het IJsselmeerpeil en het Haringvliet.

Effecten op habitattypen en soorten

De klimaatscenario's voorspellen verschuivingen in natte en droge omstandigheden, de duur ervan en het seizoen waarin dit optreedt. Dit kan voor diverse habitats en leefgebieden een mogelijke mismatch opleveren met de andere abiotische vereisten die tezamen de standplaatsfactoren vormen voor een vegetatie of leefgebied. Niet alle standplaatsfactoren zijn integraal meegenomen in deze analyses. Belangrijke abiotische factoren die ook een rol spelen in het toekomstperspectief van soorten en leefgebieden zijn niet meegenomen, zoals bodemtype, kwel, basenbeschikbaarheid. Deze factoren zijn meer geschikt om in gerichte locatiestudies mee te nemen, omdat dit een te groot detailniveau van informatie vraagt voor een grootschalige analyse.

Habitattypen

In het algemeen resulteert klimaatverandering in meer lichtbeschikbaarheid en hoger lucht- en watertemperaturen waardoor de primaire productie in het water omhoog gaat. De biomassa van planten en algen zal in eerste instantie toenemen, echter ook de microbiële activiteit en mineralisatie van organisch materiaal waardoor meer nutriënten beschikbaar komen. In combinatie met hogere temperaturen geeft dit een groter risico op algen- en kroosbloeien en minder kansen voor soortenrijke watervegetaties die gedijen bij minder voedselrijke omstandigheden (bijv. in kwelzones).

Voor terrestrische vegetaties zal de nutriëntenbeschikbaarheid naar verwachting weinig veranderen door klimaatverandering. Voor deze vegetaties worden echter wel effecten verwacht van de gewijzigde inundatiefrequenties- en duur. Op voorhand wordt in grote delen van de Rijntakken en de Maas in het groeiseizoen een afname van het inundatieareaal verwacht door klimaatverandering. In het (vroeg) voorjaar zal er minder sprake zijn van tijdelijk overstroomde laagtes in uiterwaarden terwijl ondiepe uiterwaardplassen in de zomer vroeger of vaker zullen droogvallen.

Door deze verdroging van de uiterwaarden gaan de vochtige habitats in areaal en kwaliteit achteruit. Met name de natte zachthoutoibossen (met kenmerkende ondergroei van gele lis en bitterzoet) in het bovenstroomse deel van de Rijntakken zullen hierdoor verder verruigen; langs de Maas is dit effect echter nauwelijks te verwachten. Ook laaggelegen hooilanden (vossenstaarthooiland) worden hierdoor negatief beïnvloed. De best ontwikkelde vossenstaarthooilanden (met kievitsbloem, weidekervel of trosdravik) liggen echter benedenstrooms en/of in gereguleerde zomerpolders en worden dus veel minder beïnvloed.

Het gewijzigde overstromingsregime heeft tot gevolg dat er in theorie meer ruimte zou komen voor relatief weinig overstroomde habitattypen, zoals stroomdalgraslanden, glanshaverhooilanden, essen-iepenbossen en hardhoutoibossen. Kanttekening hierbij is dat het bijbehorende bodemtype in deze analyse niet is meegenomen, waardoor er sprake kan zijn van een mismatch tussen bodemtype en inundatiefrequentie. De verwachting is dat er in de zone die minder dan 20 dagen inundeert het aandeel kleiige grond toeneemt terwijl er minder of zelfs helemaal geen zandige grond bijkomt. Dat zou betekenen dat het potentiële areaal glanshaverhooiland en essen-iepenbos toeneemt, maar het potentiële areaal stroomdalgrasland en hardhoutoibos niet of nauwelijks.

Langs de Maas zijn de effecten op bestaande habitattypen veel geringer dan langs de Rijn, niet alleen omdat de verdroging hier minder is (geen bodeminsnijding), maar ook omdat er minder Natura 2000 gebieden zijn (alleen Grensmaas, Oeffelter Meent en klein stukje Maasduinen). De zachthoutoibossen worden langs de Maas niet beïnvloed door klimaatverandering in het doorgerekende scenario. Kanttekening hierbij is dat de effecten op grondwaterstanden niet zijn meegenomen, wat met name langs de zandige en grindige Maastrajecten een invloedrijke factor kan zijn. In de graslanden langs de Zandmaas zijn wel veranderingen zichtbaar: De relatief natte delen inunderen minder vaak en de relatief droge delen vaker. Hierdoor komt een groter deel van de habitattypen juist gunstiger te liggen omdat ze nu eigenlijk te droog liggen.

Soorten

De effecten op soorten verschillen tussen en binnen soortgroepen: er zijn winnaars (bijv. rivierfonteinkruid) en verliezers (bijv. gele plomp). Ook bij de insecten zijn er soorten die profiteren of juist nadeel hebben van de opwarming als gevolg van klimaatverandering (dit effect zien we in alle ecosystemen terug). Het effect van klimaatverandering op toenemende droogte of juist zomerinundaties is allebei negatief voor de meeste insectensoorten langs de rivier.

In het water zijn veel kenmerkende macrofaunasoorten (bijv. Ephemeroptera (haften), Plecoptera (steenvliegen) en Trichoptera (kokerjuffers)= EPT soorten) relatief gevoelig voor klimaateffecten als opwarming, hoge temperatuur en stagnatie van het oppervlaktewater. Exoten zijn hiervoor vaak toleranter en hebben dus een concurrentievoordeel.

Kenmerkende vispopulaties ondervinden nadeel als de voorjaarsinundaties van de uiterwaarden afnemen en de watertemperaturen toenemen, evenals de toename van de verstuwingsgraad. Dit effect van toenemende stagnatie geldt voor de gestuwde trajecten, maar ook voor de vrij afstromende riviertrajecten zoals de Grensmaas, de Waal en de IJssel. Deze zullen steeds minder vaak echt stromen in de zomerperiode en daarmee minder aantrekkelijk worden voor stroomminnende soorten. Met name in de benedenlopen van de rivieren zal de stroming gemiddeld steeds verder afnemen, door de opstuwende werking van

de geleidelijk stijgende zeespiegel. Vroegtijdige droogval van nevenwateren (reeds aan het begin van de zomer) is ook negatief voor de kenmerkende vissoorten die daar voorkomen, vooral als bodems volledig indrogen. Ook soorten die in enige mate droogte resistent zijn zoals grote modderkruiper en kroeskarper kunnen extreem lange droge periodes niet lang overleven. Net als bij macrofauna geldt daarnaast dat veel kenmerkende riviervissen gevoelig zijn voor hoge temperaturen en lage zuurstofgehalten. Kwabaal is een voorbeeld van een soort die zeer gevoelig is voor de effecten van opwarming en die zich in de toekomst waarschijnlijk niet meer kan handhaven in de Nederlandse rivieren. Maar ook stroomminnende soorten zoals zalmachtigen, rivierdonderpad en serpeling zijn relatief slecht bestand tegen hoge watertemperaturen in de zomer.

Ook van de amfibieën zijn verschillende soorten gevoelig voor klimaatverandering, vooral voor verdroging van hun leefgebieden en met name van voortplantingswateren. Droogval van voortplantingswateren laat in de zomer is in principe gunstig voor de meeste amfibieën, prederende vissen verdwijnen immer uit de wateren. Versnelde droogval van ondiepe voortplantingswateren in het voorjaar of aan het begin van de zomer is echter desastreus voor het voortplantingssucces, zeker als dit meerdere jaren achter elkaar gebeurt. Naarmate het natte en moerassige areaal (dat kortdurend overstroomd of gevoed wordt door rivierkwel) in uiterwaarden steeds verder afneemt en steeds vroeger droogvalt, zullen verschillende soorten in de knel kunnen komen. Dit betreffen vooral soorten met een beperkte verspreiding in het rivierengebied zoals kamsalamander, rugstreeppad en heikikker.

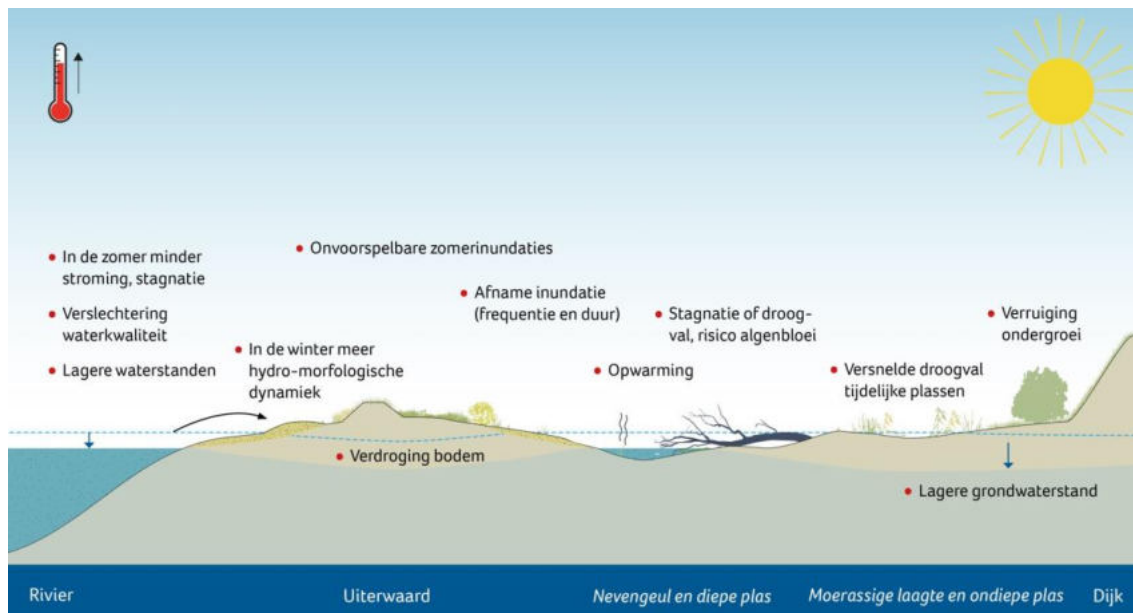
Vooraf te voege droogval van voortplantingswateren vormt een probleem voor amfibieën in uiterwaarden in relatie tot klimaatverandering. Hogere watertemperaturen hebben daarentegen weinig effect op ontwikkeling van amfibieënlarve, het opwarmende water versnelt simpelweg hun ontwikkelingsstadia.

Veranderingen in de samenstelling van de vogelpopulatie langs de rivieren volgen deels op de veranderingen als gevolg van klimaateffecten op vegetatie. Bij vogels kan de verschuiving van afvoerpatronen en de afname van voorjaarsinundaties vooral voor moerassoorten een toenemend knelpunt vormen (bijv. porseleinhoen). Vooral in het kwetsbare broedseizoen staat de beschikbaarheid van voldoende natte zones voor de voedselvoorziening hierbij onder druk. Sommige warmte- of droogteminnende soorten zullen profiteren, met mogelijk nieuwkomers als bijeneter of kleine zilverreiger in het verschiet. Door mondiale klimaatveranderingen zal echter ook de aanwezigheid van wintergasten en trekvogels langs de rivier veranderen. Dit hoeft dan niet persé aan veranderingen in het Nederlandse rivierengebied te liggen, ook de situatie in noordelijke, arctische gebieden kan invloed hebben op vogels die in Nederland overwinteren.

Zomerinundaties

Een apart geval van het effect van klimaatverandering is het toenemende risico op zomerinundaties. Wat dit betekent hebben we in de zomer van 2021 meegemaakt waarbij een hevige hoogwater afvoergolf door lokale stortbuien in Nederland, Duitsland en België resulteerde in een extreem zomerhoogwater waarbij grote delen van de uiterwaarden van Rijn en Maas plotseling onderwater zijn gelopen. De verwachting is dat dit soort zomerextremen in de toekomst vaker gebeuren (hoewel het wel tot de extreme incidenten gerekend blijft worden - gemiddeld eens per 400 jaar).

Voor dergelijke onvoorspelbare incidenten met onvoorspelbare omvang en duur is het moeilijk om uitspraken over de te verwachten effecten op riviernatuur te doen. Langs de Maas speelt dit naar verwachting meer dan langs de Rijn omdat deze rivier sneller reageert op (regen)gebeurtenissen in het relatief kleine stroomgebied. Duidelijk is wel dat voor de meeste soortgroepen toename van de frequentie van zomerinundaties negatief uitpakken. Met name op de drogere graslanden (glanshaverhooiland, stroomdalgrasland) en bossen is een negatief effect te verwachten van zomerinundaties.



Figuur 0.1: Samenvatting effecten klimaatverandering langs rivieren.

Figure 0.1: Summary of climate change effects along rivers.

Mitigerende maatregelen

Een belangrijke vraag uit deze studie is de vraag wat rivierbeheerders kunnen doen om het riviersysteem robuuster te maken tegen klimaatverandering. Om een indruk te krijgen van de bestaande ervaringen van beheerders in relatie tot effecten van klimaatverandering zijn acht rivierbeheerders geïnterviewd. Hieruit blijkt dat beheerders tegen allerlei praktische problemen aanlopen als gevolg van klimaateffecten, maar dat ze vooral ook behoefte hebben aan goede samenwerking en coördinatie op een hoger schaalniveau. Vaak ligt dit buiten hun directe invloedssfeer. Daar ligt volgens hen echter wel de sleutel voor een effectieve aanpak. Toch zijn er heel wat mitigerende maatregelen die al wel door rivierbeheerders ingezet kunnen worden en waar deels ook al ervaring mee is opgedaan. Ook zijn er kansrijke nieuwe maatregelen die verkend kunnen worden. In Tabel 6.1 zijn deze samengevat voor de twee onderscheiden schaalniveaus. Voor de uitwerking per uiterwaard is vervolgens een meer gedetailleerde analyse op lokale schaal nodig.

Bij klimaatmitigerende maatregelen moet niet alleen gedacht worden aan mitigatie van droogte of opwarming, maar ook aan versterking van het ecologisch netwerk. De gedachte hierachter is dat soorten zich makkelijker kunnen bewegen tussen verschillende habitats in het rivierenlandlandschap (en het aangrenzende binnendijkse gebied). Soorten kunnen op deze wijze lokale extreme omstandigheden ontwijken (door te vluchten/emigreren), of een locatie opnieuw koloniseren vanuit een relictpopulatie in een aangrenzend gebied. De maatregelen die nu in de Programmatische Aanpak Grote Wateren (PAGW) worden voorzien zullen bijvoorbeeld bijdragen aan het klimaatrobuuster maken van het rivierensysteem doordat er grotere natuurlijke eenheden worden gerealiseerd die met elkaar verbonden worden. Dit maakt soorten en habitats beter bestand tegen onvoorspelbare extreme klimaatgebeurtenissen die zich vaak zeer lokaal uiten (bijv. droogval van een ondiepe plas). Kanttekening is dat habitats met een lange ontwikkeltijd, zoals hardhoutoibossen en laag-dynamische moerassen, pas na een lange, ongestoorde periode in het rivierlandschap ontstaan. Voor het ontwikkelen van deze langzaam groeiende habitats is een lange-termijn strategie nodig met een duidelijke en stabiele prioriteit, planning en beheer. Door bijvoorbeeld binnendijkse gebieden (opnieuw) aan te koppelen aan de rivier neemt de ruimte in de uiterwaarden in laterale zin toe. Er ontstaat meer ruimte voor laag-dynamische milieus en er kan bijv. vanuit rivierkundig perspectief meer ontwikkeling van uiterwaardvegetaties en langdurig overstromde overstromingsvlaktes toegelaten worden.

Aanbevelingen

Klimaatverandering is een complex verhaal. Om de effecten voor het rivierengebied te kunnen inschatten hebben we gebruik gemaakt van enerzijds modelprognoses die we doorvertaald hebben naar te verwachten effecten op het ecosysteem en anderzijds van signalen die nu al in de praktijk waarneembaar zijn. Er is echter nog weinig detailonderzoek naar de ecologische effecten uitgevoerd. Zo is er nog weinig tot niets bekend over de te verwachten effecten op kwel in de uiterwaarden of over de effecten van zomerinundaties. Ook zijn in de huidige studie de effecten van zeespiegelstijging (o.a. verzilting) niet meegenomen, terwijl dit in de benedenlopen van de grote rivieren wel zal doorwerken. In een gericht vervolgonderzoek zouden deze aspecten nader belicht kunnen worden om het verhaal compleet te maken. Ook in het benedenrivierengebied speelt bodemdaling door sedimenttekort een belangrijke rol. Het zou goed zijn te bekijken welke strategieën bovenstrooms ook kunnen helpen om de knelpunten benedenstrooms op te lossen. De aard van de benodigde mitigerende maatregelen is in elk geval deels vergelijkbaar.

Voor beheerders kan het nuttig zijn om voor de kwetsbare gebieden (zie Figuur 3.8) verder in te zoomen en een gerichte gebiedsanalyse uit te voeren, gericht op de lokale natuurdoelen. Hierbij zal onder andere ook de bodemsamenstelling moeten worden meegenomen en kunnen ook andere relevante factoren worden meegewogen.

Als hulpmiddel bij het analyseren van klimaateffecten in een specifieke uiterwaard kan de ontwikkelde webviewer gebruikt worden:

<https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=32d3e4e0ac964d79ac93312bb516cea5>.

In deze webviewer zijn de resultaten van de berekende inundatiearealen in te zien voor de Rijn en de Maas, zowel met als zonder bodemdaling. Dit kan door beheerders gebruikt worden om in te zien welke gebieden minder gaan overstromen (en gevoelig zijn voor verdroging) of juist meer gaan overstromen (en kansen bieden voor vernatting en het ontwikkelen van overstromingsvlaktes). Vervolgens kan op basis hiervan meer in detail bekeken worden (bijvoorbeeld in een LESA) waar kwetsbare of kansrijke zones liggen en welke mitigerende maatregelen of beheerdoelen hierbij passen (bijv. in relatie tot het vormgeven van KRW-maatregelen). In deze studie hebben we bijv. een combinatiekaart gemaakt van de verwachte inundatiearealen in het klimaatscenario met de al bestaande kansenkaart voor overstromingsvlaktes.

In de stroomopwaartse delen van de Rijntakken en de Maas wordt het verdrogende effect van klimaatverandering verder versterkt door de voortgaande insnijding van de rivierbodem. De maatregelen die momenteel worden verkend (onder meer in het kader van Integraal Rivier Management) om bodemdaling van het zomerbed tegen te gaan, zullen de verdrogingseffecten in de bovenlopen deels kunnen mitigeren. Denk hierbij aan bodemsuppleties, vrij eroderende oevers en kribaanpassingen. Deze maatregelen kunnen daarmee ook als klimaatmitigatie worden bestempeld. In de benedenstroomse delen (IJssel beneden Deventer, Maas beneden Lith) zijn er mogelijk juist kansen voor soorten en habitats van natte omstandigheden.

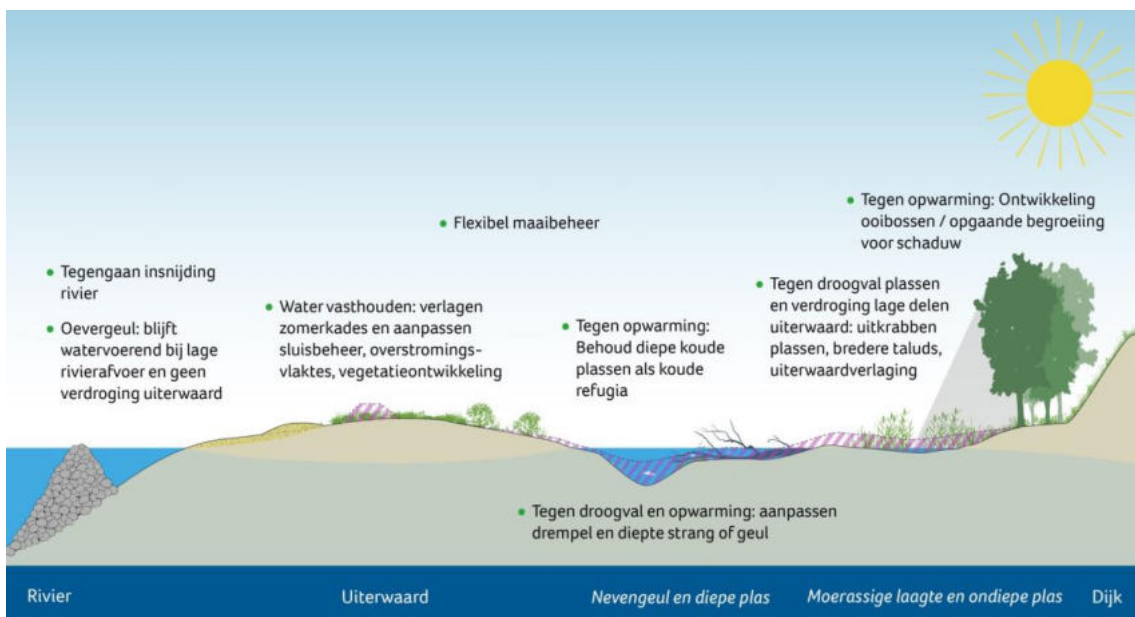
Ook zullen we anders tegen begroeiing in de uiterwaarden aan moeten kijken.

Vegetatiestructuren dragen bij aan het vasthouden van water op het maaiveld en in de bodem, op hogere grondwaterstanden terwijl schaduwvorming opwarming tegengaat. Het toestaan van grotere aaneengesloten vegetatiearealen in uiterwaarden (opslag van bos, struweel en riet) is daarmee een belangrijk stuurknop voor 'temperatuurmanagement'. De complexe afweging hierin tussen natuurwaarden en waterveiligheid krijgt er dus een component 'klimaatbestendigheid' bij.

Daarnaast blijken diepe uiterwaardplassen vaak een diepe, koude zone te herbergen die in de zomer nog voldoende zuurstof bevat en als thermorefugium kan functioneren voor temperatuur-gevoelige fauna. Het (gedeeltelijk) behouden van deze diepe uiterwaardplassen

zou een belangrijk afweegkader moeten zijn in het robuuster maken van rivieruiterwaarden in relatie tot het verondiepen van diepe plassen.

Voor beheerders in het rivierengebied betekent klimaatverandering naast een extra kostenpost ook een extra onzekerheidsfactor, die enerzijds een grotere onvoorspelbaarheid met zich meebrengt (denk aan zomerhoogwaters), maar ook de bestaande drukfactoren verder uitvergroot (denk aan verdroging, opwarming en eutrofiëring). In die zin blijft het in een opwarmend klimaat voor veel natuurdoelen hard werken en vraagt het nog grotere flexibiliteit van de beheerders. Tegelijkertijd raken steeds meer mensen doordrongen van de urgentie van het nemen van klimaatmaatregelen en zal er hopelijk de komende jaren meer aan brongerichte maatregelen gewerkt gaan worden op een hoger schaalniveau. Dit zou een belangrijke pijler vormen voor de gebiedsgerichte (beheer)maatregelen waar beheerders voor aan de lat staan.



Figuur 0.1: Schematische weergave van enkele maatregelen die in het rivierengebied genomen kunnen worden tegen de verandering van processen veroorzaakt door klimaatverandering.

Figure 0.1: Schematization of some measures to mitigate the change in processes along rivers due to climate change.

Dankwoord

Wij willen alle betrokkenen bedanken voor hun medewerking in het project. En dat zijn er heel wat: Om te beginnen bedanken we de mensen die de enquête hebben ingevuld evenals de mensen die meegewerkt hebben aan de interviews. Verder natuurlijk onze partners in dit project: André van Kleunen (SOVON), Frank Collas (RU/RWS ZN), Mark Jalink (KWR), Gerben van Geest (Deltares), Laurens Sparrius (Floron), Raymond Creemers (RAVON) en Mark Groen (RAVON). Zij hebben in meer of mindere mate bijgedragen aan de teksten, informatie aangeleverd en/of met ons meegedacht over de inhoud en de opzet van de studie. Ook bedanken we Wilfried ten Brinke (Blueland) voor zijn kritische blik op de rivierkundige en klimaat-aspecten. Verder bedanken we de leden van de begeleidingscommissie (Annelies Blankena, Wendy Vercruijssse en Fabrice Ottburg) voor het begeleiden van het proces en het Deskundigenteam Rivierenlandschap voor het geven van feedback tijdens het project. Wim Lammers willen we bedanken voor het waarnemen van de begeleidingscommissie in de periode dat deze nog niet was ingesteld en er toch al knopen doorgehakt moesten worden. Ook Mark Brunsveld willen we bedanken voor het begeleiden van de opdracht als secretaris van het Deskundigenteam Rivierenlandschap in de beginperiode van het project. Marieke de Lange, Lilian Hermens en Iris van Gogh willen we bedanken als nieuwe voorzitters, respectievelijk secretaris van het Deskundigenteam Rivierenlandschap in de eindfase van dit project.

Klimaatverandering is geen makkelijk onderwerp, en de effecten ervan doorgronden en, met alle onzekerheden van dien, doorvertalen naar wat er staat te gebeuren het rivierengebied al helemaal niet. Laat staan om dan ook nog eens in te schatten wat dit betekent voor de veelheid aan soorten en habitats die langs de rivier voorkomen. Het is niet zo raar dat dit overzicht tot nu toe ontbrak en we zijn ons ervan bewust dat ook in dit verhaal puzzelstukjes ontbreken of verdere duiding behoeven. Gelukkig gaat klimaatverandering geleidelijk en kunnen we hier de komende jaren op allerlei fronten aan werken. De zomer van 2021 heeft laten zien dat we met het uitvoeren van mitigerende maatregelen gerust haast mogen maken. De huidige studie geeft hopelijk handvatten om daarbij ook de ecologische waarden volwaardig mee te kunnen nemen.

Wat verder opviel was dat de verschillende rivier-betrokkenen vanuit hun eigen (werk)perspectief andere nuances van interpretatie geven aan de te verwachten klimaateffecten en wat dit betekent voor riviernatuur. Zo vormden de zomerhoogwaters van 2021 geen probleem voor de veiligheid langs de Rijntakken, maar hadden ze voor diverse terreinbeheerders wel financiële consequenties vanwege effecten op het uiterwaardbeheer. En ook binnen de beheerdersgroep is niet één visie op het probleem. Waar één vanuit de *rewilding* gedachte het beste denkt te kunnen meebewegen, ziet de ander toch belangrijke natuurwaarden in gevaar komen en wil vanuit die optiek graag mitigeren. In dit rapport beide invalshoeken aan bod, wat de dialogen over dit onderwerp hopelijk vergemakkelijkt. Veel leesplezier!

1 Inleiding

1.1 Waarom deze studie?

Ons klimaat verandert. De afgelopen decennia krijgen we dankzij vele studies steeds meer inzicht in de gevolgen die dat voor ons land gaat hebben. Droge, hete zomers komen vaker voor, evenals periodes met hevige regenval. Nederlandse ecosystemen worden zowel blootgesteld aan verdroging (zomer), als vergrote dynamiek door (hevige) regenval (winter). Ook in het rivierengebied, waar water een cruciale rol speelt, zijn effecten te verwachten. Dit wordt versterkt doordat de rivier sterk beïnvloed is door menselijk gebruik (dijken, kribben, stuwen, bochtafsnijdingen). De klimaatvoorspellingen impliceren (met vele onzekerheidsmarges) onder meer een toename in piekafvoeren en zeespiegel. Hoogwaterveiligheid en waterberging krijgen dan ook logischerwijs veel aandacht in Nederlandse klimaatstudies. De door opwarming versterkte neerslagtekorten resulteren echter ook in steeds lagere rivierafvoeren in de zomerperiode. In combinatie met de continue insnijding van het rivierzomerbed, zal de waterstand in rivier en uiterwaarden in de zomer steeds sneller en vroeger dalen. Verdroging is daarmee een belangrijke bedreiging voor de ecologie in het rivierengebied.

De warme zomers uit 2018, 2019 en 2020 gaven inzicht wat ons mogelijk te wachten staat: de afvoeren van Maas en Rijn behoorden tot de laagste ooit gemeten, wat resulteerde in droogval van oevers, geulen, strangen en plassen. De extreme piekafvoeren in de zomer van 2021 behoren echter ook tot de voorspelde klimaateffecten (meer hoosbuien in de zomer), met weer heel andere gevolgen. Wat de gevolgen precies zijn van de verschillende klimaatontwikkelingen voor de riviernatuur, valt nog niet in zijn geheel te overzien. Om zo nodig te kunnen anticiperen met beheer- en inrichting, is het wel belangrijk hier een scherper beeld van te hebben. Deze studie beoogt hier meer duidelijkheid in te geven en handvatten te bieden voor maatregelen gericht op ecologische waarden en natuurdoelen. Doel is ook de bestaande informatie over klimaateffecten in het rivierengebied te bundelen en daarmee makkelijker toegankelijk te maken voor beheerders van riviernatuur.

1.2 Gevolgen voor de rivierbeheerder

Er is natuurlijk al veel klimaatonderzoek uitgevoerd. De focus ligt hierbij vaak op het goed voorspellen van de te verwachten klimatologische effecten. In deze studie staat juist het beheerdersperspectief centraal, zowel van de terreinbeheerder als van de waterbeheerder. Het schaalniveau dat hierbij past, is specifiek op ecologie gericht dan regulier in de klimaatstudies gehanteerd wordt, zoals de klimaateffectatlas (<https://www.klimaateffectatlas.nl/nl/>). De bestaande klimaatstudies vormen wel een solide basis voor de gewenste vertaalslag. Hierbij gaat het erom zicht te krijgen op in hoeverre klimaat gestuurde processen zoals droogval, stijgende watertemperatuur en het verlies aan waterstroming, invloed hebben op kenmerkende soorten en habitats. We kijken hierbij vooral naar de soorten en habitattypen die het rivierbeheer centraal staan vanwege Natura 2000- en KRW-doelstellingen (flora, macrofauna, amfibieën, vissen en vogels). We maken hierbij inzichtelijk wat de voorspelde klimaatveranderingen betekenen voor de sturende processen en daarmee voor de levensvatbaarheid van deze soorten en habitats langs de Rijn en de Maas.

Klimaatscenario's zijn modelscenario's, die door het KNMI elke twee jaar worden geüpdatet op basis van nieuwe kennis en inzichten. Ze worden gebruikt om in te schatten wat voor

klimaat effecten in Nederland te verwachten zijn en op basis daarvan richting te geven aan het klimaatbeleid. Ze kennen echter een aanzienlijke onzekerheidsmarge, die al te precieze interpretatie niet rechtvaardigt. Dit geldt ook voor de modelberekeningen die voor deze studie zijn uitgevoerd. Je kunt er niet precies uit halen welk perceel hoe vaak droog zal vallen of onder zal lopen, maar wel welke gebieden, habitats en soorten onder druk komen te staan en waar dus extra zorg naar uit moet gaan. De beheerders zien in het veld de gecombineerde effecten van alle klimaat- en andere veranderingen in het riviereengebied en moeten hier vooral ook hun eigen beheerervaring bij inzetten. Deze studie geeft een beeld van de richting waarin de terreinen, de natuurkwaliteit en de dagelijkse beheerpraktijk zich in de toekomst zal bewegen. Ook kunnen brengt deze studie in beeld wat er vanuit ecologisch perspectief nodig is voor inbreng aan klimaattafels of beleidsprogramma's

1.3 Vraagstelling

In deze studie staan de volgende vragen centraal:

1. Wat zijn de te verwachten effecten van klimaatverandering op kenmerkende riviernatuur langs Maas en Rijn?
2. Welke beheer- en inrichtingsmaatregelen zijn het meest kansrijk voor het behouden en versterken van kenmerkende (mogelijk nieuwe) riviernatuur in een veranderd klimaat?

Overkoepelend doel van de studie is ook om de bestaande kennis te bundelen om beheerders, plannenmakers en beleidsmakers gerichte kennisonderbouwing mee te geven voor het opstellen van beheerplannen, inrichtingsprojecten en beleidsprogramma's vanuit ecologisch perspectief.

1.4 Onderzoeksaanpak

Literatuur- en bronnenonderzoek

Als start van het onderzoek hebben we op basis van literatuur, monitoringsdata en beschikbare voorspellingen een overzicht gemaakt van de sturende processen die gaan veranderen in ons riviereengebied en hoe zich dit verhoudt tot de huidige soortengemeenschappen (hoofdstuk 2 en 3).

We hebben hiertoe eerst een zoekactie uitgevoerd naar gepubliceerde en gepeer-reviewde internationale wetenschappelijke artikelen door relevante zoektermen in de zoeksystemen Web of Science en Google Scholar in te voeren. Hierbij zijn Engelstalige zoektermen (al dan niet in combinatie of afgeleiden) gebruikt zoals 'climate', 'chance', 'rivers', 'Rhine', 'Meuse', 'warming', 'fish', 'amphibians', 'birds', 'plants', 'production', 'invertebrates', 'biodiversity', 'ecology', 'vegetation', 'shallow', 'water', 'hydrology', 'flood plains', 'drying', 'ponds', 'forests', 'restoration', 'conservation', 'management' and 'temporal'. De artikelen zijn gescreend op relevantie waarbij ze onder ander van toepassing moesten zijn op de gematigde klimaatzone en/of betrekking hebben op riviersystemen, klimaatvragen en/of relevante processen en soortgroepen. Dit resulteerde in ca. 50 bruikbare relevante bronnen.

Dit overzicht is vervolgens aangevuld met (Nederlandse) artikelen en rapporten uit het netwerk van het consortium en zoals aangedragen door diverse experts en OBN-deskundigen. Tevens zijn archieven geraadpleegd van het KNMI, WUR (hydrotheek), Deltares, STOWA, RWS en Nederlandse natuurtijdschriften. Dit resulteerde in tenminste nog eens 50 bruikbare bronnen. Alle bronnen zijn opgenomen in het literatuuroverzicht aan het eind van dit rapport. De bronnen zijn in de hoofdstukken verwerkt.

Ontwikkelingen in temperatuur, hydrologie, ecologie

Om een beeld van het reeds bestaande effect van klimaatverandering in het rivierengebied te genereren, zijn openbare meetreeksen van temperatuur, neerslag en waterstanden onderzocht van het KNMI en RWS. Dit is in de betreffende hoofdstukken verder uitgelegd. Om een relatie met afzonderlijke soorten en klimaat te leggen is het verspreidingsarchief van RAVON – NDFF gebruikt en telreeksen van SOVON.

Hydrologische studie

Middels een hydrologische studie (Baseline v19_5) hebben we in beeld gebracht wat de te verwachten effecten zijn, welke gebieden het grootste risico lopen op verdroging, vernatting, of waar juist kansen liggen voor het vasthouden van water na hoogwatergolven. Voor deze hydrologische berekeningen zijn we uitgegaan van het meest extreme klimaatscenario van het KNMI (WHdry). Hierbij is ook de autonome bodemdaling van het zomerbed van de rivier meegenomen, zodat de uitkomsten een geïntegreerd beeld geven van de te verwachten waterstanden. In hoofdstuk 3 wordt de gevolgde methodiek verder toegelicht.

Koppeling met ecologie

De resultaten van deze berekeningen hebben we in de vervolgstap gekoppeld aan de eisen van kenmerkende soorten en habitats in het rivierengebied. Om dit te kunnen doen hebben we ecologische tolerantiewaarden verzameld van de huidige kenmerkende soorten in het rivierengebied uit verschillende databases en deze vergeleken met de voorspelde effecten van klimaatverandering op de sturende processen zoals inundatieduur. Deze inzichten geven antwoord in hoeverre bestaande populaties en habitats in de knel zouden kunnen komen, of welke nieuwe kansen in het verschiet liggen, met onderscheid naar Maas en Rijn.

Visie van beheerders

Een nieuw onderdeel ten opzichte van eerdere studies is het betrekken van relevante water- en terreinbeheerders om zowel hun visie op klimaatverandering als hun kennis en ervaring uit de praktijk mee te kunnen nemen. We hebben door middel van een enquête en interviews verkend tegen welke praktische problemen aangelopen wordt met betrekking tot klimaat gerelateerde processen en welke mitigerende maatregelen zinvol, realistisch en haalbaar zijn. We hebben deze inzichten vergeleken met het succes (of falen) van maatregelen die beschreven zijn in de literatuur.

De enquêtes zijn afgenomen vóór het unieke zomerhoogwater van 2021. De gevolgen van dit 'nieuwe' en opeens zichtbare klimaateffecten hadden de meeste beheerders nog niet in de praktijk ervaren. De diepte-interviews zijn wel na de zomerhoogwaters afgenomen, maar ook toen hadden de beheerders nog slechts een beperkt inzicht over de gevolgen in hun dagelijkse praktijk. In een beperkte raadpleging zijn deze effecten alsnog in een later stadium toegevoegd aan het praktijkverhaal. De input van de beheerders is samengevat in hoofdstuk 5. Voor een overzicht van de enquêtevragen zie bijlage 3a.

De resultaten van bovenstaande aanpak brengen in beeld waar knelpunten en kansen liggen, op welke soorten en habitats de focus moet liggen en of er sprake is van verschuivende soortgemeenschappen. Dit vormt de basis voor het verder uitrollen van maatregelen zoals vormgegeven in de Programmatische Aanpak Grote Wateren (PAGW).

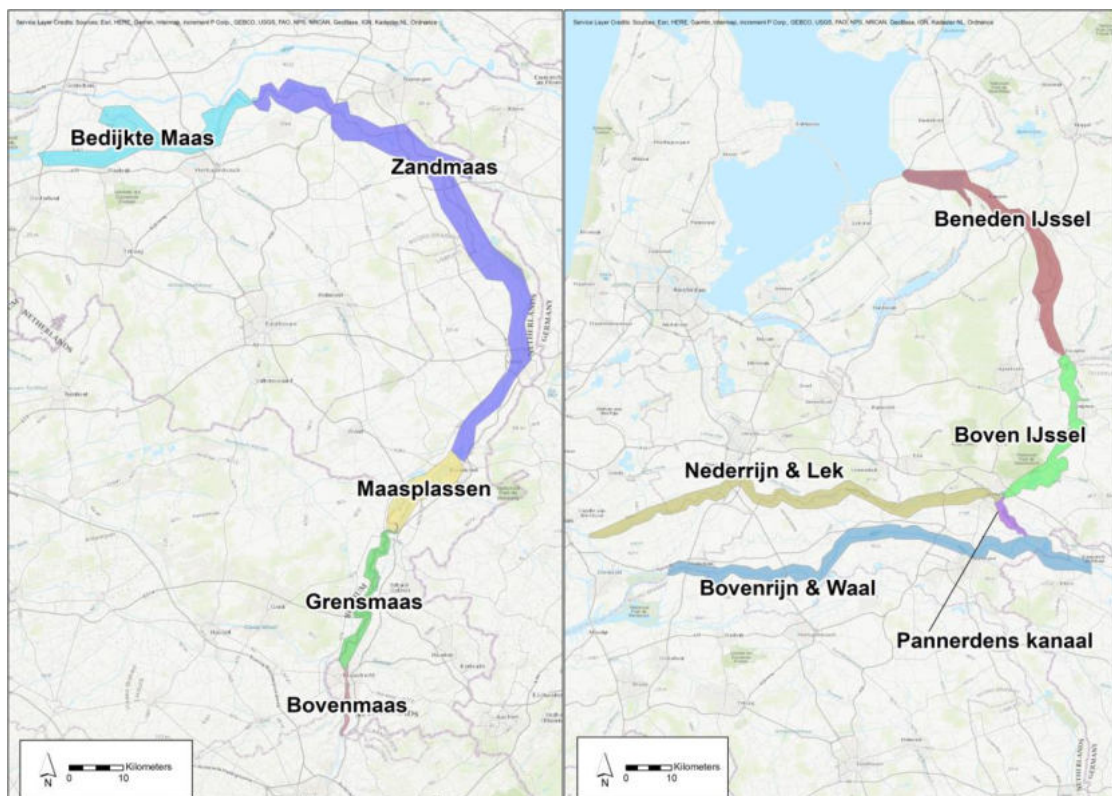
1.5 Afbakening

Als gevolg van klimaatverandering veranderen allerlei aspecten van het leefmilieu langs de rivier. We richten ons in deze studie voor het rivierengebied in eerste instantie op de invloed van dalende waterstanden, vervroegde droogval, vermindering van stroming en hogere temperaturen als gevolg van klimaatverandering voor de middellange termijn (2050). Ook het frequenter optreden van zomerinundaties is meegenomen bij de interpretatie van te verwachten effecten. Daarbij besteden we ook aandacht aan mogelijke gecombineerde effecten. De effecten op grondwater en kwel zijn kwalitatief meegenomen, omdat hier geen berekeningen voor beschikbaar zijn. Dit soort berekeningen vergen een gedetailleerd inzicht

in de bodemopbouw (die vaak onbekend is) en kennis over de invloed van grondwaterkwel versus rivierkwel. Dit detailniveau voert te ver voor deze studie. De effecten op geschiktheid van een standplaats op basis van bodemtype, nutriëntenbeschikbaarheid of beheer zijn in deze studie niet meegenomen. Er worden alleen kanseninschattingen gedaan op basis van de veranderende rivierinvloed als gevolg van klimaatverandering (in combinatie met opwarming).

Naast veranderende klimaatcondities heeft het Nederlandse rivierengebied te maken met insnijding van het zomerbed. Dit is vooral een probleem in de bovenlopen van de Rijntakken: hier daalt het zomerbed met gemiddeld ca. 2 cm per jaar (Van Geest *et al.*, 2020). Als gevolg hiervan daalt het waterpeil in het zomerbed ten opzichte van de aanliggende uiterwaarden, wat bijdraagt aan de verdroging. Omdat de riviernatuur te maken heeft met een gecombineerd effect van de bodemdaling en verdroging als gevolg van klimaatverandering (van Geest, 2020), hebben wij deze twee aspecten niet losgekoppeld in de interpretatie van de effecten. Voor de natuur maakt het niet uit waar de verdroging een gevolg van is en de mitigerende maatregelen voor dit effect liggen in dezelfde sfeer.

Deze studie is gericht op de Natura 2000 gebieden Rijntakken en de Maas (Figuur 1.1). Hier binnen vallen verschillende hotspot gebieden uit de PAGW: De Gelderse Poort, de IJssel-Vechtdelta en de Grensmaas (Van der Sluis *et al.*, 2020). De effecten van zeespiegelstijging (inclusief) verzilting, die in het benedenrivierengebied spelen, zijn in deze studie niet meegenomen, omdat de problematiek die daar speelt weer een verhaal op zich vormt wat buiten de scope en omvang van deze studie valt. De gebieden zijn gedeeltelijk wel meegenomen in de rivierkundige analyses, maar het klimaatverhaal is voor deze trajecten dus incompleet (zie Figuur 1.1). Er wordt wel gerefereerd aan de opstuwende werking van de zeespiegelstijging in de benedenlopen van de rivieren.



Figuur 1.1: Studiegebied.

Figure 1.1: Study area.

1.6 Leeswijzer

Deze studie betreft een kennismontage, bestaande uit een combinatie van literatuur- en bronnenonderzoek, hydrologische waterstandsberekeningen, interpretatie van meetreeksen en input van beheerders. De onderdelen zijn niet als aparte deelstudies gerapporteerd, maar worden per onderwerp beschreven om de samenhang en zeggingskracht te behouden. De studie vormt hiermee een interpretatie van bestaande kennis uit (inter)nationale bronnen in relatie tot klimaatverandering en ecologie in het rivierengebied, aangevuld met gegevens over verwachte veranderingen in waterstanden, afvoeren, temperatuur en verspreiding van kenmerkende soorten. Het literatuuronderzoek is grotendeels verwerkt in hoofdstuk 2, 3 en 4, waarbij in hoofdstuk 3 ook de hydrologische analyses zijn opgenomen. In hoofdstuk 4 zijn de verwachte klimaateffecten in het rivierengebied doorvertaald naar effecten op relevante soortgroepen en habitats. In hoofdstuk 5 zijn de resultaten van de enquête en interviews met de beheerders samengevat. In hoofdstuk 6 worden mitigerende maatregelen besproken en wordt ingezoomd op enkele voorbeeldgebieden. Tot slot worden in hoofdstuk 7 conclusies gegeven en aanbevelingen gedaan voor het verdere vervolg.

2 Klimatologische veranderingen langs de rivieren: wat is nu al zichtbaar?

2.1 Klimaateffecten in het rivierengebied

Een scala aan wetenschappelijke studies heeft inmiddels aangetoond dat door de mens uitgestoten broeikasgassen een grote bijdrage leveren aan de mondiale klimaatverandering zoals die nu waargenomen wordt waarbij sprake is van een sterke stijging van de gemiddelde wereldwijde temperatuur. Klimaatverandering voltrekt zich op wereldschaal, veranderingen in oceaan- en luchtstromingen, zeespiegelstijging en smeltende ijsmassa's zijn grote sturende variabelen. Wij merken deze effecten inmiddels al op lokale en regionale schaal: er treden steeds meer en heviger klimaatextremen op zoals droogte, hittegolven, neerslag, orkanen, overstromingen en het afsmelten van gletsjers. Het KNMI heeft voor Nederland de mogelijke effecten van klimaatverandering in beeld gebracht in de vorm van verschillende klimaatscenario's (KNMI, 2015). Deze klimaatscenario's vormen de basis voor onderzoek naar de effecten van klimaatverandering en adaptatie aan die verandering. Ze kunnen opgevat worden als een vertaling van de mondiale IPCC-scenario's naar de Nederlandse situatie en worden periodiek geüpdatet. In het 'Klimaatsignaal '21' geeft het KNMI aan dat de nieuwe IPCC-scenario's vooral een hogere zeespiegelstijging voorspellen. Medio 2023 zal het KNMI met nieuwe klimaatscenario's voor de Nederlandse situatie komen.

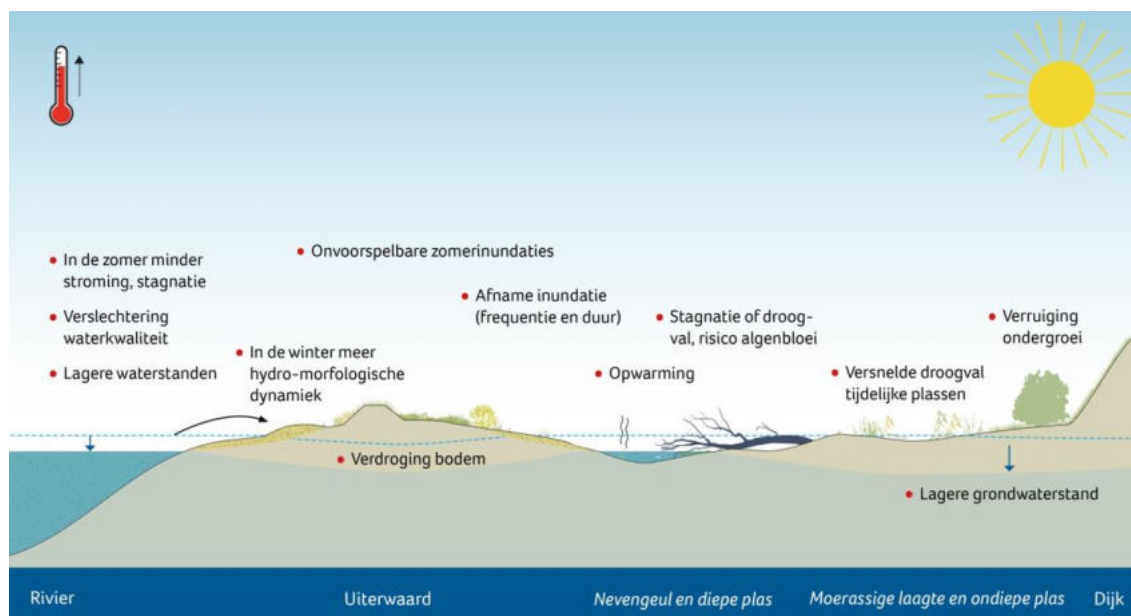
Voor de meeste KNMI-klimaatscenario's wordt een toename verwacht van zowel de winter- als zomertemperatuur, ook de hoeveelheid zoninstraling neemt toe. In de winter wordt daarbij meer neerslag verwacht terwijl de hoeveelheid neerslag in de zomer zal dalen. Tegelijkertijd wordt verwacht dat intensiteit en frequentie van extreme regen- en onweersbuien in de zomer toeneemt. Daarnaast zal ook de zeespiegel steeds verder (en sneller) stijgen.

Voor het landschapstype dat in dit onderzoek wordt belicht, grote rivieren en aangrenzende uiterwaarden, voltrekken de gevolgen van klimaatverandering zich op verschillende niveaus. Verandering van verschillende variabelen worden als aannemelijk beschouwd (zie Figuur 2.1):

- Hogere zoninstraling;
- Hogere winter – en zomertemperatuur van zowel lucht als water;
- Lagere kans op ijsvorming in stilstaande wateren in uiterwaarden;
- Vervroeging en verlenging van het groeiseizoen (door hogere temperaturen in het voor- en najaar en zoninstraling);
- Frequentere inundaties in de winter door meer neerslag;
- Door het eerder smelten van sneeuw in landen om ons heen, treden hoogwaters vroeger in het jaar op, overstromingen later in het voorjaar worden zeldzamer;
- Grotere kans op inundaties in de zomer door extreme neerslag;
- Frequentere en langdurige droogte in de zomer zal vaker en vroegtijdig tot droogval van ondiepere uiterwaardwateren leiden;
- Droogte in hoger gelegen gronden op afstand van de rivier;
- Zeespiegelstijging zal resulteren tot verdere indringing van zout of brak water in de benedenloop van rivieren. Bovendien zal het rivierpeil in de benedenlopen hierdoor veranderen.

Autonome ontwikkeling rivierbodem

In de Nederlandse grote rivieren zijn nog andere processen relevant, die los staan van klimaatverandering, maar wel leiden tot autonome veranderingen die de effecten van klimaatverandering kunnen versterken. Belangrijkste voorbeeld is de ligging van de rivierbodem. Door de sterke regulering en bedijking en het aan banden leggen van de rivier door kribvakken, van de Rijntakken en Maas, hebben grote delen van de bovenstroomse rivierbodem zich sterk in het landschap ingesleten ten opzichte van de aangrenzende uiterwaarden (Reeze *et al.*, 2017, Ylla Arbos *et al.*, 2021). Bij gelijkblijvende afvoeren leidt dit tot verdroging van de uiterwaarden. Op andere plaatsen in veelal stroomafwaartse riviertrajecten is de rivierbodem door sedimenttransport juist weer hoger te komen liggen. Hetzelfde geldt voor de meeste uiterwaarden; overstromingen zorgen doorgaans voor het neerslaan van sediment waardoor veel rivieruiterwaarden langzaam opslibben en steeds hoger komen te liggen ten opzichte van de inslijtende rivierbodem. Deze bodemveranderingen hebben vanzelfsprekend grote effecten op waterstanden en inundaties in het riviereengebied en treden gelijktijdig op met processen veroorzaakt door klimaatverandering. Het natuurlijke inundatie proces met het daarbij afzetten van bodemmateriaal (klei, zand etc.) en het 'wandelen' van de rivier door ons landschap is in de loop der eeuwen steeds verder verstoord geraakt, net als de connectie met de (nu binnendijks gelegen delen van de) vloedvlakte. Daarnaast is het gehele veranderde landgebruik van invloed op de effecten van klimaatverandering in het riviereengebied (ruilverkaveling, landbouwonwatering, verstedelijking, etc.).



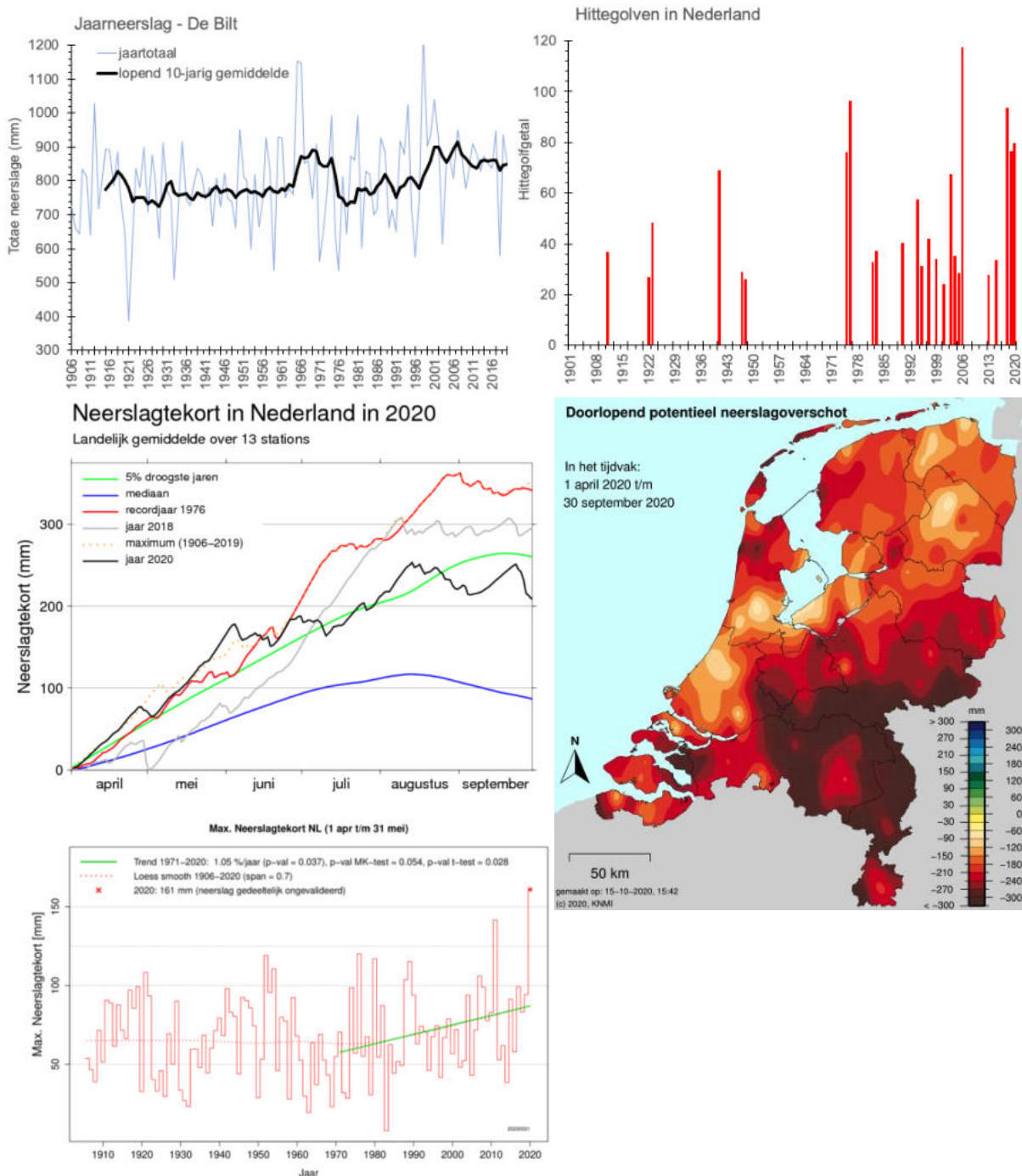
Figuur 2.1: Schematische weergave van enkele processen langs de rivieren die beïnvloed kunnen worden door klimaatverandering.

Figure 2.1: Schematization of some processes along rivers that can be influenced by climate change.

2.2 Effecten op neerslag en afvoeren van Rijn en Maas

Neerslag en droogte

Verschillende terrestrische en ondiepe aquatische habitats in rivieruiterwaarden worden sterk beïnvloed door lokale neerslag en verdamping. Janssen *et al.* (2020) beschrijft de droogteproblematiek zoals die zich in de recente jaren in diverse Nederlandse ecosystemen voordoet. Deze droogteproblematiek is niet zo zeer te wijten aan een verminderde hoeveel neerslag, die neemt de laatste decennia niet stelselmatig af (Figuur 2.2). Het is vooral het optreden van aaneengesloten perioden zonder neerslag in combinatie met hittegolven die in de laatste jaren vaak tot (extreme) neerslagtekorten hebben geleiden (Figuur 2.2). Sinds eind jaren 70 zien we dat met name in het voorjaar het neerslagtekort toeneemt (<https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/oude-bomen-werpen-licht-op-droogte>). De Nederlandse rivieruiterwaarden liggen daarbij in gebieden die relatief droogtegevoelig zijn (Figuur 2.2).



Figuur 2.2: Boven: jaarneerslag in De Bilt voor de periode 1906 – 2020 (links) en het optreden van hittegolven in Nederland sinds 1901 (rechts, data KNMI). Midden: 2018 en 2020 waren twee recente droge jaren (data KNMI) met een groot neerslagtekort aan het einde van de zomer (links) dat zich vooral deed gelden in zuidoost Nederland (rechts). Onder: In Nederland is een trend zichtbaar van toenemend neerslagtekort in het voorjaar sinds eind jaren '70 (data KNMI).

Figure 2.2: Above: yearly precipitation in the Bilt from 1906 – 2020 (left) and the occurrence of heatwaves in the Netherlands since 1901 (right, data KNMI). Middle: 2018 and 2020 where two recent dry years (data KNMI) with a large precipitation deficit at the end of the summer (left) that was most prominent in the southeast of the Netherlands. Below: In the Netherlands the precipitation deficit in spring tends to increase from the late seventies on (data KNMI).

Veranderende rivierafvoeren

Behalve effecten van lokale temperatuur en neerslag, is natuur in rivieruiterwaarden bovenal onderhevig aan veranderingen in de rivierafvoer die leiden tot veranderingen in inundatieduur- en periode. De afvoer van de Rijn en Maas zoals die aan de Nederlandse grens binnenkomt, wordt bepaald door het gehele rivierstroomgebied. Ten opzichte van de jaren '70-'80 worden de laatste decennia voor de stroomgebieden van Rijn en Maas in de winter hogere piekafvoeren waargenomen terwijl in de zomer vaker sprake is van lage afvoeren (De Wit et al., 2007; Hurkmans et al., 2010; Kwadijk et al., 2016). Hoewel deze veranderingen nog niet significant zijn, is dit wel de verwachte ontwikkeling voor de toekomst.

De afvoermetingen in Nederland laten vooral sinds 2010 een duidelijke afname van de gemiddelde rivierafvoer in het voorjaar zien (april), zowel voor de Maas en Rijn (Figuur 2.3, maandafvoeren). In de winter (januari) blijft de gemiddelde afvoer relatief hoog (Figuur 2.3, maandafvoeren). In de zomer is voor de maand juli een meer geleidelijke afname van de rivierafvoer zichtbaar die zich al voordoet vanaf ca. 1990; deze is voor de Rijn duidelijker dan voor de Maas (Figuur 2.3, maandafvoeren). Dit patroon is ook zichtbaar op basis van dagafvoeren. De dagafvoeren van de maanden maart, april en mei (trends en extremen) nemen steeds meer af tussen de periodes 1970-1989, 1990 – 2009 en 2010-2020 (Figuur 2.3, dagafvoeren). In de winter (januari) zijn de dagafvoeren van de periodes 1990 – 2009 en 2010-2020 relatief hoog, de trend is voor beide periodes zelfs hoger dan voor de periode 1970-1989. In de Rijn is duidelijk zichtbaar dat de dagafvoeren in de maand juli in de periodes 1990 – 2009 en 2010-2020 zijn afgenomen ten opzichte van de periode 1970-1989.



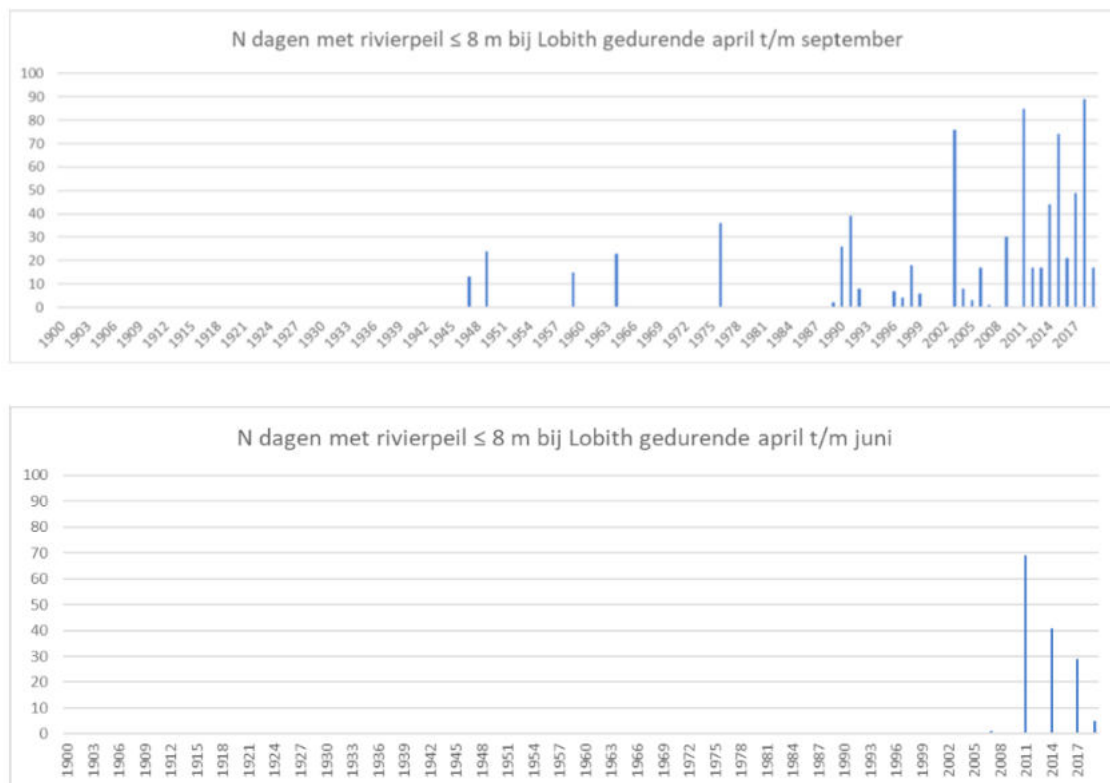
Figuur 2.3: Boven: Lopend 10-jarig gemiddelde maandaafvoer in januari, april en juli van Rijn (links) en Maas (rechts) tussen 1970 en 2020 (data RWS). Midden en onder: dagafvoeren (maximale dagafvoer – midden; gemiddelde trend - onder) gecentreerd per maand voor de periode 1970 – 1989, 1990- 2009 en 2010 – 2020 voor Rijn (links) en Maas (rechts); bolletjes geven maximale dagafvoeren aan, lijnen geven de trend per periode weer (data RWS).

Figure 2.3: Above: 10-year monthly discharge in January, April and July of the rivers Rhine (left) and Meuse (right) between 1970 and 2020 (data RWS). Centre and below: daily discharge (maximum day discharge – center; mean trend – below) centered per month for the periods 1970-1989, 1990-2009 and 2020-2020 for the rivers Rhine (left) and Meuse (right); bullets represent discharges, lines show the trend per period (data RWS).

Het achterliggende mechanisme van veranderingen is deels klimatologisch van aard waarbij hogere wintertemperaturen resulteren in meer neerslag in de vorm van regen terwijl in de zomer sprake is van langdurige droogte. In de Rijn lijkt de afvoerpiek ten gevolge van smeltende sneeuw geleidelijk vroeger in het voorjaar op te treden (Hurkmans *et al.*, 2010) waardoor de afvoer in het voorjaar lager afneemt. Ook deze ontwikkeling is nog niet

significant aangetoond, maar wel de verwachte tendens voor de toekomst. Een recente studie van Deltares (Figuur 2.4) laat zien dat het aantal dagen met een rivierpeil lager dan 8 meter in de loop van voorgaande eeuw duidelijk is toegenomen, met name in de herfst. Een geheel nieuwe trend is het optreden van zeer lage rivierpeilen vanaf de start van het groeiseizoen. Tot voor kort was de waterstand in de Rijn bij Lobith nooit lager dan 8 meter bij Lobith, maar vanaf 2011 is dit aantal dagen in verschillende jaren fors toegenomen (Figuur 2.4).

In het Nederlandse deel van de Rijntakken wordt het effect van de lagere afvoeren op waterstanden versterkt door het steeds dieper insnijden van de rivierbodem in het stroombed (Reeze *et al.*, 2017).



Figuur 2.4: Aantal dagen met waterpeil $\leq 8,00$ meter in de Bovenrijn bij Lobith gedurende (A) april t/m juni (voorjaar), en (B) april t/m september (gehele groeiseizoen) (van Geest *et al.*, 2020).

Figure 2.4: Number of days with a water level $\leq 8,00$ meter in the Bovenrijn at Lobith during (A) April up to and including June (spring), and (B) April up to and including September (whole growing season) (van Geest *et al.*, 2020).

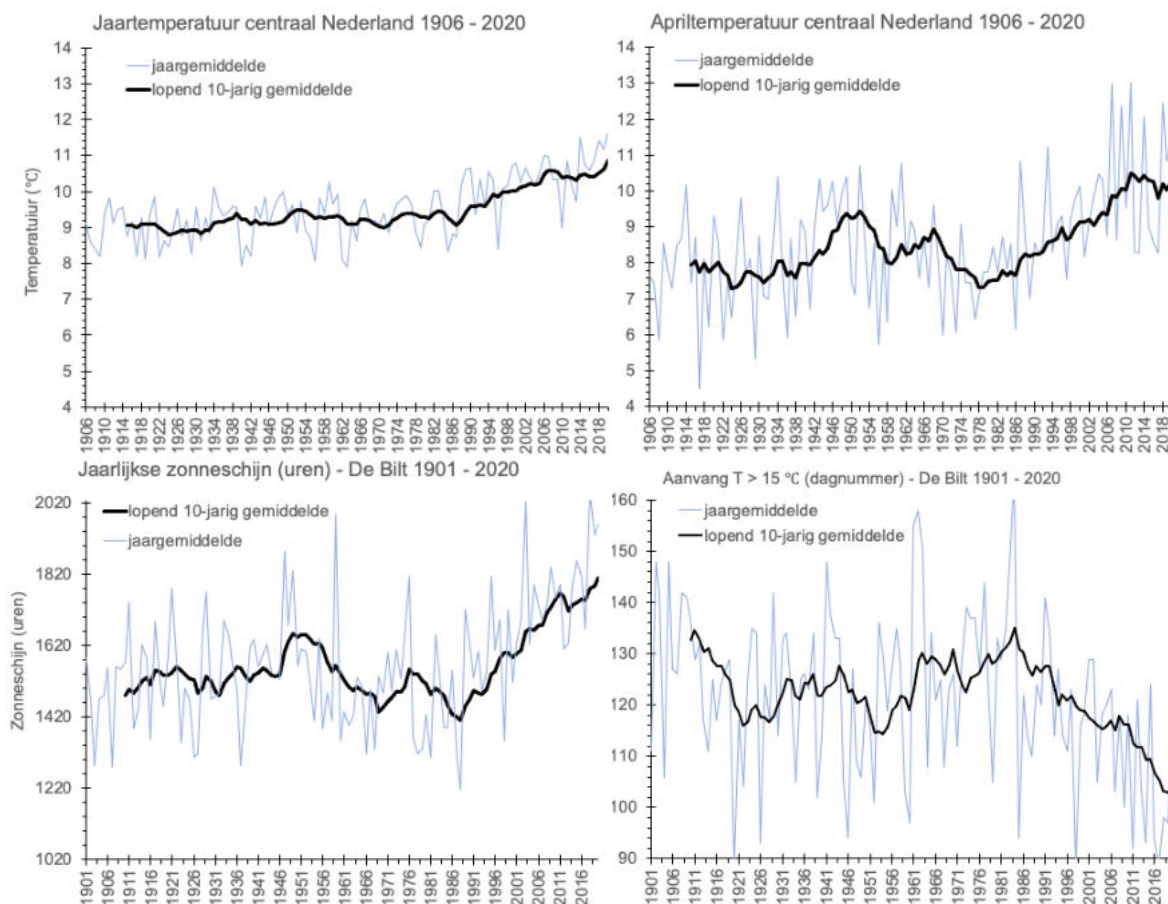
Een aspect van klimaatverandering is ook dat zomerse hoosbuien vaker op gaan treden. In het algemeen heeft dit vooral lokale effecten, maar in de zomer van 2021 werd duidelijk dat als zulke omstandigheden zich in een groot gedeelte van het stroomgebied tegelijk voordoen, dit wel degelijk ook langs de grote rivieren merkbaar kan zijn. Voor de Maas, als relatief kleine rivier, zijn wat dit betreft de effecten ingrijpender dan voor de Rijn, met zijn ruim viermaal grotere afvoercapaciteit.

2.3 Temperatuur van lucht en water

Een van de grote gevolgen van klimaatverandering is opwarming van lucht en water. Dit proces is nu al bezig en volstrekt zich gestaag gedurende de laatste decennia. Op wereldschaal heeft dit effect op de temperatuur van het rivierwater. Dit komt door een gecombineerd effect van lagere afvoeren in de zomer en toenemende energie (instraling, luchttemperatuur) vanuit de atmosfeer (Van Vliet *et al.*, 2013a). Ook in de Nederlandse rivieren is deze ontwikkeling al merkbaar. De recente ontwikkelingen geven een indruk van de aard van veranderingen zoals die zich de komende decennia zullen voordoen.

Veranderingen in luchttemperatuur en zonneshijn

De luchttemperatuur in centraal Nederland is vooral vanaf de jaren '90 van de 20^e eeuw toegenomen waarbij de gemiddelde jaarlijkse luchttemperatuur in 2020 ca. 1 °C hoger is dan in 1990 (Figuur 2.5). De toename van temperatuur is nog groter wanneer naar maandtemperaturen gekeken wordt. De gemiddelde jaarlijkse luchttemperatuur in april 2020 was ca. 2,8 °C hoger dan in april 1990 (Figuur 2.5). Het wordt hiermee steeds vroeger in het voorjaar warmer. De dag dat in het voorjaar de luchttemperatuur 15 °C bereikt, valt in 2020 twee weken eerder (half april) ten opzichte van 1990 (eind april, (Figuur 2.5). Ook de totale jaarlijkse zonneshijn neemt (door de verbeterde luchtkwaliteit) gestaag toe sinds 1990, in De Bilt was er in 2020 21% meer zonneshijn dan in 1990 (Figuur 2.5). Natuur in rivieruiterwaarden wordt dus blootgesteld aan hogere luchttemperaturen en meer zonneshijn waarbij ook de start van het groeiseizoen aanmerkelijk eerder begint dan voorheen. Dit zal in de toekomst nog verder toenemen, de mondiale toename is momenteel ca. 0,5 °C terwijl de mondiale voorspelling 1,5 - 3 °C is.



Figuur 2.5: Boven: gemiddelde jaartemperatuur (links) en april temperatuur in centraal Nederland tussen 1906 en 2020 (rechts) (data 6 weerstations, KNMI). Onder: jaarlijkse zonneshij (uren zon, links) en aanvang eerste dag (dagnummer) dat de temperatuur boven de 15 °C komt (rechts) (data weerstation De Bilt, KNMI).

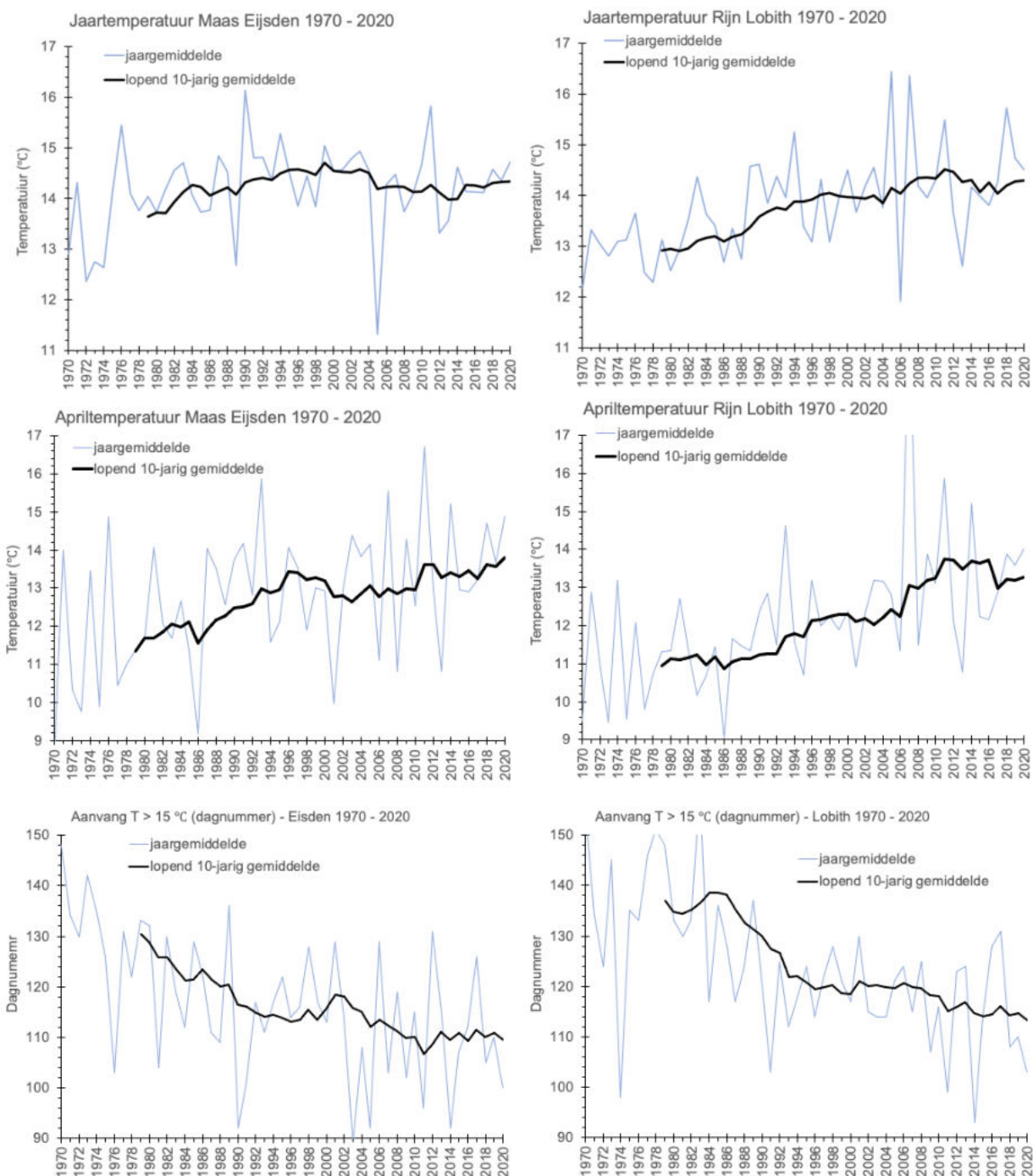
Figure 2.5: Above: average year temperature (left) and temperature in April in the center of the Netherlands between 1906 - 2020 (right) (data of 6 weather stations, KNMI). Below: yearly sunshine (sun hours, left) and start of the first day (day number) that the temperature exceeds 15 °C (right) (data weather station De Bilt, KNMI).

Veranderingen in temperatuur van rivierwater

De watertemperatuur van de grote rivieren Rijn en Maas ontwikkelt zich anders dan de luchttemperatuur in een opwarmend klimaat. Dit komt met name doordat ook koelwaterlozingen een sterke invloed hebben op de watertemperatuur. De gemiddelde jaartemperatuur van de Rijn neemt de laatste decennia licht toe, in 2020 was deze 0,7 °C hoger dan in 1990 (Figuur 2.6). De toename van de gemiddelde apriltemperatuur in de Rijn was echter sterker, in 2020 was deze 1,6 °C hoger dan in 1990. Voor de Maas blijft de jaartemperatuur relatief stabiel. Er is zelfs sprake van een lichte daling van de temperatuur, in 2020 was de temperatuur 1,4 °C lager dan in 1990 (Figuur 2.6). Waarschijnlijk speelt een vermindering van het lozen van koelwater hierbij een rol (CLO, 2020, Noordhuis *et al.*, 2021). Ook langs de Rijn lijkt dit verschijnsel zich inmiddels voor te doen (Figuur 2.6). Leuven *et al.* (2011) schatten in dat 1/3 van de opwarming van het rivierwater aan klimaatverandering te wijten is en 2/3 aan koelwaterlozingen.

Voor de Maas is net zoals voor de Rijn wel sprake van een toename van de gemiddelde apriltemperatuur. Deze was in april 2020 1,1 °C hoger dan in 1990 (Figuur 2.6). Ook blijkt het rivierwater van zowel Rijn en Maas eerder in het voorjaar op te warmen. Zowel in de Maas als in de Rijn vervroegt het bereiken van de 15 °C grens van eind april naar half april

(Figuur 2.6). Aquatische natuur in de rivier wordt dus blootgesteld aan hogere watertemperaturen, vooral in voorjaar. De temperatuur van rivierwater wordt hierbij ook vroeger in het voorjaar warm. De opwarming van rivierwater lijkt echter minder snel te verlopen in vergelijking met toename van de Nederlandse luchttemperaturen. Dit komt grotendeels door het tegengestelde effect van verminderde koelwaterlozingen (zie boven). In de toekomst zal dit voordeel afnemen en zullen de watertemperaturen mogelijk meer gelijke tred houden met de mondiale opwarming van de lucht.



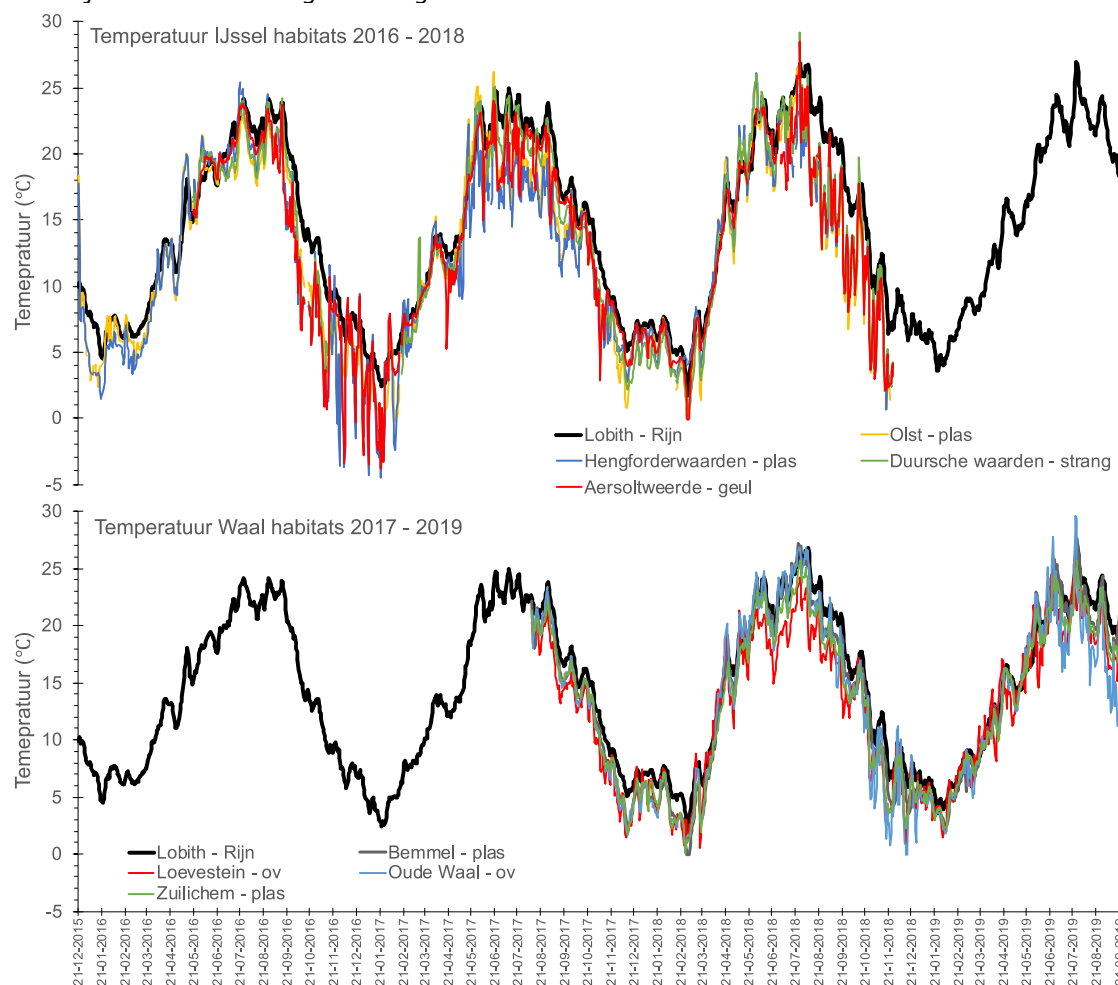
Figuur 2.6: Boven: gemiddelde jaartemperatuur van het water van de Maas (links) en Rijn (rechts) tussen 1970 en 2020 (data RWS). Midden: gemiddelde apriltemperatuur van de Maas (links) en Rijn (rechts). Onder: aanvang eerst dag (dagnummer) dat de temperatuur boven de 15 °C komt in de Maas (links) en Rijn (rechts).

Figure 2.6: Above: mean year water temperature of the rivers Meuse (left) and Rhine (right) between 1970 – 2020 (data RWS). Middle: mean April temperature of the rivers Meuse (left) and Rhine (right). Below: start of the first day (day number) that the temperature exceeds 15 °C (right). of the rivers Meuse (left) and Rhine (right).

2.4 Effecten op watertemperatuur in rivierhabitats

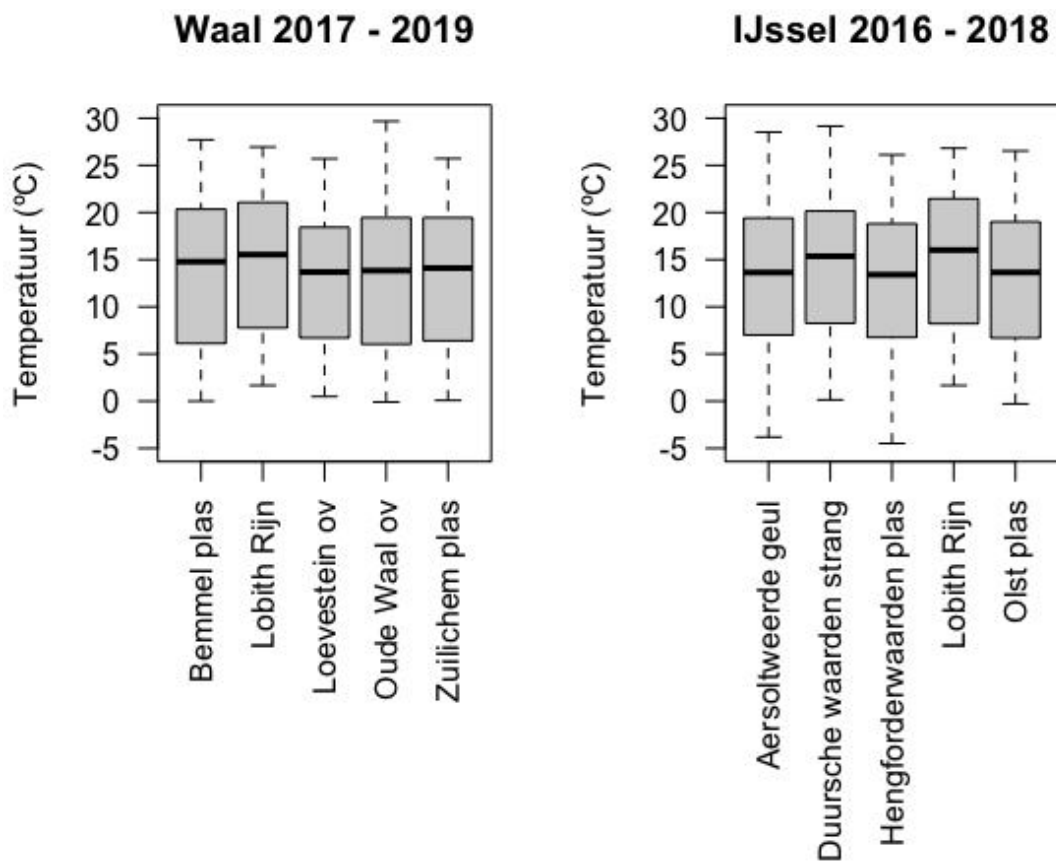
Watertemperaturen in uiterwaardwateren

In bovenstaande paragraaf is de ontwikkeling van de gemiddelde watertemperatuur in de hoofdstroom van de van de Maas en Rijn weergegeven waarbij een aanmerkelijke stijging van de voorjaarstemperatuur zichtbaar is. In Nederlandse rivieruiterwaarden komen uiteenlopende aquatische habitattypes voor. Hoewel er weinig meetreeksen van de ontwikkeling van watertemperaturen van deze rivierhabitats beschikbaar zijn, is duidelijk zichtbaar dat het temperatuurverloop over de seizoenen sterk varieert tussen verschillende watertypen en tussen locaties (Figuur 2.7). Ondiepe wateren (tot max. 3 – 4 m diepte) warmen bijvoorbeeld sneller op terwijl het optreden van lokale kwel ondiepe opwarmende water juist voor afkoeling kan zorgen.



Figuur 2.7: Gemiddelde dagtemperaturen gedurende meerdere meetjaren in op vaste meetpunten in ondiepe (< 4 m diepte) aquatische habitats langs de IJssel (boven, 2016 t/m 2018, plassen in de Hengforderwaarden en Olst, strang in de Duursche waarden, geul bij Aersoltweerde) en de Waal (onder, 2017 t/m 2019; plassen bij Bemmel en Zuilichem, overstromingsvlakten Oude Waal en Loevestein). In beide figuren is de temperatuur van de Rijn bij Lobith als referentie weergegeven (data RWS; Dorenbosch et al., 2020; Van Iersel, 2020).

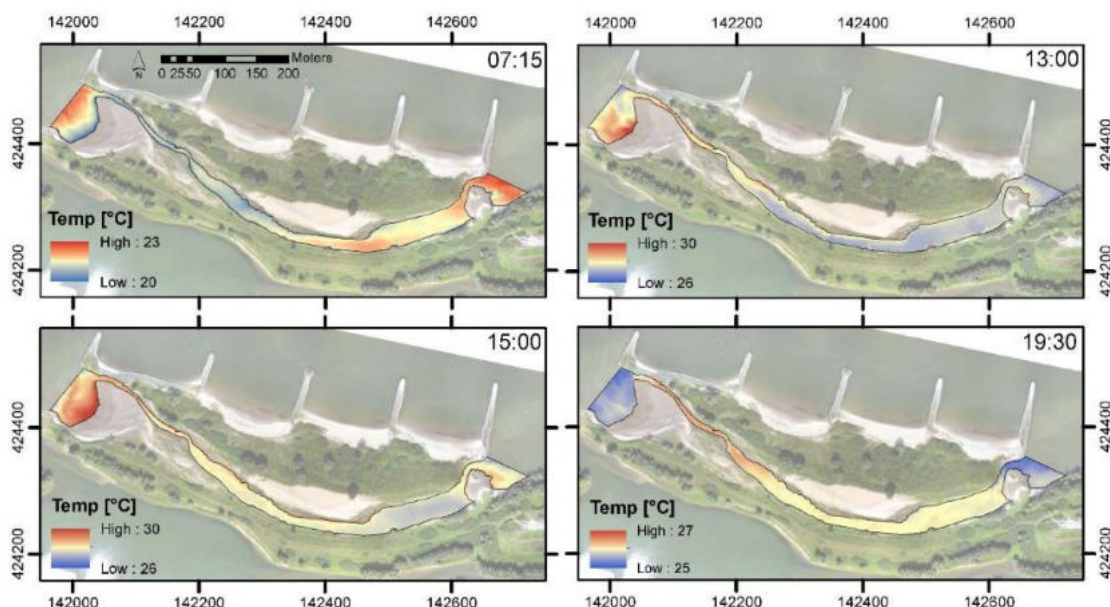
Figure 2.7: Mean day temperatures during several years of measurements on fixed points in different shallow (< 4 m depth) aquatic habitats along the river IJssel (above, 2016 to 2018, Hengforderwaarden, Olst, Duursche waarden and Aersoltweerde) and the river Waal (below, 2017 to 2019; Bemmel, Zuilichem, Oude Waal and Loevestein). In both figures the water temperature of the river Rhine is used as reference (data RWS; Dorenbosch et al., 2020; Van Iersel, 2020).



Figuur 2.8: Boxplots van extremen en gemiddelde dagtemperaturen van ondiepe (< 4 m diepte) aquatische habitats langs de Waal en IJssel.

Figure 2.8: Boxplots of extreme and mean day temperatures in shallow (< 4 m depth) aquatic habits along the rivers Waal and IJssel.

De watertemperatuur in uiterwaardwateren heeft een iets bredere spreiding dan de temperatuur van de hoofdstroom van de rivier (Figuur 2.8). Mogelijk speelt menging door scheepvaartbewegingen hierbij een rol. Het rivierwater vormt bovendien een groter volume dat langzamer opwarmt of afkoelt. Dit is bijvoorbeeld te zien in de temperatuurmetingen in de nevengeul bij Gameren, waar Collas *et al.* (2019) lieten zien dat vroeg in de ochtend op een warme zomerdag de temperatuur van het rivierwater hoger was dan in de nevengeul, terwijl dit aan het eind van de dag andersom was (Figuur 2.9)



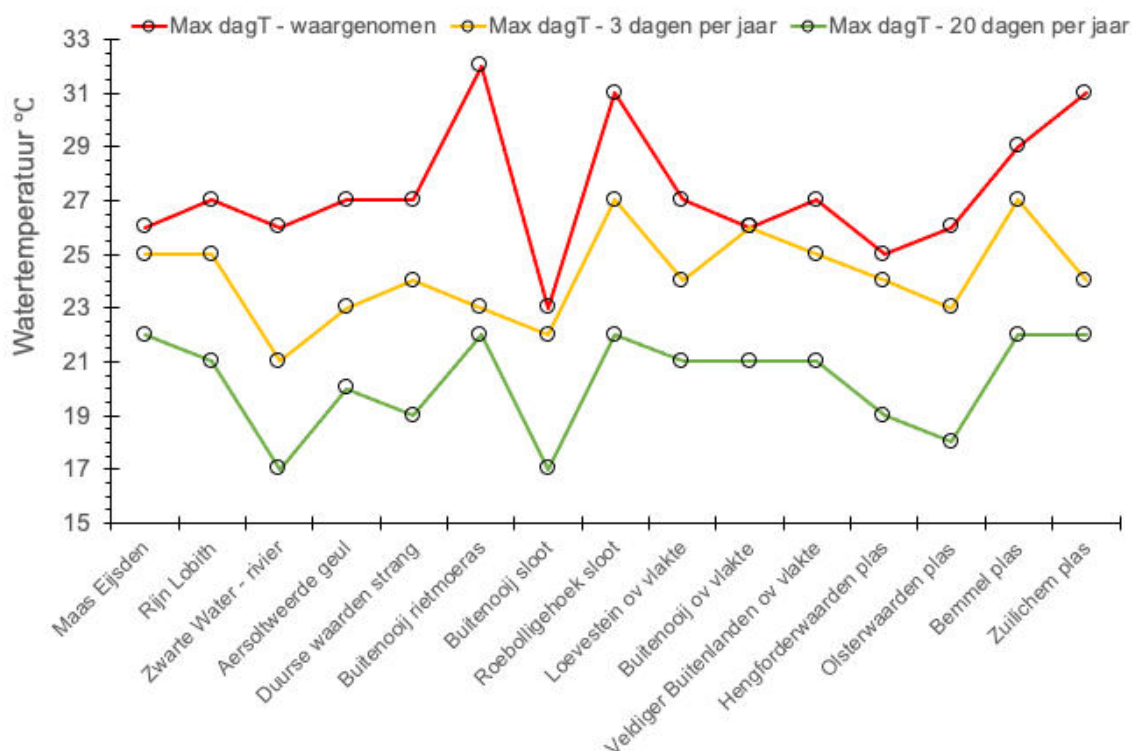
Figuur 2.9: Temperatuur kaarten van een nevengeul in de uiterwaard bij Gameren langs de Waal verkregen met uncorrected thermal imagery (°C UAV) in de ochtend (07:15), middag (13:00 en 15:00) en avond (19:30). Let op de kleurschalen verschillen tussen de afzonderlijke kaarten (Collas et al., 2019).

Figure 2.9: Temperature maps of the side channel in the floodplain of the river derived from uncorrected thermal imagery (°C, UAV) during the morning (07:15), mid-day (13:00 and 15:00) and evening (19:30). Note the different color scales across the individual maps (Collas et al., 2019).

Maximale dagtemperaturen van wateren

Voor aquatische fauna is vooral van belang hoe hoog de temperatuur in verschillende watertypen in het rivierengebied kan worden. Een analyse van beschikbare meetreeksen van continue watertemperatuurloggers van maximale gemiddelde dagtemperaturen (de gemiddelde temperatuur tussen zonsopkomst en -ondergang) geeft aan dat afhankelijk van het watertype, gemiddelde dagmaxima bereikt kunnen worden tussen 23 en 32 °C (Figuur 2.10). Ondiepe zon beschenen wateren zoals sloten, moerassen en uiterwaardplassen behoren tot de meest warme wateren in de uiterwaard. Deze hoge gemiddelde dagtemperaturen zijn uitzonderlijk en komen hooguit 1 dag per jaar voor. Hogere maximale gemiddelde dagtemperaturen die jaarlijks meerdere dagen voorkomen liggen tussen 23 en 25 °C (gemiddeld 3 dagen per jaar) en 18 en 22 °C (gemiddeld 20 dagen per jaar). De hoofdstroom van de rivier kan hierbij ook behoorlijk warm worden (maximale gemiddelde dagtemperaturen van 25 °C gedurende 3 dagen per jaar).

Opgemerkt moet worden dat er weinig consistente meetreeksen voorhanden zijn die een goede gewogen inschatting kan geven van het temperatuurverloop in diverse watertypen in uiterwaarden. Gevalideerde meetreeksen zijn alleen beschikbaar voor specifieke periodes in een beperkt aantal wateren. Alleen de hoofdstroom van de Rijn en Maas wordt continue gemonitord in Lobith en Eijsden. Ook blijkt dat wanneer watertemperaturen op uur-basis vergeleken worden, in ondiepe, onbeschaduwde geïsoleerde uiterwaardplassen extreem hoge watertemperaturen kunnen voorkomen die boven de 35 °C uitkomen (data uit Dorenbosch et al., 2020). Deze hoge watertemperaturen doen zich echter maar heel lokaal voor en houden over het algemeen heel kort aan (tot maximaal enkele uren).



Figuur 2.10: Overzicht van maximale gemiddelde dagtemperaturen (hoogst waargenomen gemiddelde dagtemperaturen en maximale gemiddelde dagtemperaturen die 3 en 20 dagen per jaar voorkomen) voor verschillende locaties in het rivierengebied op basis van meetreeksen met continue watertemperatuurloggers (data RWS; Dorenbosch et al., 2020; Van Iersel, 2020).

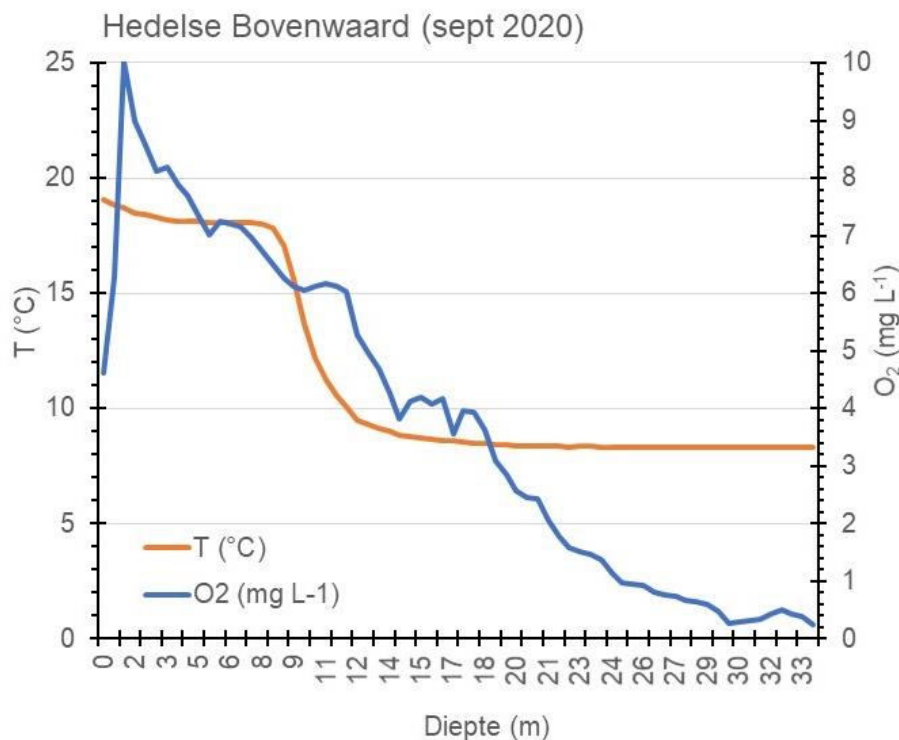
Figure 2.10: Overview of maximum mean day temperatures (highest recorded day temperatures and maximum day temperatures occurring during 3 and 20 days per year) bases on datasets for different locations along Dutch rivers (data RWS; Dorenbosch et al., 2020; Van Iersel, 2020).

Watertemperaturen in buitendijkse diepe plassen

In de Nederlandse rivieruiterwaarden bevinden zich een groot aantal watertypen die als diep zijn geclassificeerd, onder andere diepe uiterwaardplassen. Deze diepe plassen zijn vaak ontstaan ten gevolge van grind- en zandwinning en zijn vaak meer dan 15 m diep. Een recent OBN-onderzoek heeft aangetoond dat deze buitendijkse diepe plassen gestratificeerd kunnen zijn op vergelijkbare wijze als binnendijkse diepe plassen (Verstijnen *et al.*, 2022, Figuur 2.7). Door de grote diepte ontstaan er in de zomer over het dieptegradiënt waterlagen met verschillende temperaturen. De bovenste lagen warmen in het voorjaar en de zomer sterk op en hebben hoge watertemperaturen, de onderste lagen blijven echter (zeer) koud en mengen niet met bovenliggende warmere lagen. Dit geeft in de zomer karakteristieke temperatuurprofielen met 'spronglagen'. De watertemperatuur neemt hierbij scherp af met toenemende diepte. Omdat er nauwelijks watermenging is tussen de spronglagen daalt ook de zuurstofconcentratie van de diepere koude lagen. Door afbraakprocessen kan de diepste laag zuurstofarm of zelfs zuurstofloos worden. Verstijnen *et al.* (2022) laat echter ook zien dat er net boven de diepe zuurstofarme laag, tussen de 9 en 23 m, sprake is van een relatief koele laag die nog wel hogere zuurstofgehalten heeft (Figuur

2.11). In tegenstelling tot andere watertypen in rivieruiterwaarden kenmerken buitendijkse diepe plassen zich dus door stratificatie waarbij in de zomer de bovenste, ondiepe laag sterk opwarmt terwijl de meest diepe laag koud blijft en zuurstofarm is. Daartussen bevinden zich echter relatief koude lagen die wel zuurstofrijk zijn en biologische activiteit van fauna toestaan. Diepe plassen zijn het enige buitendijkse watertype die deze bijzondere temperatuur zonering in de zomer vertonen.

In de winter is deze temperatuurzonering niet aanwezig, de lagen in diepe plassen mengen dan door elkaar. Door het grote watervolume blijft de watertemperatuur in de diepe plas in de winter relatief constant. Ondiepe plassen hebben daarentegen een variabelere wintertemperatuur waarbij er gedurende de winter sterk afkoeling en opwarming plaats kan vinden.



Figuur 2.11: Temperatuurstratificatie van een buitendijkse diepe plas (Hedelse Bovenwaard – Maas) in de nazomer van 2020. Aan de oppervlakte is de temperatuur en het zuurstofgehalte hoog, op diepte juist laag. Tussen 9 en 12 m diepte ligt een zone die koel water bevat en tegelijkertijd nog voldoende zuurstof heeft voor biologische activiteit (data Verstijnen et al., 2022).

Figure 2.11: Temperature stratification in a deep pit along the major bed of the river Meuse (Hedelse Bovenwaard) in the late summer of 2020. Near the surface the water temperature and the oxygen concentration are high, deeper below the surface they are low. Between 9 and 12 m depth there is a zone with cool water and with a high enough oxygen level to accommodate biological activity (data Verstijnen et al., 2022).

2.5 Effecten op grondwater en kwel

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 en enigszins gedempt. Tijdens lage 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 en het peil van het aangrenzende (binnendijkse) gebied. In gebieden met een hooggelegen achterland (zoals de Maasterrassen, Veluwe of Utrechtse heuvelrug) kan ook regionale kwel een rol spelen. Dit soort effecten zijn in deze studie kwalitatief bekeken (zie paragraaf 1.5). Vanuit praktisch oogpunt heeft Van Geest (2020) aangenomen dat het grondwaterpeil in het groeiseizoen dicht bij de rivier min of meer gelijk is aan het rivierpeil. Op grotere afstand van de rivier gaat het binnendijkse grondwaterpeil echter een steeds grotere rol spelen in de waterhuishouding van de uiterwaarden. In veel binnendijkse gebieden wordt in natte perioden (winter) actief water afgevoerd en in droge perioden (zomer) juist aangevoerd (peilbeheersing voor landbouw). Daardoor zijn de binnendijkse peilfluctuaties veel kleiner dan die van het rivierpeil en zal de grondwaterstand in de uiterwaarden minder fluctueren op grotere afstand van de rivier (Van Geest, 2020).

In de praktijk speelt ook de meniscus (bol bij dalend rivierpeil, hol bij stijgend waterpeil) nog een rol. Bovendien zijn er 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 uitpakt dan op basis van het rivierpeil verwacht wordt. Dit komt echter alleen voor op plaatsen waar de riviersystemen grenzen aan hoger gelegen gronden zoals bijvoorbeeld het Veluwemassief (Aggenbach *et al.*, 2007). Ook aan de voet van de Grebbeberg treedt kwelwater uit, maar als gevolg van grondwaterwinning en aanleg van een diepe zandwinplas is de hoeveelheid kwel hier sterk afgenomen in de laatste decennia (Feijen, 2011).

Het verschil in vertraging tussen klei- en zandbodems in uiterwaarden langs de Midden-Waal ligt in de orde van enkele weken, waarbij kleibodems meer vertragen dan zandbodems (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 veel sneller volgen, vanwege de grotere doorlaatbaarheid van de zand- en grindbodems langs deze riviertrajecten. Deze gebieden zijn dus gevoeliger voor verdroging bij een lager rivierpeil.

Een specifieke situatie vormen eenzijdig aangetakte nevengeulen. Het waterpeil in deze geulen is in principe overal gelijk aan het peil van de rivier op de plek van aantakking. Het rivierpeil loopt echter op in bovenstroomse richting; de mate waarin is afhankelijk van de afvoer (en stroming). Hierdoor is er dus een peilverschil tussen de rivier en de parallel daaraan lopende nevengeul, dat groter wordt naarmate de nevengeul langer is. Bij een voldoende doorlatende bodem ontstaat hierdoor een kwelstroom van rivier naar nevengeul. Ondanks dat het om lokale kwel gaat, heeft deze kwelstroom vaak een positieve invloed op de waterkwaliteit van de nevengeul omdat slib en nutriënten in de rivier achterblijven en ijzer in de bodem wordt opgelost. Door klimaatverandering worden de rivierafvoeren in de zomer echter lager. In gestuwde trajecten leidt dit weliswaar niet direct tot lagere peilen, maar wel tot een geringere stroming, een geringer peilverschil en een geringere kwelstroom. Indien de nevengeul droogvalt als gevolg van een lager rivierpeil heeft dat overigens veel grotere effecten voor het ecosysteem dan het verminderen van de kwelstroom.

Bij uiterwaarden die worden (onder)bemalen (zoals de Everdingerwaard) treedt een vergelijkbaar effect op; ook daar zal de kwelstroom vanuit de rivier naar de uiterwaard iets afnemen. Het effect is daar echter relatief veel kleiner omdat het peilverschil groter is, en ook makkelijker te mitigeren door de onderbemaling wat omlaag te zetten.

2.6 Effecten op waterkwaliteit

Algemene effecten

Naast de eerder genoemde effecten op de waterkwantiteit, spelen in combinatie hiermee ook kwaliteitsaspecten een rol. De schaal, zowel in tijd als in de ruimte, waarop klimaateffecten zich manifesteren in aquatische ecosystemen varieert sterk. Lokale effecten, zoals zuurstofloosheid, kunnen zich vaak binnen een dag manifesteren, terwijl grote nationale en zelfs mondiale effecten zoals de areaalverschuiving van soorten zich in tijdsbestekken van decennia afspelen (Figuur 2.12).



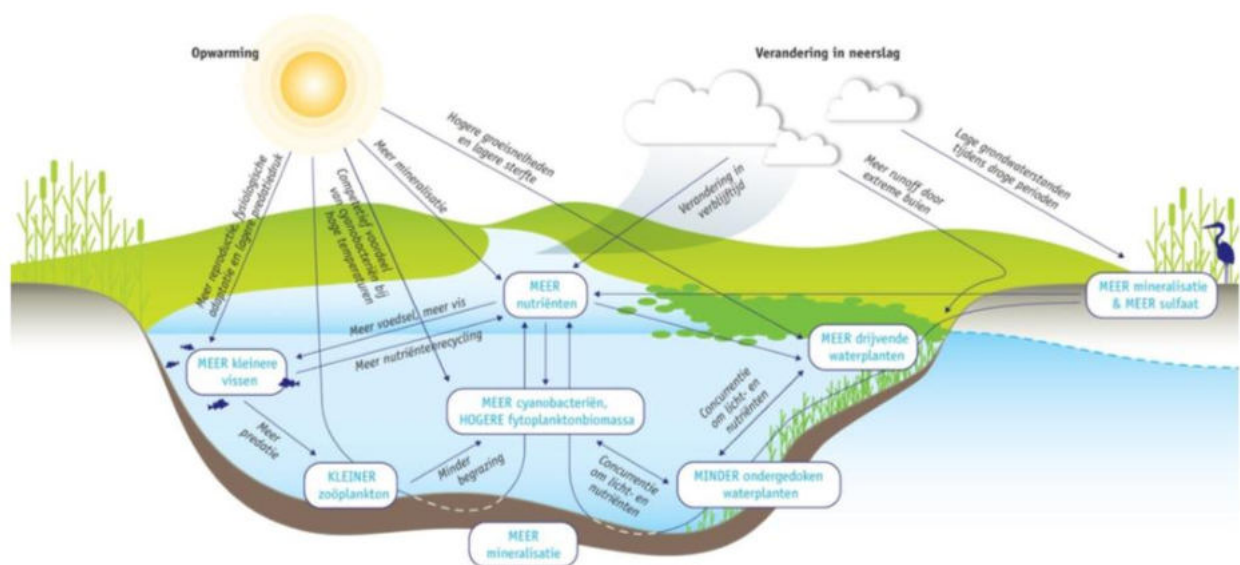
Figuur 2.12: Voorbeeld van de manifestatie van klimaatgebonden fenomenen over verschillende schalen van ruimte en tijd (Kosten, 2011 naar Loeve et al., 2006).

Figure 2.12: Example of the manifestation of climate-related phenomena across different scales of space and time (Kosten, 2011 after Loeve et al., 2006).

Belangrijkste veranderingen waterkwaliteit

Met inachtneming van onzekerheden in de klimaatscenario's en lokale verschillen in het optreden van effecten, kan met voldoende zekerheid een centrale conclusie worden getrokken: klimaatverandering versterkt de eutrofiëring van oppervlaktewateren. De symptomen van eutrofiëring variëren. Er kan sprake zijn van een toename van algen, van - soms toxische - drijflagen van cyanobacteriën ('blauwalgen') of drijvende planten, maar ook van verlies van ondergedoken waterplanten, zuurstofloosheid en veranderingen in de visgemeenschap (Figuur 2.13).

Figuur 2.13: Conceptuele weergave van de belangrijkste effecten van klimaatverandering op eutrofiëring en eutrofiëringseffecten (Kosten, 2011 naar Moss et al., 2011).



Een selectie van de meest relevante verwachte veranderingen voor de fysisch-chemische en biologische aspecten van de waterkwaliteit als gevolg van klimaatverandering in het riviereengebied wordt hieronder puntsgewijs toegelicht (naar Kosten, 2011; Van de Haterd *et al.*, 2020). In stagnante uiterwaardwateren of sterk gestuwde riviertrajecten zullen deze effecten zich eerder voordoen dan in stromende wateren.

- hogere temperaturen - eventueel in combinatie met een lagere afvoer - leiden tot grotere dag- nachtf fluctuaties in zuurstofconcentraties;
- kans op perioden met een zeer lage zuurstofconcentratie neemt toe;
- hogere interne fosfor- en stikstofbelastingen als gevolg van door opwarming verhoogde nalevering vanuit het sediment;
- hogere externe fosfor- en stikstofbelasting door veranderingen in het neerslagregime en de hiermee samenhangende hoeveelheden runoff, inlaat en uitlaat;
- versnelde denitrificatie als gevolg van hogere temperaturen;
- Een toename van microverontreinigingen zoals PAK's, PCB's, zware metalen en bestrijdingsmiddelen (o.a. door minder verdunning).

- door toename nutriëntenbelasting en langer groeiseizoen hogere fytoplanktonbiomassa's (stagnante wateren);
- aandeel aan cyanobacteriën in totale fytoplankton-biovolume neemt toe (stagnante wateren);
- afmeting en biomassa van zoöplankton nemen af waardoor de graasdruk op fytoplankton afneemt (stagnante wateren);
- verschuivingen in de ziekteverwekkers in het water; een toename van *Pseudomonas aeruginosa* (oorontsteking), Botulisme en *Trichobilharzia* (zwimmersjeuk), maar een afname van temperatuur- en UV-gevoelige soorten zoals *Campylobacter*,

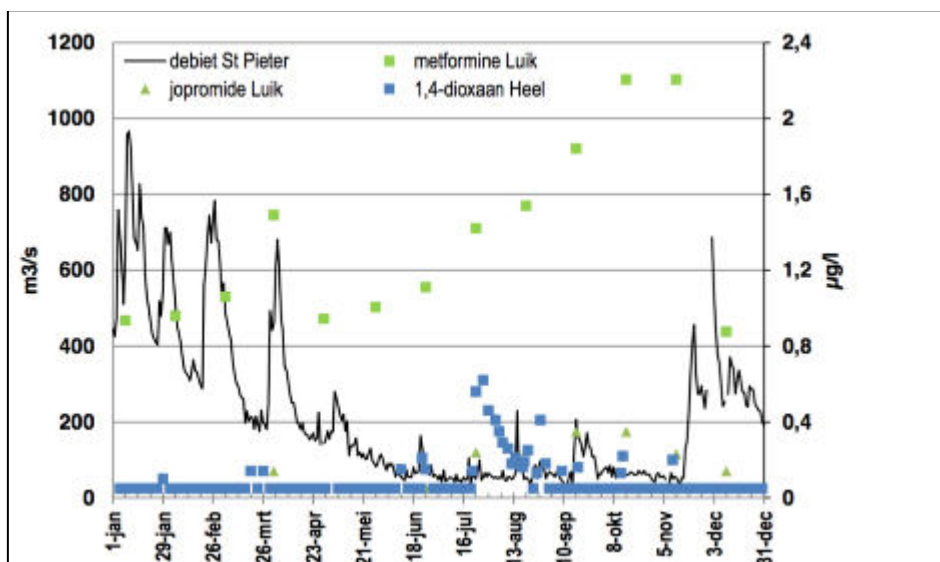
norovirussen en *Cryptosporidium*, die gastro-enteritisklachten geven (Van der Aa, 2009; de Roda Husman & Schets, 2010) (stagnante wateren).

Minder verdunning verontreinigingen door lage zomerafvoer

Er zijn verschillende studies gedaan naar de effecten van lage afvoer op de kwaliteit van het Maaswater, omdat dit een belangrijke bron voor drinkwater vormt. Voor de Rijn zijn dit soort effecten minder uitgesproken (en minder geanalyseerd), omdat er vooralsnog een demping van het effect is doordat de Rijn in tegenstelling tot de Maas ook gevoed wordt door sneeuwsmelt uit de Alpen.

Uit een studie naar de effecten van lage afvoeren van de Maas op de waterkwaliteit voor drinkwaterbereiding, blijkt dat de kwaliteit van het Maaswater inderdaad flink kan verslechteren doordat stoffen die in vaste hoeveelheden geloosd worden zich dan concentreren in het rivierwater (van Vliet & Zwolsman, 2007) (Figuur 2.14). Bij Lith komen gemiddeld 0-20 dagen per jaar (ca. 5% van het jaar) extreem lage afvoeren voor van <25 m³/s en gedurende 0-40 dagen per jaar (ca. 10% van het jaar) lage tot matig lage afvoeren van <70 m³/s. Deze lagere afvoeren kunnen op de Maas voorkomen van april tot eind oktober. Door klimaatverandering zullen de frequenties waarin deze situaties zich voordoen toenemen.

Bij lage afvoeren kan soms wel meer dan 50% van het Maaswater bestaan uit water afkomstig van RWZI's of IAZI's (riool- of industriële (afval) waterzuiveringsinstallaties).

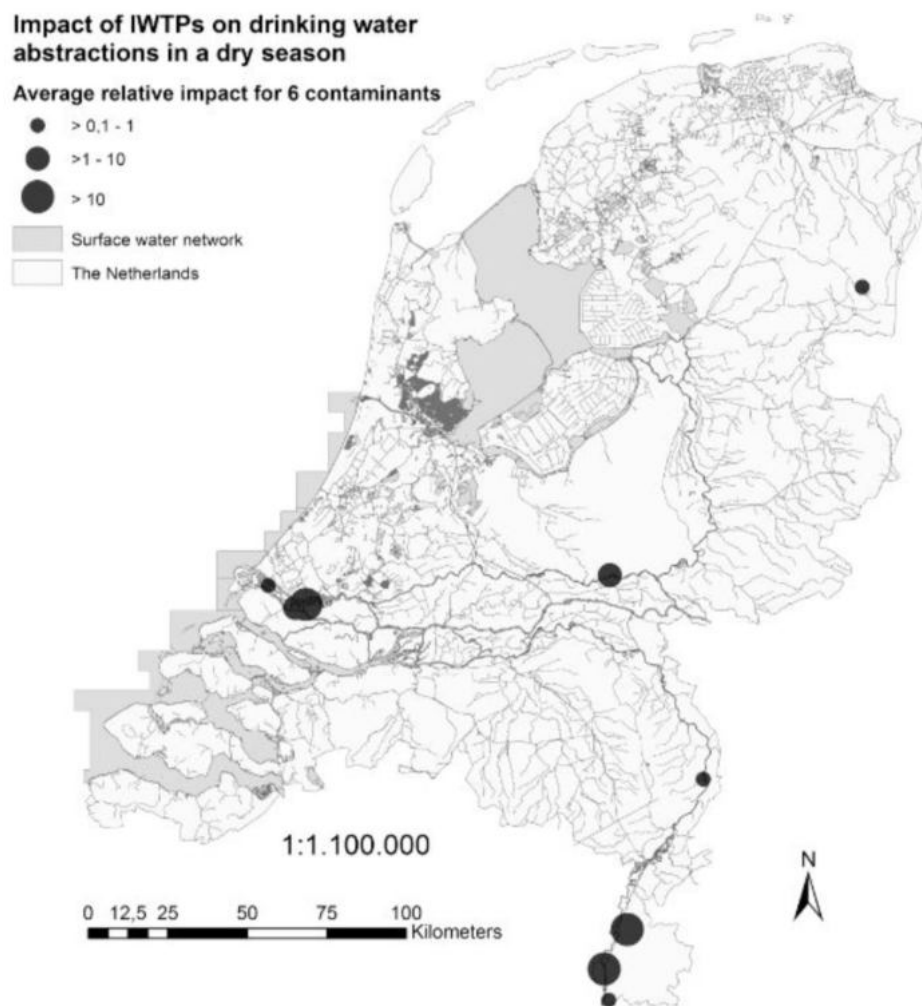


Figuur 2.14: Concentraties van stoffen die continu geloosd worden op de Maas, zoals metformine, jopromide en 1,4-dioxaan, nemen toe bij lage afvoer. Meetwaarden uit 2015 van Luik en Heel, afvoer bij Sint Pieter Noord (RIWA Maas, 2016).

Figure 2.14: Concentration of substances continually discharged on the river Meuse, such as metformine, jopromide and 1,4-dioxaan, increase by a lower river discharge. Data from 2015 in Luik (B) and Heel (NL), discharge at location Sint Pieter North (RIWA 2016).

Uit een studie naar alle industriële afvalwaterzuiveringsinstallaties (IAZI's) in Nederland (183 stuks), blijkt duidelijk dat de invloed op de stofconcentraties in het oppervlaktewater door IAZI's bij lage afvoeren het grootst is. Deze kan voor een giftige stof als tolueen in 30% van de wateren oplopen tot 80-100% afkomstig uit IAZI's. Verder blijkt dat de IAZI's vooral in de (zuidelijke) Maas eruit te springen wat betreft hun bijdrage aan verontreinigende stoffen (Figuur 2.15). Deze belasting werkt op het gehele Maastraject in Nederland door en wordt

dus versterkt bij lage afvoeren. Dit levert periodiek problemen op voor de drinkwaterwinning, maar mogelijk ook voor in het water levende organismen.

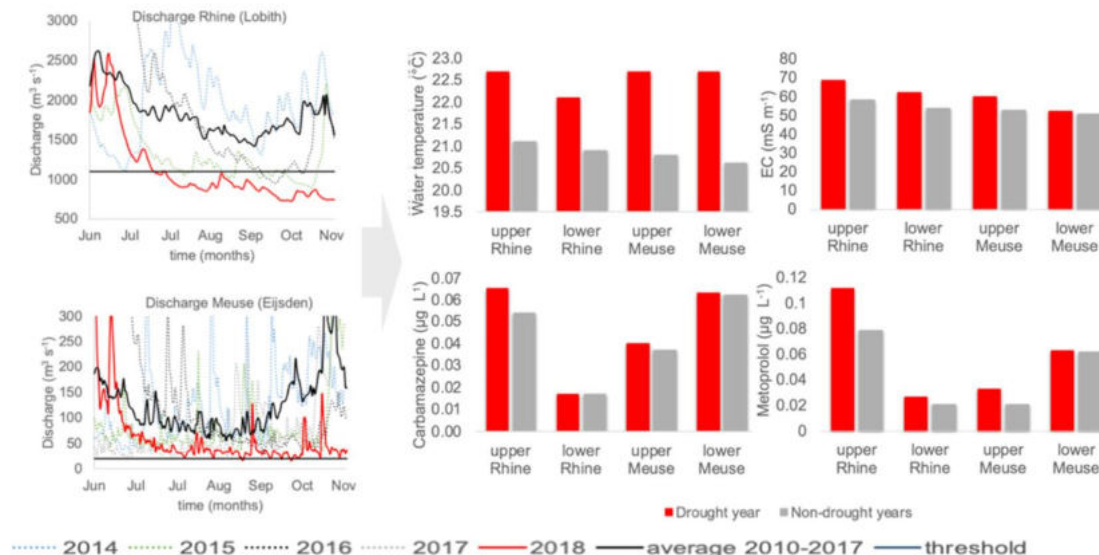


Figuur 2.15: Overzicht van de meest vervuilende Nederlandse IAZI's op basis van gemiddelde waarden voor zes probleemstoffen bij lage afvoeren (tolueen, benzeen, dichloormethaan en 1,2-dichloorethaan, vinyl chloride en DEHP) (Bron: Wezel et al., 2018).

Figure 2.15: Overview of the most contaminating Dutch industrial wastewater treatment plants based on the average values of six problem substances at low river discharge (toluene, benzene, dichloormethaan and 1,2-dichloorethaan, vinyl chloride and DEHP) (source: Wezel et al., 2018).

De negatieve effecten van lage afvoeren op de waterkwaliteit spelen dus sterker in de Maas dan in de Rijn vanwege het kleinere debiet en feit dat de Maas een regenrivier is (met grotere peilfluctuaties). Toch zijn ook in de Rijn de effecten van droge warme periodes op temperatuur, zoutgehalte en specifieke verontreinigingen aanwezig. In een studie naar de effecten van droge zomers op de concentratie van medicijnresten bleek dat de toename van de concentraties al bovenstrooms van Lobith en Eijsden plaatsvindt voordat het water Nederland binnenkomt (Figuur 2.16). In het Nederlandse deel van de Rijn zijn vooral temperatuur en saliniteit een probleem. Internationale samenwerking is ook voor dit probleem dus van belang.

In de Maas en de Rijn veroorzaken trouwens niet dezelfde stoffen problemen, omdat de landbouw en industrieën in beide stroomgebieden verschillen, zowel qua type stoffen als de concentraties die ze lozen.



Figuur 2.16: Links: Afvoer van de Rijn bij Lobith (boven) en van de Maas bij Eijsden (onder) tijdens de droogte van 2018 (juni-november), de referentieperiode (2014–2017) en de gemiddelde afvoer in de periode 2010–2017. De horizontale lijn is de drempelwaarde (20 percentiel dagelijks afvoer 2010–2018) van 1100 m³/s voor Lobith en 28 m³/s en 20 m³/s voor Eijsden. Rechts: Gemiddelde waarden voor temperatuur, saliniteit (EC) carbamezipine en metoprolol tijdens de droogte van 2018 (juni-november) en de referentieperiode (2014–2017) (bron: Wolff & van Vliet, 2021).

Figure 2.16: Left: Discharge of the Rhine at the monitoring stations Lobith (above) and discharge of the Meuse at Eijsden (below) during the drought of 2018 (June– November), the reference years 2014–2017 and the average discharge of the period 2010–2017. The horizontal lines represent the threshold (20% of daily discharge 2010–2018). Right: Average values for temperature, salinity, carbamazepine and metoprolol during the drought of 2018 (June– November) and the reference years 2014–2017 (source: Wolff & van Vliet, 2021).

Effecten van piekbuien

Nutriënten komen vooral in het oppervlaktewater terecht door afspoeling en uitspoeling. Dit proces zal intensiveren door de toename van winterse neerslag en frequentere en hevigere piekbuien in de zomer. Ook de kans dat overstorten in werking gaan, waarbij ongezuiverd rioolwater in het oppervlaktewater terecht komt, wordt dan groter. In combinatie met een verminderde stroming kan dit tot (blauw) algenbloeien leiden, met negatieve effecten voor verschillende soorten door verminderd doorzicht en negatieve effecten op de zuurstofhuishouding.

Als we dit doorvertalen naar het rivierengebied betekenen de benoemde effecten op waterkwaliteit vooral een extra drukfactor voor aquatische soorten in de gestuwde delen van het rivierengebied en de stagnerende delen van de vrij afstromende trajecten (nevengelen, stagnerende zones in het zomerbed). Wij schatten in dat het vooral effecten op algengroei en het daaraan gerelateerde zuurstofgehalte is waardoor aquatische soorten in de problemen komen (Figuur 2.17).



Figuur 2.17: Blauwalgen verspreiden zich vanuit een aangetakte plas ten zuiden van Maastricht (Oost-Maarland) naar de Maas in 2019 (foto: Rijkswaterstaat).

Figure 2.17: Bluegreen algae are spreading in the River Meuse from a gravel pit connected to the river, south of the city Maastricht (Oost Maarland) in 2019 (photo: Rijkswaterstaat).

2.7 Effecten op bodem

Verdroging bodem

Al sinds 1985 wordt verdroging gezien als een nationaal probleem. Verdroging treedt in veel natuurgebieden al decennia op door grootschalige ontwatering voor de landbouw en door grondwatergebruik. Door klimaatverandering met drogere zomers kan verdroging van de bodem verder toenemen doordat water sneller verdampt als gevolg van hogere lucht- en bodemtemperaturen. De toenemende droogte en verdroging van bodem kan voor schade en een verschuiving in soorten zorgen in de natuur (<https://iplo.nl/thema/water/beheer-watersysteem/droogte-verdroging/>).

Drogere zomers kunnen leiden tot grondwaterstanden die dieper wegzakken. De toenemende droogte door klimaatverandering is vooral nadelig voor vegetaties die afhankelijk zijn van ondiep grondwater. De daling van de grondwaterstand kan leiden tot een afbraak van organische stof in de bodem en een verschuiving in soorten (www.klimaat-effectatlas.nl).

Dat toenemende droogte en verdroging van bodem voor schade en verschuiving in soorten kan zorgen in de natuur is de afgelopen jaren al gebleken. Door het tijdens de droge zomers van 2018 en 2019 dieper wegzakken van de grondwaterstanden zijn al veranderingen waargenomen in vegetaties. Met name vegetaties die afhankelijk zijn van ondiep grondwater zijn gevoelig hiervoor. De door droogte veroorzaakte verandering in nutriëntenhuishouding van bodems kan een verschuiving in plantensoorten veroorzaken waarvan planten profiteren die snel groeien en veel voorkomen, zoals braam (www.klimaat-effectatlas.nl). Omdat de verschuivingen in de hydrologische omstandigheden niet altijd matchen met de andere standplaatsfactoren (bijv. bodemtype), zullen deze verschuivingen niet altijd succesvol verlopen.

Langdurige droogte betekent bijvoorbeeld ook minder bloemen. Bij gebrek aan nectar vliegen vlinders minder, wordt er minder voortgeplant en komen er minder rupsen. Deze en andere insecten zijn een belangrijke voedingsbron voor vogels (Vogelbescherming, 2020). Door het droger worden van de bodem komen weidevogels in de problemen. Enerzijds omdat de in de bodem aanwezige wormen dieper in de bodem wegkruipen en onbereikbaar zijn voor de vogels. Of anderzijds doordat de uitgedroogde bodem te hard is om met de delicate snavels in pikken (WWF, 2020). Dit verschijnsel doet zich al veel langer voor in verdroogde weidegebieden en is één van de oorzaken van de achteruitgang van de Nederlandse weidevogels.

Hogere bodemtemperatuur

Bij hogere temperatuur nemen ook chemische processen in de bodem toe, zoals stikstofmineralisatie. Het gemineraliseerde stikstof kan vervolgens met het regenwater afstromen naar het oppervlaktewater. De ordegrrootte van deze stikstofflux is sterk grondsoortafhankelijk. In het rivierengebied speelt dit bijvoorbeeld minder sterk dan in veengebieden. Ook versnellen microbiële processen in de bodem wanneer het warmer wordt. Het voert echter te ver om hier in detail op de effecten op bacteriën en schimmels in de bodem in te gaan. Deze effecten zijn ook niet specifiek voor het rivierengebied onderzocht. Als gevolg van klimaatverandering zal dus wel verrijking van zowel de bodem als (via de bodem) het water plaatsvinden, door afstroming van het opgeloste organische materiaal (DOC) naar het oppervlaktewater (Kosten, 2011). In kleiige bodems wordt een verdichting van de bodem verwacht als gevolg van deze processen (Verzandvoort & Kuikman, 2009).

Ook start het groeiseizoen geleidelijk steeds eerder door de wereldwijde opwarming (www.natuurkalender.nl). Door deze vroegere vegetatieontwikkeling kan langzaamaan een mismatch ontstaan tussen de beschikbaarheid van voedsel (bijvoorbeeld insecten) en het broedseizoen van vogels (Visser *et al.*, 2021).

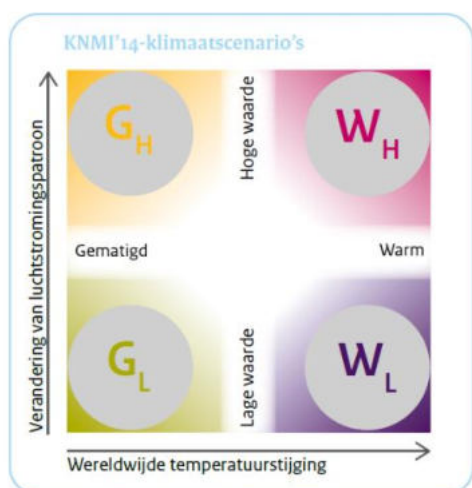
3 Verwachte ontwikkelingen van afvoerpatronen, doorstroming en watertemperatuur

3.1 Klimaatscenario's

Een belangrijke vraag van dit onderzoek is het inschatten van de klimatologische veranderingen voor de nabije toekomst. Op voorhand wordt ervan uitgegaan dat de gemiddelde lucht- en watertemperatuur verder stijgt en dat de rivierafvoer verder verandert. Het KNMI heeft verschillende toekomstscenario's doorgerekend voor de te verwachten effecten van klimaatverandering (Figuur 3.1).

Aanvullend is voor lage Rijnafvoeren en Maasafvoeren een scenario afgeleid dat gebaseerd is op het KNMI'14 scenario WH: het zogeheten WHdry - scenario. Dit scenario sluit aan bij de 10% droogste wereldwijde klimaatmodelleringen (CMIP5*) en is door het KNMI ontwikkeld om de te verwachten effecten van grootschalige droogte en opwarming in het stroomgebied van de Rijn en de Maas goed in beeld te brengen (Klijn *et al.*, 2015, Lenderink & Beersma, 2015).

Binnen voorliggende studie was ruimte om één klimaatscenario door te rekenen om de effecten op riviernatuur te onderzoeken. Om de ecologische effecten het duidelijkst in beeld te brengen is gekozen voor het WHdry-scenario, ook omdat van Geest (2020) aangeeft dat de effecten op de waterstanden in het groeiseizoen voor dat scenario het grootst zijn. Dit kan dan ook gezien worden als een 'worst-case' scenario. Zichtjaar voor dit scenario is 2050, wat aansluit bij de termijn waarop de Programmatische Aanpak Grote Wateren (PAGW) zich richt (zie www.pagw.nl).

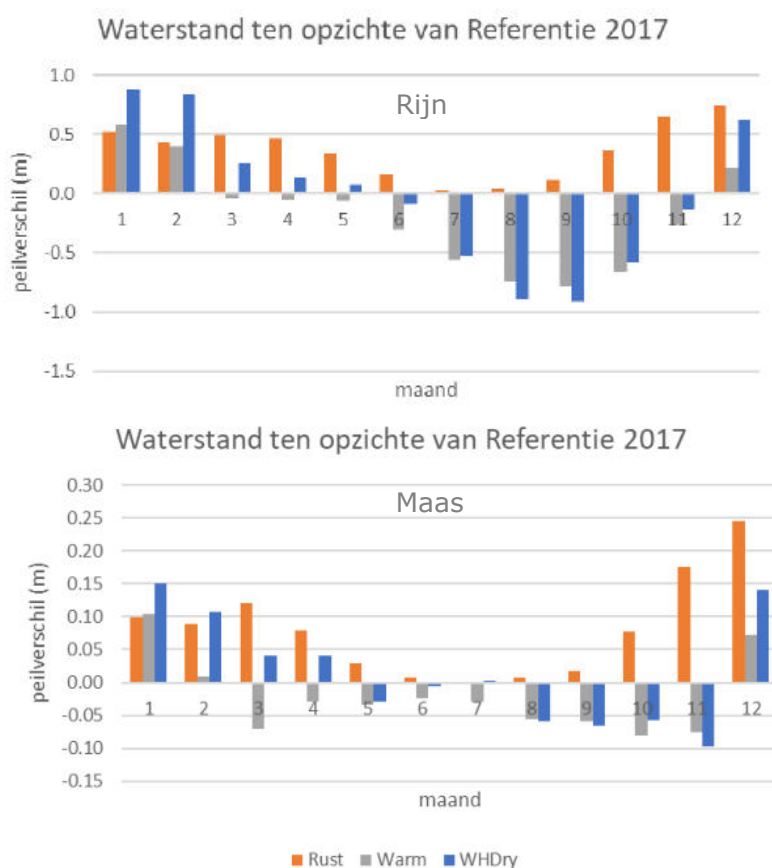


Figuur 3.1: Links: KNMI '14 scenario's voor 2050. Het WHdry-scenario is een drogere variant van het WH-scenario. (voor een verdere toelichting, zie Wolters *et al.*, 2018).

Figure 3.1: Left: KNMI '14 scenario's for 2050. The WHdry scenario is a dryer version of the WH-scenario. (for further information, see Wolters *et al.*, 2018).

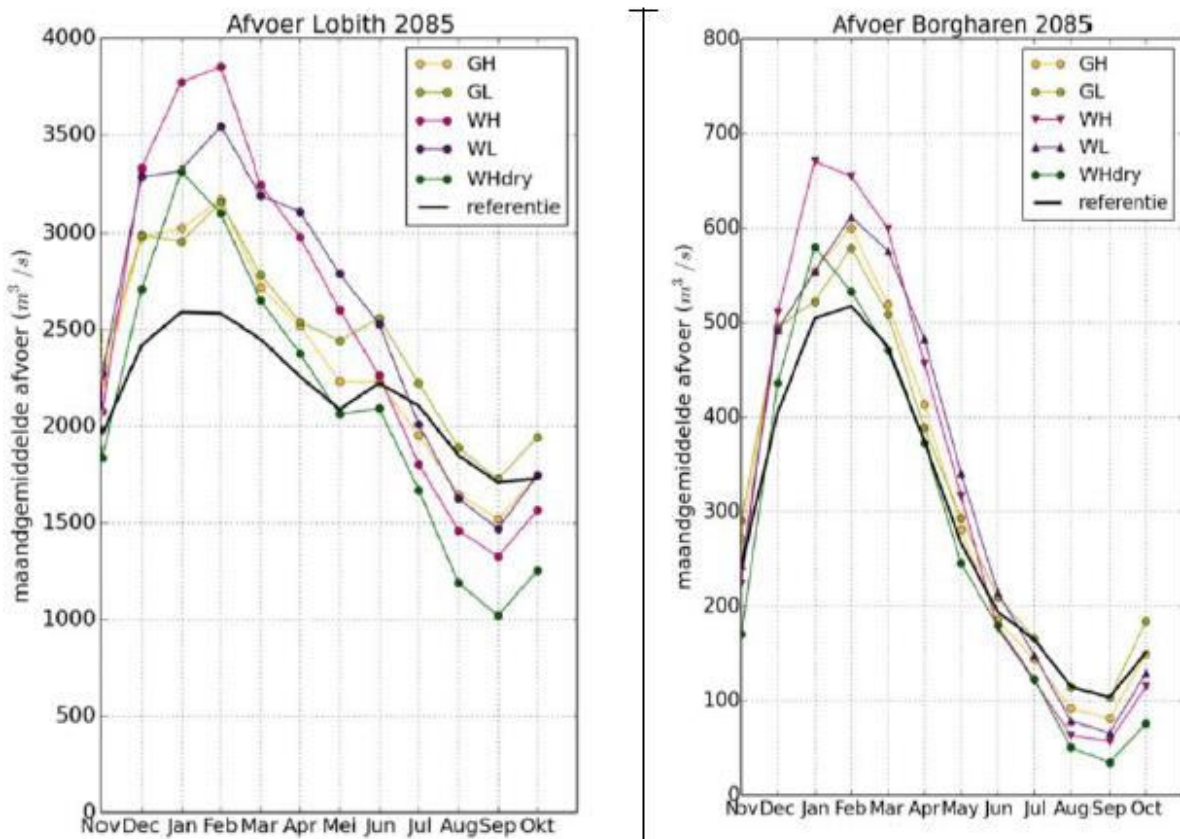
* Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), een harmonisatieprogramma van het World Climate Research Programme (WCRP)

Samenvattende studies van Deltares (Van Geest, 2020, Noordhuis *et al.*, 2019) geven inzicht in verwachte waterstandverschillen per maand van Rijn en Maas onder verschillende klimaatscenario's inclusief het WHDry scenario. Bij de berekening van de inundatiearealen is rekening gehouden met het huidige stuwregime op de gestuwde trajecten (Maas en Lek). De grootste dalingen in rivierpeil ten opzichte van de huidige referentie worden voor de Rijn in de (na)zomermaanden juli t/m oktober verwacht (drogere zomers), voor de Maas in de periode augustus t/m november (Figuur 3.2). In de winterperiode (december t/m februari) worden juist hogere rivierpeilen verwacht (nattere winters). In het voorjaar maart t/m juni zijn de peilverschillen ten opzichte van de huidige referentie relatief laag, in maart en april zullen waterstanden naar verwachting licht hoger zijn dan nu. Vanaf juni tot en met november worden echter lagere rivierpeilen verwacht voor de Rijn, voor de Maas treedt dit al in mei op. Afvoerscenario's voor 2085 voor Rijn en Maas laten een vergelijkbaar patroon zien (Figuur 3.3).



Figuur 3.2: Verwachte peilverschillen per maand in de Rijn (boven) en Maas (onder) bij WHdry scenario (blauw) t.o.v. de huidige referentie (2017) (bron: Van Geest, 2020). De scenario's Rust en Warm zijn in deze studie niet meegenomen.

Figure 3.2: Expected monthly change in water levels in the rivers Rhine (upper) and Meuse (lower) in WHdry scenario (blue) related to the actual reference year (2017) (source: Van Geest, 2020). The scenario's 'Rust' and 'Warm' are not included in this study.



Figuur 3.3: Berekende maandelijkse gemiddelde rivierafvoeren voor de Rijn (links) en Maas (rechts) voor de verschillende klimaatscenario's en de huidige referentie (bron: Noordhuis et al., 2019). Voor deze studie is alleen de referentie en WHdry relevant.

Figure 3.3: Calculated monthly mean discharge of the river Rhine (left) and Meuse (right) for different climate scenarios and the reference year (2017) (source: Noordhuis et al., 2019). For this study only 'referentie' the reference and WHdry are relevant.

Wat betreft de timing van de waterstanden gedurende het jaar kunnen we er op basis van het WHDry klimaatmodel vanuit gaan dat er in de toekomstige winters sprake is van hogere afvoeren en waterstanden. In het late voorjaar vanaf mei (Maas) en juni (Rijn) zullen zich lagere afvoeren en waterstanden voordoen, waarbij er vooral laat in de (na)zomer sprake is van aanzienlijk lagere afvoeren ten opzichte van de referentie.

De optreden van lagere rivierafvoeren in het voorjaar in een warmer klimaat is iets dat in eerdere studies onderbelicht is gebleven maar zich zeer waarschijnlijk sterker zal voordoen in de komende decennia, zie ook de huidige trend van lagere afvoeren in het voorjaar (zie Figuur 2.3 en Figuur 2.4).

3.2 Effecten op waterstanden

Toekomstige waterstanden worden niet alleen beïnvloed door veranderingen in rivierafvoeren ten gevolge van klimaatverandering, maar ook door veranderingen in het bodemprofiel (insnijding) van de rivier (Van Geest, 2020). Veranderingen in het bodemprofiel van de rivier staan hierbij los van klimaatverandering en zijn vooral het gevolg van menselijke ingrepen in de moderne tijd om een natuurlijke rivier te reguleren (zoals het baggeren en kanaliseren van de rivier en het aanbrengen van kribben). Vooral voor de Rijntakken spelen deze bodemprocessen een belangrijke rol in de waterstand (de Maas is grotendeels gestuwd). De bodem van de hoofdgeul van de rivier heeft zich hierbij de laatste decennia steeds dieper

ingesneden waarbij de uiterwaarden relatief hoger zijn komen te liggen ten opzichte van de hoofdgeul en daardoor pas bij hogere afvoeren inunderen (Reeze *et al.*, 2017).

Effecten op verwachte waterstanden van een veranderend klimaat kunnen dus alleen samen met effecten van een insnijdende rivierbodem in beeld gebracht worden. Om de effecten van klimaatverandering op waterstanden in beeld te brengen hebben we in de huidige studie deze gecombineerde effectanalyse uitgevoerd.

Hierbij zijn de effecten van een veranderende rivierafvoer zoals voorspeld in het WHdry scenario in combinatie met rivierbodemverandering doorgerekend op vijf waterstandsprofielen:

- Waterstanden overeenkomstig met een overschrijding van 1 dag/jaar;
- Waterstanden overeenkomstig met een overschrijding van 10 dagen/jaar;
- Waterstanden overeenkomstig met een overschrijding van 20 dagen/jaar;
- Waterstanden overeenkomstig met een overschrijding van 60 dagen/jaar;
- Waterstanden overeenkomstig met een overschrijding van 355 dagen per jaar.

De keuze voor deze waterstandsprofielen is gebaseerd op ecologische relevantie voor ecotopen/habitattypen en soorten in het rivierengebied voorkomen. Dit wordt per soortgroep verder uitgewerkt in hoofdstuk 4.

Methode waterstandsberekeningen

Voor de analyse van de waterstanden is gebruik gemaakt van de gegevens uit rivieren en klimaat – PAGW (Van Geest, 2020), die berusten op berekeningen met het Landelijk SOBEK Model (LSM-light) dat deel uitmaakt van het Nationaal Water Model (Hunink *et al.*, 2018). Met dit model wordt langs de rivieras om de 100 m de waterstand berekend voor gemeten en voor klimaat-gecorrigeerde afvoercondities (klimaatsscenario WHDry). We gebruiken vervolgens 30-jarige tijdsreeksen om de vijf waterstandprofielen af te leiden, dit zijn: 1, 10, 20, 60 en 355 dag(en) overschrijding (zie ook bijlage 1 voor een voorbeeld hiervan). Deze overschrijdingsfrequenties zijn gekozen omdat ze te koppelen zijn aan de (vereenvoudigde) standplaatseisen voor de belangrijkste habitattypen (Tabel 4.3).

In de projectie van berekende waterstandsprofielen naar inundatiearealen zijn alleen gebieden meegenomen die direct in verbinding staan met de rivier-as. Gebieden die achter de zomerkade liggen blijven ook in de modellering dus langer droog, conform de realiteit (tenzij de waterstand zo hoog is dat de zomerkade overstroomt).

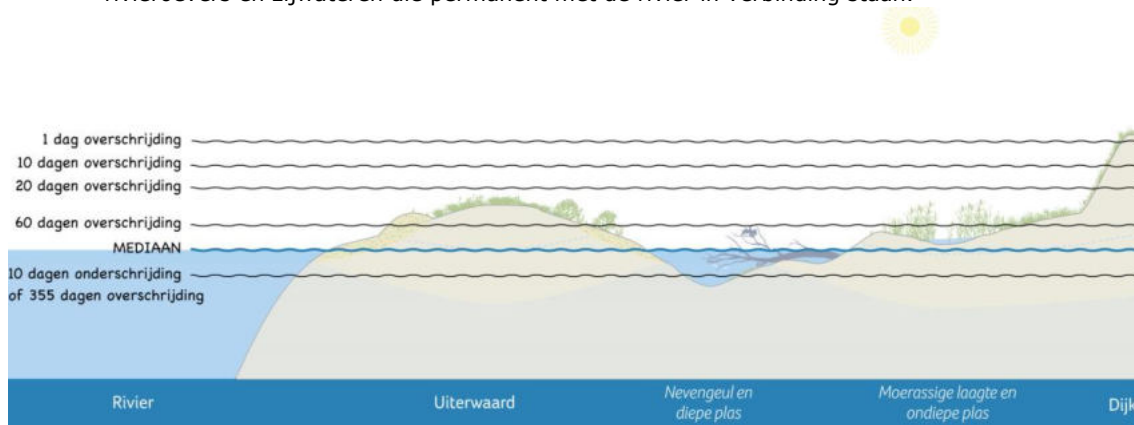
Kader: uitleg overschrijding waterstanden

Het waterpeil in de rivieren ligt het grootste deel van de tijd binnen een vrij beperkte range, (extreem) hoge en lage waterstanden komen relatief weinig voor. Toch zijn juist deze hoge en lage waarden van groot belang voor ecologie (variatie in overstromingsduur en -dynamiek), omdat veel organismen slecht tegen overstroming of juist slecht tegen droogval kunnen. In het kader van het beoordelen van het effect van klimaatverandering is het van belang inzicht te krijgen in hoe lang specifieke delen van een uiterwaard onder water staan in de huidige tijd (referentie) en in het scenario van een verend klimaat (WHdry).

Hoog gelegen zones in uiterwaarden staan vanzelfsprekend minder vaak en korter onderwater. De hoge zones overstroomden alleen bij extreem hoge waterstanden, de inundatieduur is kort, het water verdwijnt zo snel als de extreme hoogwaterpiek weer afneemt. De lage zones in uiterwaarden overstroomden vaker en langduriger. De lage zones lopen al onderwater bij minder hoge piekafvoeren, de inundatieduur is doorgaans langer (minder hoge piekafvoeren komen vaker voor).

Om de inundatieduur van uiterwaarden in de huidige referentie en in het WHdry klimaatscenario in beeld te brengen, hebben we in deze studie gebruik gemaakt van vijf waterstandsprofielen:

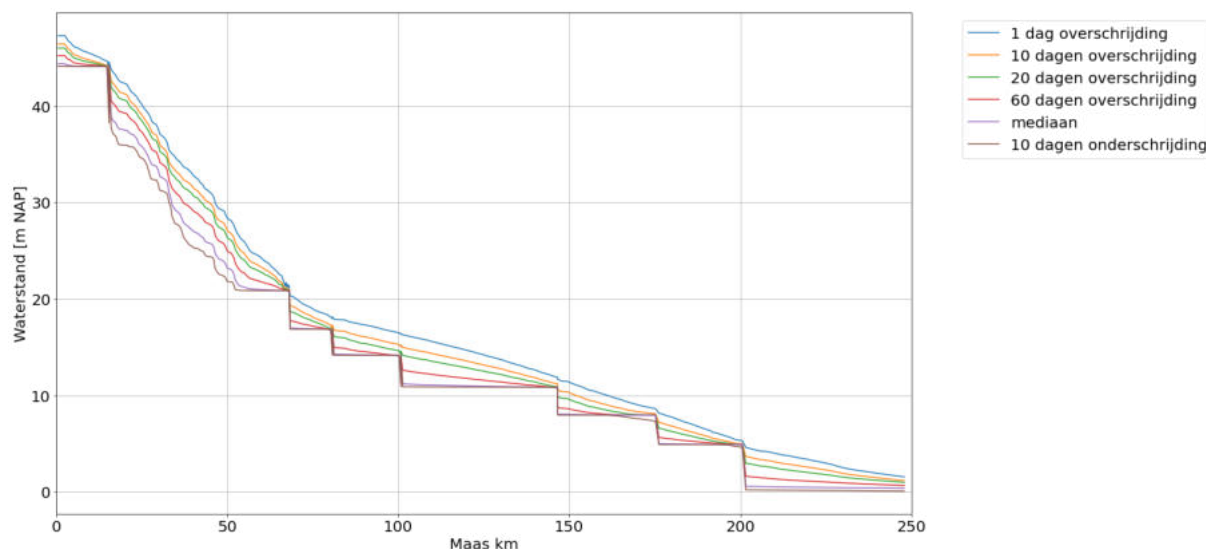
- De waterstand die hoort bij een overschrijding van 1 dag per jaar (d/j): is de waterstand die gemiddeld elk jaar gedurende 1 dag overschreden wordt. Dit is een maat voor een extreme hoogwaterstand die maar heel weinig voorkomt, vrijwel het gehele buitendijks gebied is dan overstroomd. Dat kan natuurlijk in sommige jaren helemaal niet zijn en in andere jaren meerdere dagen, gemiddeld is het echter één dag per jaar. Als je daar als plant groeit, sta je gemiddeld elk jaar slechts één dag onder water.
- De waterstanden die horen bij een overschrijding van 10, 20 en 60 d/j: zijn de waterstanden die gemiddeld elk jaar gedurende 10, 20 en 60 dagen overschreden wordt. Dit zijn hoogwaterstanden die op jaarbasis regelmatig voorkomen. Als je daar als plant groeit, sta je gemiddeld elk jaar 10, 20 of 60 dagen onder water.
- De waterstand die hoort bij een overschrijding van 355 d/j: is de waterstand die gemiddeld elk jaar gedurende 355 dagen overschreden wordt, ook wel 10 dagen onderschrijding genoemd. In tegenstelling tot de bovenstaande vier profielen is dit een maat voor het optreden van extreem lage waterstanden. Het grootste deel van het jaar staat er water, slechts 10 dagen per jaar is de waterstand lager en is er sprake van droogval. Als je daar als plant groeit, sta je gemiddeld het hele jaar onder water, 10 dagen per heb je echter droge voeten. Dit betreft vooral de rivieroeveren en zijwateren die permanent met de rivier in verbinding staan.



Figuur 3.4: Schematische weergave van de waterstandsprofielen: mediaan, 1, 10, 20, 60 en 355 dagen overschrijding van de gemiddelde waterstanden. 355 dagen overschrijding wordt ook als 10 onderschrijding omschreven.

Figure 3.4: Schematization of the water level profiles: median, 1, 10, 20, 60 and 355 days exceeding of the mean water level.

De waterstandsprofielen voor de referentiesituatie voor de Maas zijn weergegeven in Figuur 3.5. Deze waterstanden vormen de basis voor de ruimtelijke vertaling naar de ecologisch relevante inundatiegebieden in de uiterwaarden. De waterstanden zijn daarvoor op het hoogtemodel van de rivier geprojecteerd. Voor de hoogteligging van het rivierengebied is de Baseline schematisatie versie v19_5 gebruikt die ook is toegepast voor Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen (LIWO). In bijlage 2 is opgenomen hoe de autonome bodemdaling vervolgens is meegenomen in de verdere berekeningen.



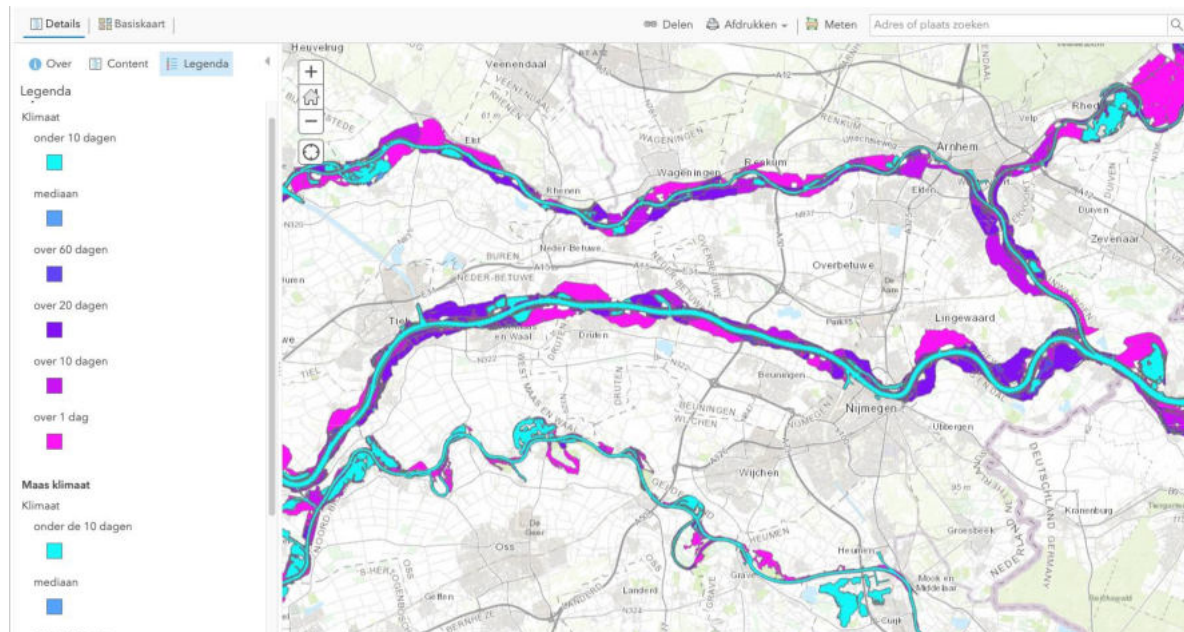
Figuur 3.5: Waterstandsprofielen op de Maas voor de referentiesituatie.

Figure 3.5: Water level profiles for the river Meuse in the reference situation.

De ruimtelijke doorvertaling van waterstanden naar inundatiearealen in de huidige referentie situatie en onder het klimaatscenario (WHdry, met en zonder bodeminsnijding) zijn terug te zien in een webviewer:

<https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=32d3e4e0ac964d79ac93312bb516cea5>.

In de webviewer (voorbeelduitsnede in Figuur 3.6) zijn de resultaten van de berekende inundatiearealen (huidige referentie, klimaatscenario) in te zien voor de Rijn en de Maas, zowel met als zonder bodemdaling. De webviewer kan door de beheerder gebruikt worden om in detail te zien waar de gebieden liggen die onder het klimaatscenario minder frequent inunderen (en daarmee droogtegevoelig zijn) of juist frequenter inunderen (en daarmee kansen op vernatting bieden). De webviewer vormt een hulpmiddel om in meer detail te bepalen wat kwetsbare zones in uiterwaarden zijn en welke mitigerende maatregelen of beheerdoelen hierbij passen. De klimaateffecten zijn met en zonder bodemdaling gemodelleerd. Van Geest *et al.* (2019) hebben al vastgesteld dat het effect op de waterstanden in de bovenstroomse trajecten sterker beïnvloed wordt door de bodemdaling dan door klimaatverandering.



Figuur 3.6: Voorbeeld uitsnede uit de webviewer:

<https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=32d3e4e0ac964d79ac93312bb516cea5>.

Figure 3.6: Example selection from the web-viewer:

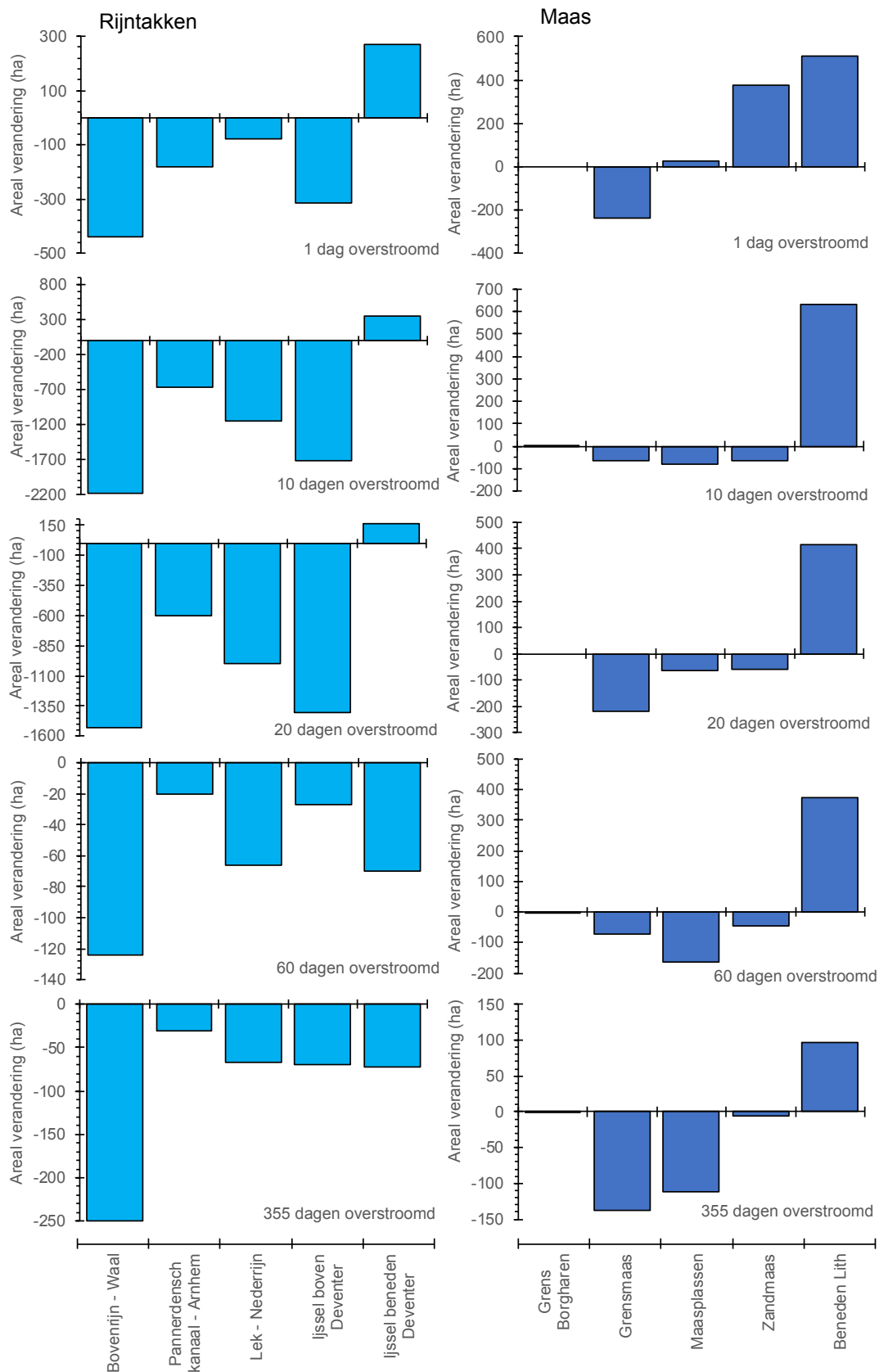
<https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=32d3e4e0ac964d79ac93312bb516cea5>.

3.3 Effecten op inundatiearealen

Totaalveranderingen arealen per riviertak

De hogere rivierafvoeren in de winter, lagere rivierafvoeren in de zomer en het effect van rivierinsnijding (waarbij de rivierbodem steeds lager komt te liggen ten opzichte van de uiterwaarden), heeft tot gevolg dat de arealen die jaarlijks overstroomd veranderen. De netto veranderingen in inundatiearealen tussen de huidige referentie en het WHDry klimaatscenario in combinatie met bodeminsnijding, zijn in Figuur 3.7 per riviertak in beeld gebracht. Hierbij zijn de vijf waterstandsprofielen 1, 10, 20, 60 en 355 dagen overstroomd, als uitgangspunt genomen.

De figuur geeft per waterstandsprofiel per riviertak het verschil weer tussen het inundatie areaal in de huidige referentie en het WHdry klimaatscenario. Een negatief verschil geeft aan dat het inundatieareaal voor het waterstandsprofiel onder het klimaatscenario afneemt, een positief verschil geeft aan dat het betreffende inundatieareaal juist toeneemt.



Figuur 3.7: Veranderingen in totale inundatiearealen (ha) per waterstandsprofiel (1, 10, 20, 60 en 355 dagen overstroomd) tussen de huidige referentie en het klimaatscenario WHDry (inclusief bodemveranderingen) voor de Rijntakken (links) en Maas (rechts).

Figure 3.7: Changes of the total inundated surface areas (ha) per inundation profile (1, 10, 20, 60 and 355 days of inundation) between the present reference and the WHDry climate scenario for the rivers Rhine (left) and Meuse (right).

Rijntakken

De verschillen in geïnundeerd areaal onder het WHDry scenario zijn voor de Rijntakken aanzienlijk groter dan voor de Maas. Voor vrijwel alle Rijntakken neemt het inundatieareaal voor de waterstandsprofielen 1, 10 en 20 dagen overstroomd sterk af (het areaal dat slecht kort overstroomt wordt kleiner). Alleen in de IJssel beneden Deventer is een areaaltoename van de drie profielen zichtbaar.

Daarnaast is voor alle Rijntakken een afname zichtbaar van het areaal dat 60 en 355 dagen overstroomd (ook het areaal dat langdurig overstroomt neemt af, inclusief de IJssel beneden Deventer). De Rijntak Bovenrijn – Waal laat hierbij de sterkste areaalafname zien ten opzichte van andere Rijntakken. Samenvattend nemen in de Rijntakken de arealen die kortdurend (1, 10 en 20 dagen overstroomd) en langdurend (60 en 355 dagen overstroomd) overstromen duidelijk af in het klimaatscenario (met uitzondering van de IJssel beneden Deventer). De afname in overstromingsareaal is het sterkst in de meest bovenstrooms gelegen Rijntak Bovenrijn – Waal. In de IJssel beneden Deventer neemt het areaal dat langdurig overstroomt (60 – 355 dagen) af maar het areaal dat korter overstroomt (1, 10 en 20 dagen) toe.

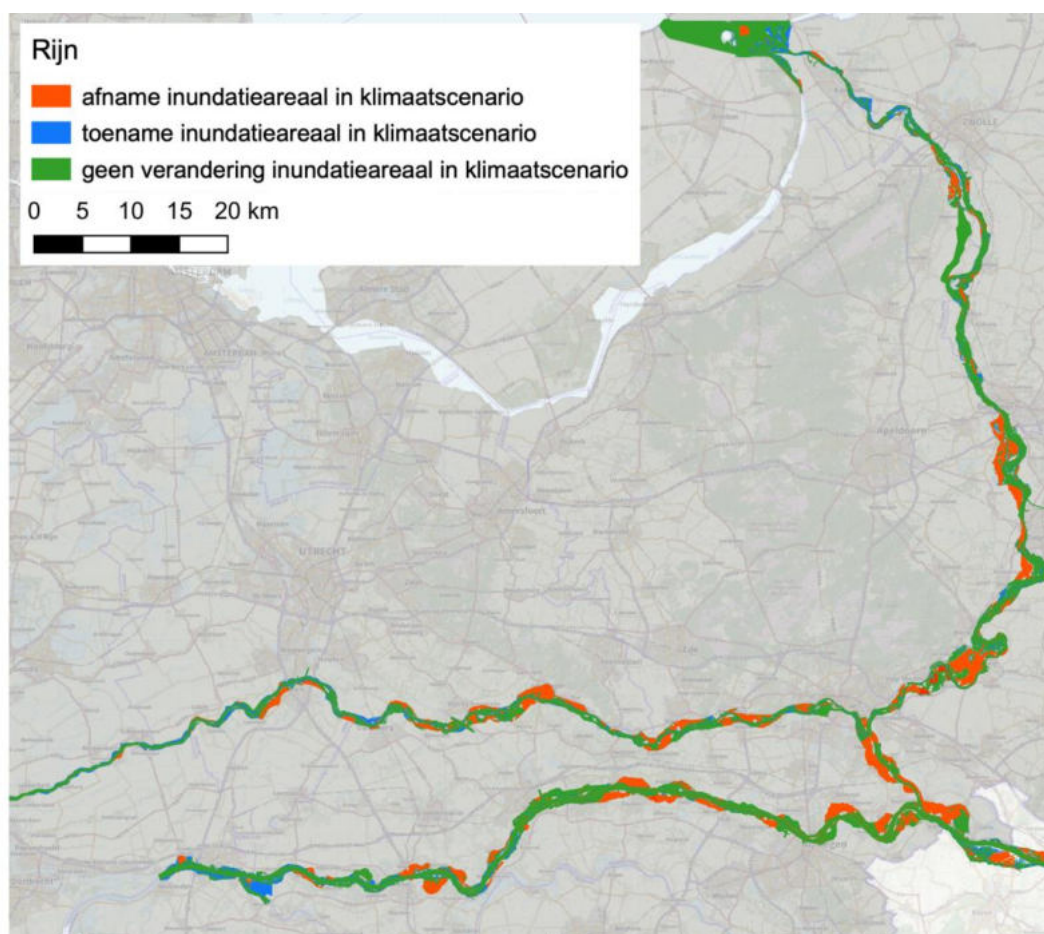
Maas

Voor de Maas liggen de verhoudingen in absolute veranderingen tussen inundatiearealen aanmerkelijk anders dan voor de Rijn (mede door het feit dat een groot deel van de Maas gestuwd is). In het stroomafwaartse deel van de Maas zijn gebieden te onderscheiden waar het inundatieareaal in het klimaatscenario toeneemt ten opzichte van de huidige referentie. In de Maas beneden Lith neemt het inundatieareaal van alle waterstandsprofielen toe in het klimaatscenario. Daar wordt het dus natter. Voor de Zandmaas en Maasplassen neemt alleen het areaal dat kortdurend overstroomt (1 dag per jaar) toe. Voor de Boven-Maas tussen de Belgische grens en Borgharen is er geen verschil in inundatiearealen tussen de huidige referentie en het klimaatscenario. Voor de Grensmaas daarentegen is een duidelijke afname van zowel het kortdurende inundatieareaal (1, 10 en 20 dagen overstroomd) als het langdurige inundatieareaal (60 en 355 dagen overstroomd) zichtbaar. Ook in de Maasplassen en in mindere mate voor de Zandmaas, neemt het areaal dat overstroomt af (met uitzondering van het areaal dat 1 dag per jaar overstroomt).

Samenvattend is er in het benedenstroomse deel van de Maas beneden Lith in het klimaatscenario dus sprake van een toename van zowel het kort- als langdurig overstroomde areaal. De Zandmaas en de Maasplassen laten alleen een toename zien van het areaal dat kortdurend overstroomt (1 dag per jaar). In de bovenstroomse Grensmaas nemen in het klimaatscenario alle inundatiearealen juist af, zowel kortdurend als langdurend overstroomd. De Limburgse Maasplassen laten daarbij ook een afname zien van het areaal dat langdurend overstroomd is.

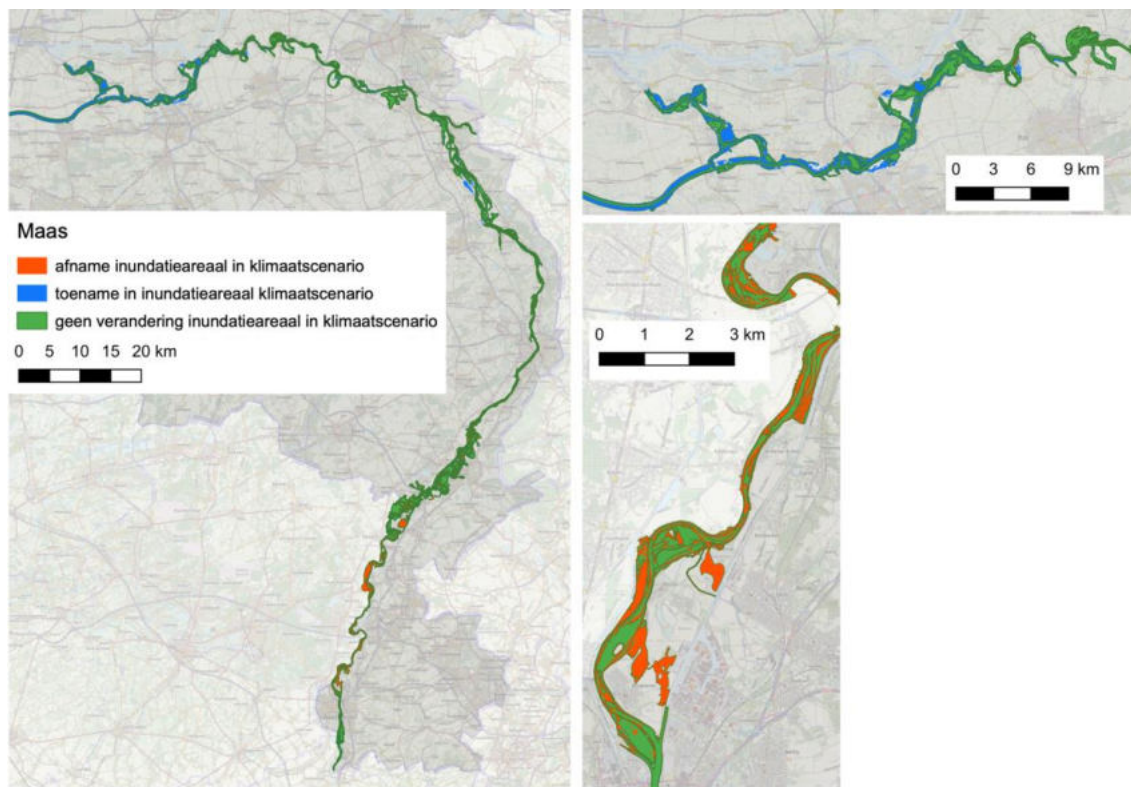
Totaalveranderingen arealen in beeld

Figuur 3.7 geeft een opsomming van de totale oppervlakten van veranderingen van de afzonderlijke inundatiearealen per riviertak. Als alle verwachte veranderingen van inundatiearealen bij elkaar opgeteld worden en weergegeven worden op een kaart, ontstaat een beeld waar netto verdroging (afname van het areaal dat overstroomt) of vernatting (toename van het areaal dat overstroomt) optreedt. In Figuur 3.8 zijn deze netto veranderingen in inundatiearealen voor de Rijntakken geografisch in beeld gebracht, Figuur 3.9 geeft de veranderingen weer voor de Maas. Beide figuren geven een ruimtelijk beeld waar sprake is van een afname van de inundatieduur (= verdroging, afname van het areaal dat 1, 10, 20, 60 of 355 dagen overstroomd is), een toename van de inundatieduur (= vernatting, toename van het areaal dat 1, 10, 20, 60 of 355 dagen overstroomd is), of waar geen verandering verwacht wordt in het WHDry klimaatscenario ten opzichte van de huidige referentie.



Figuur 3.8: Ruimtelijk effect van het WHDry klimaatscenario (inclusief bodemveranderingen) op het totale inundatieareaal ten opzichte van de huidige referentie voor de Rijntakken. 'Afname' en 'toename' inundatieareaal geeft in het WHDry klimaatscenario een afname of respectievelijk een toename weer van het totale inundatieareaal van de vijf waterstandsprofielen (1, 10, 20, 60 en 355 dagen overstroomd), 'geen verandering' geeft weer dat de inundatiearealen tussen de huidige referentie en het klimaatscenario weinig verschillen.

Figure 3.8: Spatial effect of the WHDry climate scenario (including riverbed incision) on the total inundation area in comparison with the present reference for the river Rhine. 'afname' (decrease) and 'toename' (increase) show either an increase or decrease of the total inundation area in the WHDry scenario in comparison with the present reference based on five water level profiles (1, 10, 20, 60 and 355 days flooded), 'geen verandering' (no effect) shows no large differences in inundation areas between both periods.



Figuur 3.9: Ruimtelijk effect van het WHDry klimaatscenario (inclusief bodemveranderingen) op het totale inundatieareaal ten opzichte van de huidige referentie voor de Maas. Afname en toename inundatieareaal geeft in het WHDry klimaatscenario een afname of respectievelijk een toename weer van het totale inundatieareaal van de vijf waterstandsprofielen (1, 10, 20, 60 en 355 dagen overstroomd), geen verandering geeft weer dat de inundatiearealen tussen de huidige referentie en het klimaatscenario weinig verschillen. Links is de gehele Maas weergegeven, rechts de bedijkte Maas beneden Lith (boven) en de Grensmaas (onder) in meer detail.

Figure 3.9: Spatial effect of the WHDry climate scenario (including riverbed incision) on the total inundation area in comparison with the present reference for the river Meuse. 'afname' (decrease) and 'toename' (increase) show either an increase or decrease of the total inundation area in the WHDry scenario in comparison with the present reference based on five water level profiles (1, 10, 20, 60 and 355 days flooded), 'geen verandering' (no effect) shows no large differences in inundation areas between both periods. Left panel shows the entire Meuse area in the Netherlands, right panels show the Meuse at Lith (upper panel) and the Grensmaas (lower panel).

3.4 Effecten op (door)stroming

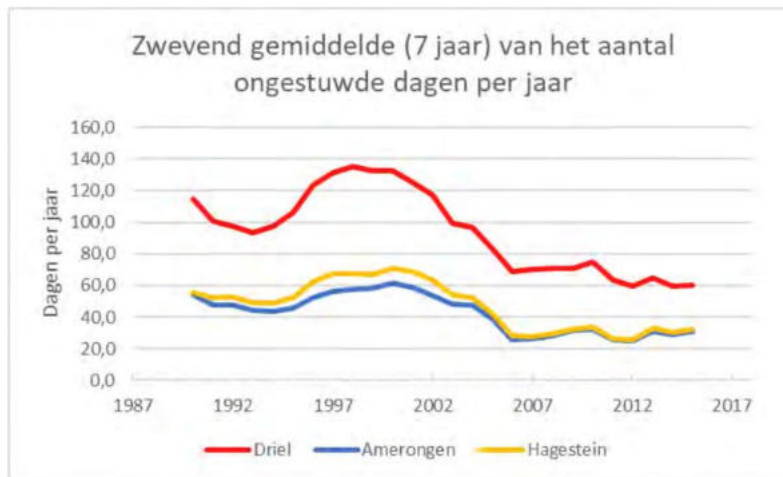
Stroomsnelheid van de rivier is onder meer gerelateerd aan de afvoer. Bij lage afvoeren is de stroomsnelheid gemiddeld lager. Dit geldt ook voor de aangetakte nevengeulen. Een gevolg van lage rivierafvoeren als gevolg van klimaatverandering is dus dat de condities voor stroomminnende soorten afnemen. Dit geldt voor vrij afstromende trajecten zoals de Grensmaas (Liefveld & Schulze, 2005), maar ook voor gestuwde trajecten zoals de stuwpanden in de Maas (Geerling *et al.*, 2010) en de Nederrijn-Lek (van Doornik *et al.*, 2019). Voor de gestuwde trajecten in de huidige referentieperiode zijn de waterstromingscondities voor stroomminnende soorten al suboptimaal. De vrij afstromende omstandigheden doen zich in de gestuwde trajecten vooral in het winterhalfjaar voor. Dit seizoen is voor veel soorten ecologisch minder relevant, er vindt doorgaans geen paai en opgroei plaats van stroomminnende soorten in de winter.

Lagere afvoeren met minder doorstroming (verversing) in gestuwde trajecten heeft ook gevolgen voor de waterkwaliteit. De kans op opwarming, bovenmatige algenontwikkeling en

negatieve effecten op doorzicht en zuurstofgehalte, neemt toe in de stuwpanden tijdens periodes met lage afvoer en stagnatie van de waterstroom (paragraaf 2.6).

Deze afnemende doorstroming in gestuwde trajecten is al gaande: in Figuur 3.10 is bijvoorbeeld te zien dat het aantal dagen met vrij afstromend debiet de laatste decennia afneemt in de stuwpanden van de Nederrijn-Lek. De achterliggende oorzaak hiervan is echter niet primair de klimaatverandering, maar de dalende rivierbedding, waar het stuwregime (nog) niet op aangepast is (W. Ten Brinke *pers. com.*).

Voor de Maas geldt dat de gemiddelde afvoer in de zomermaanden in recente jaren (1990-2017) lager is dan het langjarig gemiddelde, voornamelijk in april en mei (Reeze *et al.*, 2020, en data uit voorliggende studie). Ook hier zal in de gestuwde trajecten ten gevolge van klimaatverandering de stuwingsgraad en het aantal dagen met alge afvoer en stagnatie van de waterstroom vermoedelijk toenemen.



Figuur 3.10: Zwevend gemiddelde (over 7 jaar) van het aantal geheel ongestuwde dagen per jaar voor de drie stuwen op de Nederrijn-Lek (bron: Van Doornik et al., 2019).

Figure 3.10: Average (over 7 years) of the number of days with free-flowing river discharge for the three weirs on the river Nederrijn-Lek (source: Van Doornik et al., 2019).

De effecten van lage afvoeren hangen sterk samen met de morfologie van de rivier. In de Grensmaas was bijvoorbeeld enkele decennia terug een groot gebrek aan ondiepe zones omdat het profiel van het zomerbed uniform en relatief diep was. In die situatie kan een lage afvoer in het voorjaar juist gunstig zijn, omdat dan ondiepe *riffles* ontstaan op de grindbanken waar vissoorten als barbeel en kopvoorn kunnen paaien of opgroeien. Voor de adulte levensstadia zijn de stroomsnelheden dan echter te laag en ontbreken diepe plekken als koude-refugium (Liefveld & Jesse, 2006). Dankzij het Grensmaasproject is er nu veel meer variatie in het diepteprofiel van de rivierbodem en aangrenzende uiterwaarden zodat ook bij hogere afvoeren ondiepe, stromende zones ontstaan. Keerzijde is echter dat de stroomsnelheden door de verbreding van het rivierbed echter lokaal (sterk) afnemen. RWS is voornemens om dit te compenseren door lokaal Maaskeien en rivierhout aan in het zomerbed aan te brengen.

Stuwpanden Maas

Een van de gevolgen van het stuwbeheer in de gestuwde Maas tussen Lith en Linne is dat de variatie in waterstanden relatief gering is. Bij lagere afvoeren van de Maas ($< 200 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$, het grootste deel van het groeiseizoen) is er vrijwel geen sprake van variatie in waterstanden binnen een stuwpand, ook de (door)stroming in de Maas is dan gering (Geerling *et al.*, 2010). Deze gestuwde situatie vertaalt zich weer door naar de benedenloop van de beken die in de Maas uitkomen. Een gestuwd, vast peil in het voorjaar en zomer vermindert ook de stroomsnelheid in de beekmonding aangrenzend aan de Maas. Klimaatverandering zal dit effect versterken, het aantal dagen met lage afvoer van de Maas

neemt toe waardoor de waterstand in de stuwpanden van de Maas gedurende langere perioden van het jaar gelijk zijn (en er vrijwel geen sprake is van doorstroming).

3.5 Effecten op piekafvoeren in voorjaar en zomer

Vaker zomerse hoosbuien

Het zomerhoogwater van juli 2021 heeft een voorproefje gegeven van wat ons vaker staat te gebeuren: intensieve zomerse hoosbuien kunnen tot flinke wateroverlast zorgen. Als ze zich concentreren in een groter deel van een stroomgebied kan dit leiden tot overstromingen in beekdalen en inundaties van rivieruiterwaarden. Het onderzoek naar de ontwikkeling van zomerse hoosbuien is nog in volle gang. De toename heeft te maken met het verschijnsel dat warme lucht meer vocht kan bevatten. Het gemiddelde vochtgehalte in de atmosfeer neemt in Nederland al jaren toe, dus bij regen kan er ook meer uit vallen (KNMI, 2021). Doordat de piekbuien zich langzamer verplaatsen neemt het risico op overlast toe (Climate change post, 2021).

Omdat toeval een grote rol speelt, is het optreden van hevige piekbuien lastig te onderzoeken. Voor de ecologie van het riviereengebied is de relevantie vooral dat er vaker onvoorspelbare hoogwaters optreden gedurende het groeiseizoen. Hoogwaters in het zomerseizoen zijn van alle tijden, maar de frequentie en omvang ervan zal toenemen als gevolg van klimaatverandering. Naar verwachting zal een situatie als in de zomer van 2021 zich gemiddeld eens per 400 jaar voor kunnen doen (Kreienkamp *et al.*, 2021). Op zich hoort overstromingsdynamiek bij de ecologie van het riviereengebied: grote verstoring afvoeren werken als flood pulse en sturen de ecologische ontwikkeling in rivieren, zoals betoogd in vele artikelen (onder andere Junk *et al.*, 1989). Onvoorspelbare inundaties kunnen periodiek voorkomen, maar zijn meer kenmerkend voor bovenlopen en sterk veranderde riviersystemen. Inundatie in het groeiseizoen kan allerlei negatieve effecten hebben, zoals het wegspoelen van nesten, het onderlopen van hopen en het onder water staan van uiterwaardvegetaties. De inperking van de overstromingsvlakte door bedijking (resultierend in lokaal smalle, begrensde uiterwaarden) vergroot het effect, omdat de kans nu groter is dat de hele uiterwaard onderloopt doordat het water beperkt de ruimte krijgt. Daardoor blijven er te weinig laagdynamische zones over, die ook bij het riviersysteem horen en waardevolle natuur bevatten.

Verschuiving voorjaars afvoerpiek op de Rijn

In paragraaf 2.2 is al aangegeven dat als gevolg van klimaatverandering het afvoerproces van de Rijn zal veranderen: Van een gemengde gletsjer-regenrivier, zal het karakter steeds meer op dat van een regenrivier gaan lijken (Hurkmans *et al.*, 2010). In veel Europese rivieren is de piekafvoer als gevolg van eerdere sneeuwsmeelt de laatste decennia al flink vervroegd, soms zelfs met tientallen dagen (Blöschl *et al.*, 2017). Een tegengesteld effect kan in de toekomst mogelijk ook ontstaan door het later optreden van stormdepressies in de winter als gevolg van klimaatverandering. Deze effecten zullen het sterkst optreden in de smallere bovenlopen en zijrivieren. Zoals de zomer van 2021 uitwees, is met name de Maas ook gevoelig voor dit soort verschijnselen door haar kleine invanggebied. Ook langs de Rijntakken inundeerden de uiterwaarden met gevolgen voor ecologie en beheer.

In mondiale studies zien we per regio verschillen in de klimaateffecten op rivierafvoeren, maar de grote lijn is wel dat de bestaande seizoensdynamiek versterkt wordt: hoge afvoeren worden hoger en lage afvoeren worden lager (Eisner *et al.*, 2016). Verschuivingen binnen een jaar zijn echter lastig te voorspellen. Wat de lokale effecten zijn is bovendien sterk afhankelijk van de vormgeving van de rivier op de betreffende locatie. Door het beperkte stroomgebied en de smalle dalen, was het effect van de piekbuien half juli 2021 desastreus in de Duitse deelstroomgebieden en in de Ardennen en Limburg, terwijl de Rijn en Maas in

Nederland de waterhoeveelheden wel konden verwerken, hoewel het er ook langs de Maas lokaal erg spannend was en de beheerders ook langs de Rijntakken problemen ondervonden.

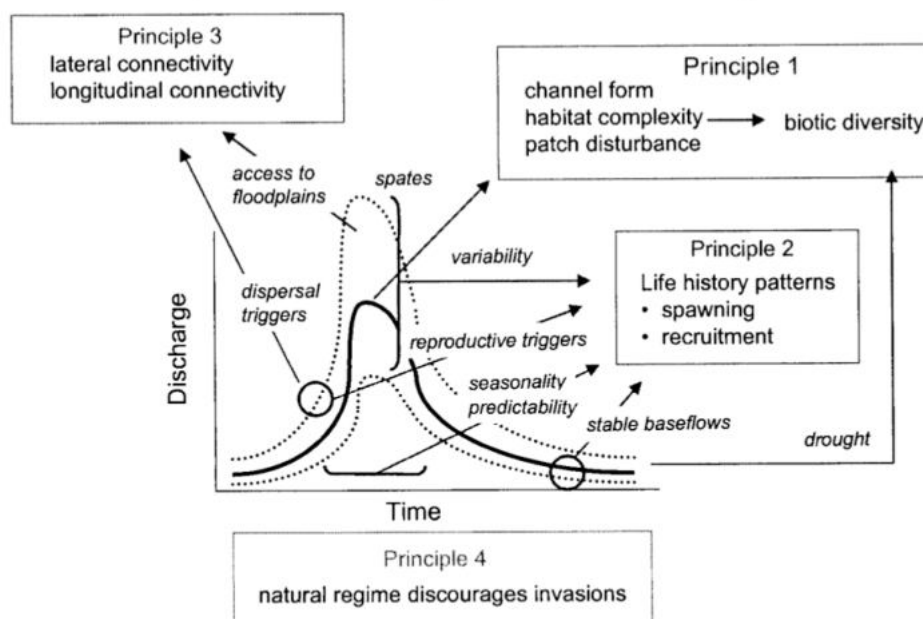
Hoe dit uitpakt voor de Nederlandse Rijn is dus nog onduidelijk, maar als we kijken naar de afgelopen jaren, dan lijkt het kenmerkende voorjaarspiekje (rond mei) in de afvoer bij Lobith, dat optreedt als gevolg van sneeuwsmelt, zich geleidelijk vroeger in het jaar te manifesteren (omdat de sneeuw eerder smelt). Daarbij zal dit piekje geleidelijk ook lager worden (doordat er steeds minder sneeuw valt in de Alpen). Dit patroon lijkt zich voorzichtig aan al af te tekenen in het huidige afvoerverloop (zie Figuur 2.3 en Figuur 2.4), maar is lastig te onderscheiden doordat er altijd al veel variatie in het optreden van deze voorjaarspiek te zien is. De consequentie van deze ontwikkeling is dat er steeds minder delen van de uiterwaarden in het voorjaar zullen overstromen. Ook verschuift de timing van de voorjaarsinundaties mogelijk meer naar voren in het seizoen, als de watertemperatuur in Nederland nog te laag voor actieve paai is en te laag voor de primaire en secundaire productie op de overstroomde graslanden. Dit kan voor verschillende soorten die in ondergelopen uiterwaarden paaïen, zoals winde, een knelpunt betekenen in hun voortplantingscyclus. Deze ontwikkeling wordt versterkt door de insnijding van het zomerbed, waardoor de uiterwaarden steeds minder vaak overstromen. In hoofdstuk 6 identificeren we enkele mitigerende maatregelen voor dit knelpunt.

Relatie ecologie & hydrologie in het rivierengebied (uit: Geerling *et al.*, 2010)

De relatie tussen hydrologie en ecologie is complex. Veel soorten hebben zich aan het regime van natuurlijke afvoervariatie aangepast en hebben deze nodig voor hun voortbestaan. Dit zijn meestal de voor stromende wateren karakteristieke soorten. In Figuur 3.11 zijn voor een natuurlijke afvoer vier principes weergegeven die in grote lijnen de relatie tussen ecologie en hydrologie van rivieren beschrijven (Bunn & Arthington, 2002).

1. De relatie tussen biodiversiteit en de fysieke habitat wordt grotendeels bepaald door grootschalige verstoringen die de vorm van de rivier en oevers beïnvloeden, zoals jaarlijks of meerjaarlijks grote afvoeren. Daarbij zijn droogte en lage afvoeren ook bepalend voor de beschikbaarheid van habitat voor soorten.
2. Veel levenscycli van soorten zijn gekoppeld aan hydrologische factoren zoals een stijgende afvoer, timing van afvoerpieken in het seizoen en wel of geen stabiele basisafvoeren. Een stijgende afvoer in relatie met een veranderende temperatuur kan een trigger zijn voor de voortplanting of migratie van aquatische soorten.
3. Afvoerfluctuaties initiëren en beïnvloeden de mogelijkheden voor verspreiding in de rivier zelf en verspreiding naar meer geïsoleerde strangen en plassen in uiterwaarden, ook wel laterale en longitudinale connectiviteit genoemd.
4. Binnen een riviertype zijn de lokale soorten in de loop der tijd aan het lokale afvoerregime aangepast. Zij maken in hun levenscyclus en de lokale setting optimaal gebruik van de genoemde principes. Verandering van deze afvoeren, in zowel timing als hoeveelheid, zal het systeem minder geschikt maken voor lokale soorten, en meer geschikt voor exoten.

Aquatic biodiversity and natural flow regimes



Figuur 3.11: Relatie tussen afvoerregimes en ecologie (Bunn & Arthington, 2002).

Figure 3.11: relation between discharge regimes and ecology (Bunn & Arthington, 2002).

3.6 Toename van de watertemperatuur

Tot hoever zal de watertemperatuur stijgen?

Door klimaatverandering en koelwaterlozingen is de watertemperatuur de laatste decennia geleidelijk steeds hoger geworden. Veel aquatische soorten hebben een optimum temperatuur en een kritische temperatuur. Indien de soorten langdurig worden blootgesteld aan watertemperaturen boven de kritische temperatuur, treedt schade of sterfte op. Naar verwachting zal de watertemperatuur door klimaatverandering steeds verder stijgen. Een belangrijke vraag voor de overlevingskansen van aquatische soorten die een relatief lage kritische temperatuur hebben, is de vraag welke temperatuurstijging de komende decennia verwacht kan worden.

Er zijn weinig modellen voorhanden die hier een uitspraak over doen. Uit eerdere paragrafen is al duidelijk geworden dat de watertemperatuur sterk verschilt tussen watertypen. Tegelijkertijd geven de beschikbare meetreeksen ook aan welke watertemperaturen nu regelmatig in de zomer voorkomen en welke temperaturen vooralsnog uitzonderlijk zijn. Hieruit blijkt dat voor de meeste watertypen in de huidige tijd watertemperaturen rond de 21 °C regelmatig voorkomen (tenminste 20 dagen per jaar) terwijl watertemperaturen rond de 24 °C nu relatief weinig voorkomen (ca. 3 dagen per jaar). Het valt in de verwachting dat door klimaatverandering het aantal dagen dat watertemperaturen rond de 24 °C liggen steeds vaker gaan voorkomen. Het is daarmee aannemelijk dat aquatische soorten in de zomer steeds vaker blootgesteld worden aan watertemperaturen in het rivierengebied die ca. 3 °C hoger zijn dan nu. Een vergelijkbare stijging in watertemperatuur van de Rijn is ook berekend in een modelstudie van Hardenbicker *et al.* (2017). In deze studie wordt geconcludeerd dat de watertemperatuur van de Rijn in de volgende decennia 2 tot 3 °C zal stijgen.

4 Effecten van klimaatverandering op kenmerkende soorten en habitats

Op basis van literatuur, omgevingseisen van soorten en habitats, is in dit hoofdstuk een inschatting gemaakt van effecten op soorten en habitats.

4.1 Primaire productie en planten

Meer zonlicht, hogere voorjaarstemperaturen

Ten gevolge van klimaatverandering neemt de gemiddelde luchttemperatuur en hoeveelheid zonlicht in Nederland toe. Dit zorgt een hoger temperatuuroptimum voor o.a. vaatplanten waarbij zuidelijke (warmteminnende) soorten gefaciliteerd worden (Sparrius *et al.*, 2018; Van Swaay *et al.*, 2019). De noordwestelijke oriëntatie van Maas en Rijn lijkt daarbij een belangrijke verspreidingsvector voor de vestiging van plantensoorten uit zuidelijke landen in Nederlandse rivieruiterwaarden (Groen, 2017). Plantensoorten die hun verspreidingsgebied noordwaarts uitbreiden raken daarbij ook tijdelijk verlost van hun natuurlijke vijanden in de bodem; dit is onder meer aangetoond voor de bleke morgenster ten opzichte van de inheemse gele morgenster (Van Grunsven *et al.*, 2007; 2009). Dit kan een concurrentievoordeel opleveren ten opzichte van inheemse soorten; hetgeen een mogelijke verklaring is voor de snelle uitbreiding en het invasieve karakter van deze nieuwe soorten.

Effecten op aquatische primaire productie

Effecten van klimaatverandering op stilstaande aquatische systemen (zoals in uiterwaarden) is o.a. in beeld gebracht door Kosten (2011), Velthuis (2018) en Noordhuis *et al.* (2021). Door klimaat effecten verandert de nutriëntencyclus in stilstaande wateren waardoor er meer nutriënten beschikbaar komen, de productie van fytoplankton en cyanobacteriën toeneemt en tenslotte de productie van ondergedoken waterplanten afneemt terwijl die van drijvende waterplanten toeneemt. In Nederlandse riviersystemen is niet gericht onderzocht hoe de primaire productie in uiterwaarden verandert door klimaatinvloeden. Wel is beschreven dat in de Connecticut rivier in de Verenigde Staten de combinatie van hoge temperaturen, zonnige dagen, lage afvoer, helder water en droogval resulteerde in een algehele hogere primaire productie in zowel terrestrische als aquatische habitats (Hosen *et al.*, 2019).

Van Geest *et al.* (2019) en Van Geest (2020) beschrijven dat ten gevolge van de combinatie van klimaatverandering en bodeminsnijding van de rivier, ondiepe uiterwaardplassen in de bovenstroomse delen van de Rijntakken vaker en langduriger zullen droogvallen waardoor veranderingen in waterplantengemeenschappen zullen optreden. Moeras- en waterplanten die bestand zijn tegen tijdelijke droogval profiteren hiervan, zoals kranswieren, watergentiaan en soorten van het N2000 habitat slikkige rivieroever.

Soorten die slecht bestand zijn tegen droogval, met name drijvende waterplanten, worden benadeeld, bijv. gele plomp. Bedekking van ondergedoken waterplanten zal juist toenemen met afname van de overstromingsduur (Van Geest, 2005). Ook de toename van tijdelijke droogval is gunstig voor ondergedoken waterplanten. Onbekend is wat het uiteindelijke resultaat is van hogere temperatuur (negatief voor ondergedoken waterplanten) versus verminderde overstroming en meer droogval (positief voor ondergedoken waterplanten). Naar verwachting is het resultaat netto positief, omdat tijdelijke droogval en overstroming sterke triggers zijn voor ondergedoken waterplanten. Het uiteindelijke resultaat hangt sterk af van de startcondities in april/mei, terwijl hier juist de grootste onzekerheid zit wat betreft verandering van waterpeilen. Droge voorjaren, zoals in 2018, 2019 en 2020, pakken negatief

uit voor waterplanten. Veel ondiepe uiterwaardplassen zijn in die jaren dan ook dichtgegroeid met helofyten.

Rivierfonteinkruid is daarentegen een plant die profiteert van hogere watertemperaturen en zich sterk uitgebreid heeft in het Maasdal, de IJssel en recent ook in de Nederrijn-Lek (Kurstjens *et al.*, 2010; Reeze *et al.*, 2020; W. Liefveld *pers. obs.*).

4.2 Ongewervelden en macrofauna

De groep ongewervelden in rivieruiterwaarden die door klimaatverandering beïnvloed worden is zeer divers en soortenrijk. In deze studie is het onmogelijk om alle ongewervelden soortgroepen te bespreken. Wel wordt dieper ingegaan op een aantal groepen die veel in uiterwaarden voorkomen en een belangrijke rol in het voedselweb spelen: sprinkhanen, vlinders, libellen en aquatische macrofauna.

Terrestrisch: Sprinkhanen, vlinders en libellen

Sprinkhanen, vlinders en libellen zijn gebonden aan de terrestrische habitats in uiterwaarden. Uitzondering zijn libellen die als larf in het water opgroeien. Adulte libellen zijn echter mobiel en gebruiken terrestrische habitats. Er worden veel soorten in de Nederlandse uiterwaarden aangetroffen, dichtheden zijn lokaal hoog (Lammertsma *et al.*, 2001). Sprinkhanen en vlinders volbrengen hun levenscyclus op het land, sommige soorten zijn echter in enige mate robuust tegen inundatie. Een veranderend klimaat kan zowel positief als negatief voor de soortgroepen uitpakken. Populaties van warmte minnende, zuidelijke soorten libellen zijn de laatste jaren door klimaatopwarming toegenomen (Termaat *et al.*, 2019; Van Swaay *et al.*, 2021). Deze soorten profiteren duidelijk van de hogere temperaturen. De geografische oriëntatie van Maas en Rijn van zuid naar noord lijkt een belangrijke verspreidingsvector. Noordelijke soorten zijn daarentegen niet toegenomen, er lijkt zelfs sprake te zijn van een lichte afname. Deze soorten zijn geassocieerd met lagere temperaturen, ze zijn daarmee gevoeliger voor klimaatopwarming.

Ook voor vlinders wordt het effect waargenomen dat zuidelijke, warmte minnende soorten zich noordwaarts verschuiven (gehakelde aurelia, bont zandoogje, koninginnenpage, Termaat *et al.*, 2019; Van Swaay *et al.*, 2021). Klimaatverandering resulteert ook in vervroegde vliegtijden van verschillende vlindersoorten, het afgelopen decennium is de gemiddelde vliegtijd van soorten ca. 10 dagen vervroegd (Wallis de Vries, 2016). Voor sommige soorten loopt dit synchroon met de vervroegde ontwikkeling van waardplanten, voor andere soorten ontstaat er echter een mismatch. De rupsen verschijnen dan eerder dan de voedselplanten of andersom, de voedselplanten zijn al zover ontwikkeld dat rupsen achterblijven. Daarnaast blijkt zowel extreme droogte als hevige (zomer)neerslag negatief voor de overleving van eieren, rupsen en/of adulten. Uiteindelijk zijn er maar een paar soorten vlinders die baat hebben bij klimaatopwarming, veel andere soorten zijn juist klimaatgevoelig.

Wanneer als gevolg van klimaatverandering het areaal hoogwatervrije zones afneemt, neemt het areaal dat geschikt is als leefgebied voor eieren en rupsen van vlinders navenant af: de meeste vlindersoorten zijn niet bestand tegen langdurige inundatie, zowel als ei, pop of imago (Lammertsma *et al.*, 2001). Soorten die in bomen of struiken overwinteren (bv. Sleedoornpage) hebben wat dit betreft een voordeel omdat deze mogelijk hoogwatervrij blijven. De diversiteit aan terrestrische ongewervelden neemt dan ook toe naarmate de overstromingsfrequentie afneemt (Lammertsma *et al.*, 2001). Het gaat hierbij zowel om zomer- als winterinundaties.

Sprinkhanen zijn sterk warmte minnende soorten, de trends van de meeste inheemse soorten nemen de laatste jaren toe (CBS, 2021). Klimaatopwarming lijkt voor deze groep

insecten relatief gunstig uit te pakken. Net zoals voor libellen en vlinders zijn er ook voor sprinkhanen trends te zien waarbij zuidelijke, warmte minnende soorten in verspreiding toenemen of zich in Nederland vestigen. De gouden sprinkhaan heeft zich bijvoorbeeld langs de Maas uitgebreid (Boeren, 2006). Naast dat de soort warmte minnend is en profiteert van opwarming, is het feit dat de soort eieren in dood hout afzet een belangrijke verspreidingsvector in rivier- en beekdalen. Het hout wordt door hoogwater verplaatst waardoor nieuwe gebieden stroomafwaarts gekoloniseerd kunnen worden. Directe inundatie is voor veel sprinkhanen desastreus waarbij eieren en/of larven sterven (Lammertsma *et al.*, 2001). Sommige soorten zijn echter enigszins robuust tegen inundatie zoals moerassprinkhaan en gewoon spitskopje. Het zeggedoorntje is daarnaast sterk geassocieerd met rivieruiterwaarden en heeft een levenscyclus (zowel één- als tweejarig) met een snel rekolonisatievermogen waardoor ze lokale catastrofes zoals hoogwater kunnen overleven.

Voor veel insecten die hun larvale levensstadium in het water doormaken, is de inundatie van het winterbed in het groeiseizoen juist gunstig, mits deze lang genoeg duurt. In dat geval fungeert het winterbed echt als overstromingsvlakte (zie hier onder).

Aquatisch: macrofauna

Het effect van hogere watertemperaturen op aquatische macrofauna is divers. In alpiene riviertjes in het stroomgebied van de Durance (Frankrijk) is bijvoorbeeld een duidelijk effect aangetoond van klimaatopwarming op aquatische macrofauna waarbij koude-tolerante soorten sterk zijn afgenomen en vervangen zijn door warmte-tolerante soorten (Bruno *et al.*, 2019). Hierbij is aangetoond dat vooral relatief kleine macrofauna soorten, die meerdere voortplantingscycli per jaar hebben, dichte eipakketten afzetten en die zich kunnen verspreiden door de lucht, in het voordeel zijn in een warmer klimaat (hogere watertemperatuur, piekafvoeren en droogte). Sommige aquatische macrofauna blijken juist relatief robuust te zijn tegen klimaat opwarming. Hering *et al.* (2009) geeft aan dat schietmotten die in onze klimaatregio voorkomen relatief ongevoelig zijn voor hogere watertemperaturen.

Een recent experiment van Majdi *et al.* (2020) in de Garonne (Frankrijk) gaf aan dat een stijging van de watertemperatuur van ca. 2 °C (zowel de gemiddelde temperatuur als verschillen tussen dag- en nachttemperatuur) resulteerde in een sterke groei van de bentische cyanobacteriegemeenschap. Dit had sterke veranderingen tot gevolg van de 'grazende' micro- en macrofauna gemeenschap. Dichtheden en biomassa van bentische wormen (nematoden en oligochaeten) namen sterk toe terwijl de dichtheden Chironomiden, juveniele korfmosselen, klein kreeftachtigen (eenooig- en mosselkreeftjes, nauplii) en larven van haften juist sterk afnamen.

Klimaatverandering kan ook positief uitpakken voor soorten van stromend water. Zo werden in 2020 in de benedenlopen van Swalm en Roer negendoornige wintersteenvliegen aangetroffen. Dit is een Midden-Europese soort die zich door hogere watertemperaturen noordwaarts lijkt uit te breiden en zich langs de Limburgse Maas aan het vestigen is (Tolkamp & Drukker, 2020). Als het gaat om dit soort geleidelijke opschuivingen van soorten kunnen we daar vaak goed mee leven. De invasieve opmars van exoten wordt vaak met heel andere ogen bekeken. De maximale temperatuur tolerantie van exotische mollusken is in de Rijn hoger dan van inheemse mollusken lager waardoor inheemse mollusken gevoeliger zijn voor hogere watertemperaturen ten gevolge van klimaatverandering (Verbrugge *et al.* 2012, Collas *et al.* 2018). In het algemeen zijn veel exoten beter ook bestand tegen wisselende omstandigheden (vaak een snellere reproductie) waardoor ze bij klimaatverandering in het voordeel zijn ten opzichte van inheemse soorten. Verder spelen bij de snelle verspreiding van exoten heel andere factoren een rol (zoals onnatuurlijke verbindingen tussen stroomgebieden).

Soorten die kenmerkend zijn voor stromende wateren zijn meestal gevoelig voor lage zuurstofgehalten. Vaak zijn ze ook geassocieerd met schone, slibvrije of -arme bodems.

Stagnatie van de waterstroom kan verlaging van het zuurstofgehalte tot gevolg hebben (versterkt door opwarming als bijv. een meestromende nevengeulen geïsoleerd raakt van de rivier), of zorgen voor slibophoping op het bodemsubstraat. Soorten die hier last van hebben zijn bijv. EPT soorten (soorten van de families Ephemeroptera, Plecoptera en Trichoptera - haften, steenvliegen en schietmotten, bijv. schoraas en oeveraas) en zoetwatermosselen zoals bolle stroommossel en schildersmossel die in stromend water leven. Stagnatie van de waterstroom in met name meestromende nevengeulen in het voorjaar en zomer door lagere rivierafvoeren zal negatief uitpakken voor de soorten.

Naast temperatuur wordt aquatische macrofauna beïnvloed door de toenemende hydrodynamiek in uiterwaardwateren als gevolg van klimaatverandering. Het effect op de soort hangt samen met de levensstrategie. Kurstjens *et al.* (2020) deelde aquatische macrofauna van overstromingsvlakten en uiterwaardwateren in verschillende groepen in gebaseerd op Verberk *et al.* (2008) en Moller-Pillot (2003):

- Circulerende soorten: mobiele soorten, kortlevende adulten, korte voortplantingspieken met massale reproductie, zeer snelle larvale ontwikkeling, voortplanting in meerdere generaties per jaar. Voorbeelden zijn platbuiklibel, verschillende soorten muggen, schaatsenrijders uit het genus *Gerris*.
- Habitatwisselaars: mobiele soorten die meerdere habitats gebruiken tijdens hun levenscyclus, snelle larvale ontwikkeling en langlevende adulten. Voorbeelden zijn waterkevers zoals veengeelgerande waterkever (*Dytiscus dimidiatus*) en kevers van het genus *Agabus*.
- Permanente soorten: generalistische soorten, permanent aanwezig in meerdere watertypen, lange voortplantingsperiode, langlevende, grote adulten met snelle larvale ontwikkeling door aanpassingen zoals grote eieren, broedzorg en/of specifieke ei-afzetplekken tijdens hun levenscyclus, óf kleinere adulten met massale reproductie maar lagere larvale overleving. Voorbeelden zijn verschillende soorten muggen en waterkevers
- Foerageerders: mobiele soorten die uiterwaarden alleen gebruiken om voedsel te verzamelen, ze planten zich voort en overleven op andere locaties. Voorbeelden zijn libellen.
- Resistente soorten: specialisten die zijn aangepast aan één specifiek habitat, kunnen vaak langere tijd ongunstige omstandigheden overleven. Ze hebben doorgaans specifieke aanpassingen zoals resistente eieren of adulten, gesynchroniseerde en snelle larvale ontwikkeling. Veelal lage reproductie maar hoge overleving door bijv. grote eieren en/of specifieke eiafzetplekken. Voorbeelden zijn kieuwpootkreeftjes en de dansmug *Hydrobaenus lugubris*.
- Schuilende soorten: mobiele soorten die soms tijdelijk uitsterven in een bepaald habitat maar overleven in andere suboptimale habitats en van daaruit andere habitats herkoloniseren. Voorbeelden zijn verschillende dansmuggen.

Kurstjens *et al.* (2020) benoemt verschillende effecten van klimaatverandering in aquatische habitats in uiterwaarden zoals droogval, hoge watertemperaturen, lage zuurstofconcentraties, hoge stroomsnelheden bij inundatie en het verdwijnen plantengroei door erosie/sedimentatie. Soorten die een korte aquatische levensfase hebben of die een strategie hebben die droogval kan overleven (aanpassingen van eieren en larven) zijn relatief robuust tegen droogval, soorten die lang in het water verblijven zijn vanzelfsprekend gevoelig. Tot de laatste soorten horen veel libellen larven, die hiermee relatief gevoelig zijn. Soorten die permanent in aquatische habitats verblijven hebben soms aanpassingen om droogte tijdelijk te overleven zoals de slaapslak en geronde schijfhoren. In tegenstelling tot de temperatuur tolerantie is bij mollusken geen verschil in gevoeligheid voor uitdroging aangetoond tussen inheemse en uitheemse soorten. Wel bleek droogval een hele belangrijke factor te zijn in het voorkomen van mollusken (Collas *et al.*, 2014).

Wat specifiek het effect is van toenemende hydrodynamiek op macrofaunasoorten in de Nederlands rivieren is niet goed bekend. Doretto *et al.* (2019) toonde in Alpiene rivieren aan dat dergelijke vloedgolven en bijbehorende sedimenttransporten de macrofauna in elk geval sterk veranderde en dat dit effect tenminste meer dan een jaar zichtbaar bleef op de populatiesamenstelling. Dit zou in Nederland van toepassing kunnen zijn op de macrofauna in de hoofdstroom, bijvoorbeeld in dynamische riviertrajecten als de Grensmaas.

4.3 Vissen

Ook op vissen zullen de effecten van klimaatverandering in het rivierengebied invloed hebben. Vissen zijn exotherm en zullen dan ook in hun fysiologie en biochemische processen beïnvloed worden door hogere watertemperaturen. Ook soorten die sterk gebonden zijn aan een specifieke range van stroomsnelheid zullen al snel effect ondervinden van veranderende stromingspatronen als gevolg van veranderende afvoerdynamiek. Dit soort effecten zijn al wereldwijd beschreven (Van Vliet *et al.*, 2013b) en beschouwen wij in deze paragraaf voor de Rijn en de Maas.

Inheemse vissen worden in Nederland ingedeeld in ecologische gilden: plantminnende (limnofiele) vissen, stromingsminnende (rheofiele) vissen en generalisten (eurytopen). Deze gilden zijn tevens gekoppeld aan habitat associaties. Plantminnende vissen zijn geassocieerd met laag-dynamische wateren in uiterwaarden die niet of weinig overstromen en waar veel moeras- en waterplanten groeien, stromingsminnende vissen zijn (voor een deel van hun levenscyclus) gebonden aan stromend water (in de hoofdgeul van de rivier, of in meestromende nevengeulen) terwijl generalisten in uiteenlopende watertypen voorkomen in de hoofdstroom van de rivier en in hoog- en laagdynamische uiterwaarden. De visgilden kunnen op verschillende manieren beïnvloed worden door klimaateffecten die in dit onderzoek eerder zijn besproken:

- Afname van areaal en duur van (vroege) voorjaar inundaties;
- Wegvallen van de waterstroming;
- Toename van plotseling inundaties door zomerhoosbuien;
- Droogval van uiterwaardwateren;
- Stijgende watertemperaturen.

De te verwachten gevolgen van deze klimaateffecten voor vis worden onderstaand toegelicht.

Afname van areaal en duur van (vroege) voorjaar inundaties

Veel vissoorten maken gebruik van (tijdelijke) overstromingsvlaktes. Dit zijn laaggelegen zones langs de rivier die bij hoge rivierafvoeren in de late winter of vroege voorjaar overstromen en waar vervolgens enkele weken tot maanden water blijft staan. Ze kunnen enerzijds rechte reeks bereikbaar zijn voor vissen die de rivier als hoofdhabitat gebruiken (bijv. brasem, blankvoorn en winde), of ze zijn indirect bereikbaar voor vissen die in de zomer geïsoleerde (moeras)plassen als hoofdhabitat gebruiken (bijv. rietvoorn, zeelt, bittervoorn, vetje en grote modderkruiper). De overstromingsvlaktes worden door vissen veelal gebruikt als foerageer, paai- of opgroeigebied (Dorenbosch *et al.*, 2020). De ontwikkeling waarbij voorjaarsoverstromingen in combinatie met rivierinsnijding zich steeds vroeger in het jaar voordoen heeft twee gevolgen. Ten eerste verschuift de inundatiegolf vroeger naar het voorjaar. De uiterwaarden staan eerder onder water maar vallen ook vroeger weer droog. Dit valt vaak niet goed samen met de voortplantingsperiode van vissen. Met uitzondering van kwabaal en snoek paaien de meeste soorten later in het voorjaar. Vervroeging van de voorjaarsinundatie zorgt voor een 'mismatch' met de voortplantingsperiode van de meeste soorten, het hoge water komt te vroeg en is alweer verdwenen als de vissen actief worden. Dit wordt versterkt door het verder insnijden van de rivier. Uiterwaarden komen steeds hoger te liggen ten opzichte van de rivierstand, waardoor ze pas bij hogere waterstanden overstromen en ook snel weer droogvallen. Een soort als

kwabaal (en deels ook snoek) is in extreme mate afhankelijk van overstromingsvlaktes: de soort plant zich in de winter voort waarna de juvenielen opgroeien in de overstroomde uiterwaarden (Kurstjens *et al.*, 2020). Te vroege droogval in het voorjaar zorgt voor het mislukken van voortplanting, dit is één van de hoofdredenen van het verdwijnen van deze soort uit het Nederlandse rivierengebied.

Wegvallen van de waterstroming

Klimaatverandering zal in sommige riviertrajecten zorgen voor het eerder/vaker stagneren van de waterstroom. De afvoer en/of waterstand van de rivier is dan zodanig laag dat meestromende geulen steeds eerder geïsoleerd raken waarbij de waterstroom stopt (Collas *et al.* 2020), of dat de doorstroming in gestuwde rivierpanden wegvalt. Met name in de benedenlopen van de rivieren zal de stroming bovendien extra afnemen, door de opstuwende werking van de stijgende zeespiegel. Dit heeft logischerwijs vooral effect op stromingsminnende soorten (Liefveld & Jesse 2006). Deze groep vissen omvat soorten die als individu afhankelijk zijn van stromend water, ze hebben continue hoge zuurstofgehalten nodig om te kunnen ademen (bijv. zalm, zeeforel, barbeel en rivierprik). Sommige soorten hebben continu stromend water nodig voor de voortplanting. Eieren worden afgezet op schone zand- of grindsubstraten, zowel de eieren als net geboren larven zijn gevoelig voor lage zuurstofgehalten die ontstaan als de waterstroom wegvalt (bijv. serpeling, sneep en rivierprik) (Ertsen *et al.*, 2000).

Toename van plotseling inundaties door zomerhoosbuien

Over het effect van plotselinge inundaties door zomerhoosbuien op vissen in Nederland is weinig bekend. In juli 2021 was er sprake van een dergelijk zomerhoogwater in de Maas, de Waal en de IJssel. Buitenlandse studies in Alpiene rivieren geven enerzijds aan dat dit soort hoogwatergolven met beperkt sedimenttransport relatief weinig impact hebben op vis (Espa *et al.*, 2014), terwijl hoogwatergolven met meer sedimenttransport juist sterk negatieve effecten op het visbestand hebben (Crosa *et al.*, 2009). Na het zomerhoogwater in 2021 werden op diverse plekken in de uiterwaarden van Maas en Rijn takken dode vissen aangetroffen. De fysieke kracht van het water en drijvende objecten en indirecte effecten als opwervend slib kunnen dus lokaal (en tijdelijk) negatief uitpakken voor vissen in Nederlandse rivieruiterwaarden.

Droogval van uiterwaardwateren

Het droogvallen van uiterwaardwateren is vanzelfsprekend desastreus voor vissen die in het betreffende water leven. Alleen grote modderkruiper en kroeskarper zijn bestand tegen korte periodes van droogval. Beide soorten trekken zich terug in de modder van een droogvallend water en overleven op deze wijze enkele weken van droogval. Als het water vervolgens terugkeert zijn er geen concurrerende vissen meer aanwezig.

Andere vissoorten zijn niet bestand tegen droogval. Indien een water na een overstroming geïsoleerd raakt en droogvalt gedurende de zomer kunnen alle aanwezige vissen in één keer sterven (Dorenbosch & Schoor, 2021). Er zijn wel soorten met een snelle reproductiecyclus die in korte tijd hoge dichtheden kunnen bereiken zoals vetje. Deze pionierssoort gedijt het beste en komt in hoge aantallen voor als de concurrenten zijn verdwenen, bijvoorbeeld na droogval. Deze strategie stelt het vetje in staat om in korte tijd uiteenlopende wateren te koloniseren waardoor het lokaal uitsterven van een deelpopulatie gecompenseerd wordt met de snelle uitbreiding van andere deelpopulaties die wel overleven.

Klimaatverandering zal tot gevolg hebben dat het vroeger in het voorjaar warmer wordt en er vaker hittegolven en langere droogteperiodes zullen zijn. In combinatie met het uitblijven van voorjaarshoogwaters en rivierinsnijding ligt het in de lijn der verwachting dat ondiepe geïsoleerde plassen in uiterwaarden sneller en vaker droog gaan vallen. Lokaal kan dit populaties sterk schaden, vooral in uiterwaarden waar weinig diepte variatie in ondiepe wateren aanwezig is. Ook door het verlanden van plasjes doordat ze ondieper worden en dichtgroeien met helofyten kunnen uiterwaardwateren verdwijnen (Van Geest *pers. com.*). Er zijn dan onvoldoende wateren over waarin vissen kunnen overleven. Dit geldt vooral voor de soorten die zich terugtrekken in ondiepe moerassen zoals zeelt, rietvoorn, bittervoorn, kleine

modderkruiper en vetje. Ook soorten die droogval kortstondig kunnen overleven zoals grote modderkruiper en kroeskarper worden mogelijk toch geschaad door droogval (Figuur 4.1). Indien droogval vroeg in de zomer optreedt en ook de modderlaag uitdroogt, sterven deze soorten mogelijk alsnog (exacte gegevens ontbreken echter).



Figuur 4.1: Grote modderkruiper werd in 2019 in droogvallende poelen aangetroffen in de overstromingsvlakte Loevestein (foto: M. Dorenbosch).

Figure 4.1: In 2019, European weatherfish was found in drying ponds in floodplain of Loevestein (photo: M. Dorenbosch).

Stijgende watertemperaturen

Klimaatverandering zal ook resulteren in hogere watertemperaturen. Hogere watertemperaturen zal resulteren in een lagere zuurstofoplosbaarheid. In stilstaande, ondiepe wateren kan in combinatie met een hoge zuurstofvraag door planten en algen 's nachts en/of door afbraakprocessen in de zomer, de zuurstofconcentratie tijdelijk sterk dalen. In sommige gevallen daalt de zuurstofconcentratie zo sterk dat vissen in acute zuurstofstress komen en kunnen sterven. Hoge watertemperaturen beïnvloeden ook het metabolisme van (koudbloedige) vissen. Alle vissen hebben een maximale temperatuur grens, boven deze grens treedt schade op. De gevoeligheid voor zuurstofstress en hoge watertemperaturen verschilt echter sterk per soort. Sommige soorten zijn goed aangepast en kunnen hoge temperaturen en lage zuurstofgehalten prima doorstaan. Dit betreffen in ieder geval soorten die geassocieerd zijn met ondiepe plantenrijke wateren zoals zeelt, kleine- en grote modderkruiper en rietvoorn.

Stroomminnende soorten zijn doorgaans gevoelig voor zuurstofstress en hebben vaak ook een lage maximale temperatuur zoals rivierdonderpad, serpeling, zal, zeeforel en rivierprik. Vooral deze groep soorten is gevoelig voor opwarming ten gevolge van klimaat. Murdoch *et al.* (2020) toonde een afname aan van salmoniden in de Mackenzie river in Canada die o.a. te relateren was aan hogere watertemperaturen.

Andere stroomminnende soorten zijn wel gevoelig voor zuurstofstress, maar zijn beter bestand tegen hogere watertemperaturen zoals biermpje, sneed en barbeel. De meest temperatuurgevoelige inheemse vissoort in het rivierengebied is kwabaal. Dit is een soort met een arctische verspreiding die zich in de winter voortplant. De volwassen dieren zijn slecht bestand tegen hoge zomertemperaturen, vermoedelijk één van de mechanismen dat de soort vrijwel verdwenen is uit de Nederlandse rivieren.

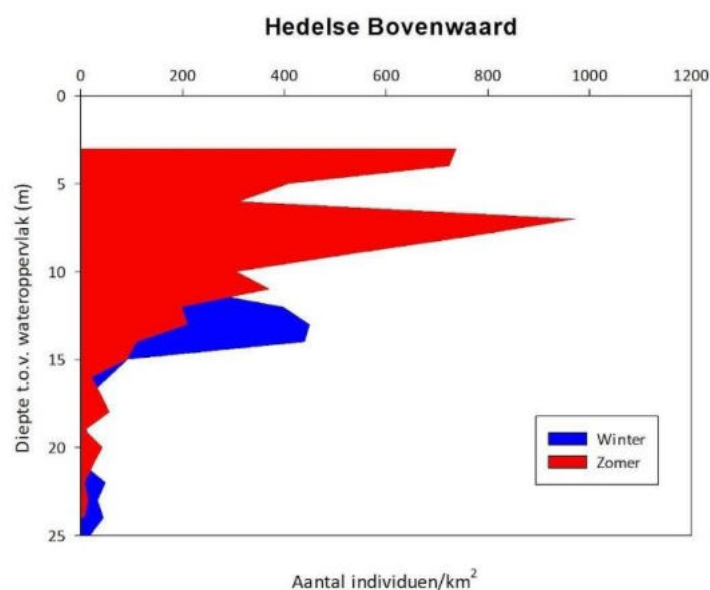
In de winter aggregeren riviervissen zich vaak in clusters in diepere delen van de rivier of aangetakte uiterwaardplassen. Deze overwinteringsclusters zijn gebaat bij een zo constant

mogelijk temperatuur, te hoge wintertemperaturen zijn ongunstig voor de overleving van de overwinterende vissen.

Inheemse vissen in de Rijn blijken gevoeliger te zijn voor hogere watertemperaturen dan exotische vissen (met name Ponto-Kaspische grondels), exoten lijken hierbij een concurrentievoordeel te hebben ten opzichte van inheemse soorten (Leuven *et al.*, 2011, Elshout *et al.*, 2013). Dit mechanisme speelde waarschijnlijk een grote rol in de snelle opmars van zwartbekgrondel in de Maas omstreeks 2012 waarbij de inheemse rivierdonderpad vrijwel volledig uit de rivier is verdwenen (Van Kessel *et al.*, 2016). Hierbij wordt opgemerkt dat klimaatverandering vaak niet de belangrijkste factor bij de verspreiding en immigratie van nieuwe soorten is. Wel kan klimaatverandering voor sommige soorten de vestiging faciliteren en kan het de abundantie van exoten sterk beïnvloeden, waarbij zachtere winters tot hogere abundanties leiden (Van de Haterd *et al.*, 2020).

Diepe plassen als overwinteringsgebied

De relatief constante wintertemperatuur maakt diepe plassen een geschikt overwinteringsgebied voor riviervissen, vooral als ze aangetakt zijn aan de rivier (Verstijnen *et al.*, 2022). Hoewel het mechanisme in Nederland slecht beschreven is, zijn er enkele gevallen bekend van winterclusterende vissen in diepe, buitendijkse plassen. Ook in het OBN-onderzoek diepe plassen zijn overwinterende vissen aangetoond op grotere diepte in diepe uiterwaardplassen (Figuur 4.2).



*Figuur 4.2: Juveniele vissen (rode pieken) houden zich in de zomer vooral op in de ondiepe zone van de Hedelse Bovenwaard (Maasplas), in de winter concentreren adulten en 1^{ste} jaars vissen zich in de diepere zones (blauwe pieken) van de plas (sonar-data, Verstijnen *et al.*, 2022).*

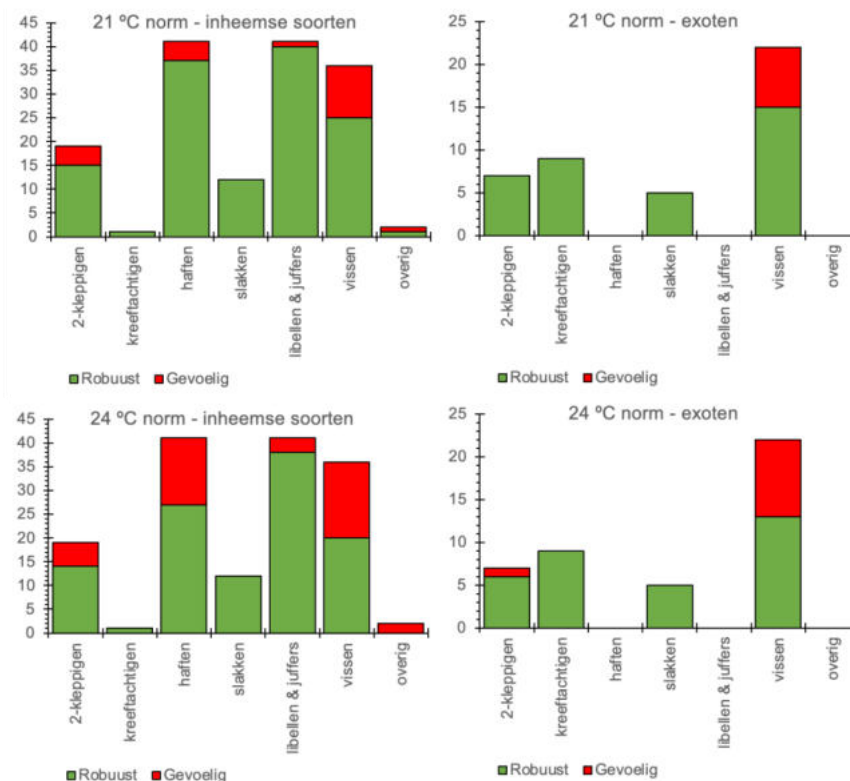
*Figure 4.2: During the summer juvenile fish (red spikes) are mostly found in the shallow areas of the Heldelse Bovenwaard (a gravel pit along the river Meuse), in the winter adult fish and young of the year concentrate in the deeper areas (blue spikes) of the gravel pit (sonar-data, Verstijnen *et al.*, 2022).*

4.4 Effecten opwarming op aquatische fauna

Voor een aantal aquatische fauna (195 soorten) die in het Nederlandse rivierengebied voorkomen zijn door de Radboud Universiteit Nijmegen (database: Frank Collas) kritische watertemperaturen uit de literatuur verzameld. Op basis van de voorgaande paragrafen is

vastgesteld dat in het huidige klimaat een watertemperatuur van 21 °C een maat is voor een maximale watertemperatuur waar aquatische soorten nu regelmatig in de zomer aan worden blootgesteld. Tevens is aannemelijk gemaakt dat in een opwarmend klimaat de maximale watertemperatuur waar soorten aan worden blootgesteld zal stijgen tot 24 °C. Door beide temperaturendrempels in te stellen als kritische temperatuur, kan een inschatting gemaakt worden in hoeverre de verdeling temperatuur-robuste en -gevoelige aquatische soorten gaat veranderen in een warmer klimaat. Soorten met een kritische temperatuur boven de drempelwaarden (21 of 24 °C) kunnen we beschouwen als robuuste soorten, soorten met een kritische temperatuur onder de drempelwaarden (21 of 24 °C) als gevoelige soorten, bij de betreffende klimatologische omstandigheden. Figuur 4.3.3 geeft de uitkomst van deze analyse weer, waarbij ook onderscheid is gemaakt tussen inheemse en exotische soorten.

Als gevolg van klimaatopwarming komt een grotere groep aquatische faunasoorten in de kritische temperatuurrange, vooral voor de groepen haften en vissen (Figuur 4.3). Soorten uit deze groepen zullen waarschijnlijk veel meer stress en/of schade ervaren bij een stijgende watertemperatuur. Voor exoten verandert er relatief weinig, de meeste exoten zijn relatief robuust voor hogere watertemperaturen, meer dan inheemse soorten (Verbrugge et al., 2012, Collas et al., 2018).



Figuur 4.3: Indeling van 195 aquatische faunasoorten in temperatuur robuuste en – gevoelige soorten bij een watertemperatuur drempel van 21 °C (huidige klimaat, boven) en van 24 °C (opwarmend klimaat, onder). Soorten met een kritische temperatuur (afgeleid uit de literatuur en database F. Collas) boven de drempelwaarde van 21 of 24 °C worden beschouwd als robuust, soorten met een kritische temperatuur onder de drempelwaarde als gevoelig. Er is onderscheid gemaakt tussen inheemse (links) en exotische soorten (rechts).

Figure 4.3: Classification of 195 aquatic species in temperature robust and - sensitive species at a water temperature threshold of 21 °C (current climate, above) and 24 °C (warming climate, below). Species with a critical temperature (derived from literature and the database of F. Collas) above the threshold value of 21 or 24 °C are seen as robust, species with a critical temperature below these values as sensitive. A distinction is made between native (left) and exotic species (right).

4.5 Amfibieën

Amfibieën zijn voor hun voortplanting afhankelijk van water voor het afzetten van eieren en het opgroeien van larven. Na de metamorfose zijn juveniele en adulte amfibieën minder afhankelijk van water en leven ze op het land. In het Nederlandse riviereengebied komen een aantal soorten frequent voor. Voor kikkers en padden zijn dit gewone pad, rugstreeppad, poelkikker, bastaardkikker, meerkikker en bruine kikker; voor salamanders zijn dit kleine watersalamander en Alpenwatersalamander. Ook enkele zeldzamere soorten amfibieën worden in uiterwaarden waargenomen: heikikker, kamsalamander (beide zeldzaam) en knoflookpad (zeer zeldzaam).

Wat betreft klimaatverandering zijn twee sturende mechanismen van invloed op het overleven van amfibieën in buitendijkse rivieruiterwaarden: inundatie door de rivier en het effect van meer zonneschijn op straling en droogte. Tabel 4.1 geeft een samenvattend overzicht van de gevoeligheid van amfibieën die in Nederlandse uiterwaarden voorkomen voor effecten van klimaatverandering.

Tabel 4.1: Overzicht van de gevoeligheid voor effecten van klimaatverandering van Nederlandse amfibieën die in rivieruiterwaarden voorkomen.

Table 4.1: Overview of the sensibility for climate change of amphibians living in the floodplains of Dutch rivers.

Soort:	Voortplantingsperiode:		Minimale ontwikkelingstijd ei - juveniel (weken):	Overwinterings- habitat:	Gevoeligheid:			
					1) inundatie in late winter	2) kolonisatie door vis	3) verdwijnen tijdelijke kwel- of overstromings- wateren	4) droogval begin zomer
Alpenwatersalamander	april	augustus	10	land				
kamsalamander	april	augustus	14	land				
kleine watersalamander	maart	augustus	10	land en water				
knoflookpad ²	april	augustus	16	land				
gewone pad	maart	juli	10	land				
rugstreeppad ¹	april	juli	8	land				
heikikker	maart	juli	10	land				
bruine kikker	maart	juli	10	land en water				
groene kikker complex ^{1,3}	mei	september	10	land en water				

¹ gespreide voortplanting over lange periode

² vrijwel uitgestorven in buitendijkse uiterwaarden

³ soortcomplex van poel-, bastaard- en meerkikker

gevoelig

weinig gevoelig

Effect van inundatie

Een van de voorspelde gevolgen van klimaatverandering is verhoogde afvoer in de wintermaanden waarbij winterinundaties langer en/of vaker voorkomen. Inundatie in de winter kan sommige overwinterende amfibieën direct bedreigen. Rugstreeppad kan niet overleven als het buitendijkse overwinteringshabitat onderwater loopt, ze verdrinken (Bosman *et al.*, 1997). Ook van Alpenwater- en kamsalamander, knoflookpad, gewone pad en heikikker wordt aangenomen dat overwintering hoofdzakelijk buiten het water plaatsvindt en de soorten slecht bestand zijn tegen inundatie in de winter (Creemers & Van Delft, 2009). Van kleine watersalamander, bruine kikker en groene kikker (soortcomplex van poel-, bastaard- en meerkikker) is wel bekend dat overwintering in het water plaatsvindt. Deze soorten zijn robuust tegen inundatie.

Uit buitenlandse riviersystemen is daarnaast bekend dat hoogwatergolven vroeg in het voorjaar migrerende en voortplantende amfibieën kunnen wegspoelen (Creemers, 1994). Algemeen kan gesteld worden dat klimaatverandering, waarbij de inundatiefrequentie of – duur toeneemt, resulteert in een afname van het areaal geschikt overwinteringshabitat. Dit

is vooral relevant voor buitendijkse arealen die nu nooit inunderen zoals hoogwatervrije steenfabrieken of oeverwallen.

Inundatie door de rivier heeft nog een neveneffect op het voortplantingssucces van amfibieën in uiterwaarden: Overstroming van potentiële voortplantingswateren door rivierwater zorgt doorgaans voor kolonisatie door vissen. Vissen fungeren voor de meeste amfibieën als predator van eieren en larven. Alleen van gewone pad, rugstreeppad, groene kikker en kleine watersalamander is bekend dat larven ook kunnen volgroeien in wateren met een beperkte visbezetting. Kolonisatie van een voortplantingswater door vis is een belangrijke factor die de voortplanting van de meeste amfibieën in uiterwaarden negatief beïnvloedt.

De huidige klimaatmodelleringen voor rivierinundaties voorspellen echter relatief weinig veranderingen in het jaarlijks maximum areaal dat inundeert tijdens een winterhoogwater (inundatieduur van tenminste 1 dag per jaar). Het huidige buitendijkse areaal dat nooit overstromt en geschikt is als hoogwatervrij overwinteringshabitat voor amfibieën (inundatieduur < 1 dag per jaar) zal daarom relatief weinig veranderen. In de benedenloop van de Maas (ten westen van Oss) en Rijntakken (Waal ten westen van Zaltbommel, Lek ten westen van Culemborg, IJssel ten noorden van Deventer) liggen lager gelegen uiterwaarden, waarvan de inundatieduur- of frequentie toeneemt (inundatieduur van 10, 20 en 60 dagen). In deze gebieden neemt de kans op kolonisatie van potentiële voortplantingswateren van amfibieën door prederende vissen toe onder het klimaatscenario. Dit heeft potentieel negatieve effecten op hier aanwezige amfibieën. Daarnaast worden in recente klimaatscenario's frequenter hoogwatergolven voorspeld in het voorjaar of zomer ten gevolge van hoosbuien (zoals in juli 2021). Deze plotselinge hoogwatergolven kunnen migrerende en voortplantende amfibieën schaden.

Samenvattend hebben veranderingen in inundatiefrequentie en -duur in de winter en vroege voorjaar:

- weinig effect op overwinterende amfibieën;
- een negatief effect op de beschikbaarheid van visvrije voortplantingswateren (frequenter hoogwater vergroot de kans op kolonisatie van geïsoleerde uiterwaardwateren door vis). Dit speelt vooral in de benedenstroomse delen;
- een negatief effect op de migratie en voortplanting in het vroege voorjaar (hoogwatergolven in het vroege voorjaar spoelen migrerende en voortplantende amfibieën weg).

Zoninstraling, UV-B licht en hogere temperaturen

De combinatie van meer zoninstraling, toegenomen verdamping en minder regen in het voorjaar en zomer in een warmer klimaat, zal ertoe leiden dat ondiepe geïsoleerde uiterwaardwateren sneller opwarmen en droogvallen. Daarnaast neemt in extreem ondiepe wateren mogelijk de instraling van UV-B licht toe.

Hogere concentraties UV-B licht beschadigen in sommige gevallen embryo's en larven van amfibieën (Blaustein & Bancroft, 2007). Bancroft *et al.* (2008) vonden in een veldexperiment in de gematigde klimaatzone in Noord-Amerika met vier soorten kikkers, padden en salamanders echter geen effect van verhoogde UV-B stralen op de ontwikkeling van eieren en larven. Ook veldexperimenten van Oromi *et al.* (2008) naar rugstreeppad (Spanje) en van Pakkala *et al.* (2002) naar bruine kikker (Zweden) toonden geen effect van verhoogde UV-B straling aan op de ontwikkeling van eieren en larven. Nagl & Hofer (1997) lieten daarentegen zien dat eieren en larven van Alpenwatersalamander extreem gevoelig zijn voor verhoogde UV-B straling. De studie concludeerde echter ook dat opgelost koolstof in water vrijwel alle schadelijke UV-B straling aan de oppervlakte absorbeert, waardoor in de meeste wateren geen sprake is van schadelijke hoeveelheden UV-B straling. Er zijn vooralsnog geen onderzoeken die aantonen dat hogere UV-B instraling ten gevolge van klimaatverandering in

ondiepe wateren in onze klimaatzone negatieve effecten heeft op de ontwikkeling van eieren en larven van amfibieën die in onze uiterwaarden voorkomen.

Opwarming in het voorjaar en zomer zal ook resulteren in hogere watertemperaturen. Ontwikkende larven van amfibieën lijken echter relatief robuust tegen hoge watertemperaturen. Voor in Nederland voorkomende soorten is nooit experimenteel onderzoek verricht. Maar in twee studies naar kritische lethale temperaturen voor 16 Amerikaanse soorten kikkers, padden en salamanders uit de gematigde klimaatzone, blijkt de temperatuur waarbij schade en/of sterfte plaatsvindt ruim boven de 36 °C te liggen (Cupp, 1980; Katzenberger *et al.*, 2021). Een veldstudie van Bancroft *et al.* (2008) liet zien dat larven van vier soorten kikkers en padden juist hogere watertemperaturen in ondiep water actief opzoeken. Op basis van de beschikbare onderzoeken ligt het niet in de verwachting dat watertemperaturen in voortplantingswateren van amfibieën in Nederlandse uiterwaarden de kritische temperatuur drempel bereiken waarbij schade of sterfte aan larven optreedt die in de literatuur benoemd worden. Ook voor warme klimaatscenario's zoals WHdry, waarbij de watertemperatuur in het voorjaar tot meerdere graden kan toenemen, ligt dit niet in de verwachting. Een neveneffect van hogere watertemperaturen dat recent in de literatuur genoemd wordt, is verhoogde kans op infecties van amfibieën door *Batrachochytrium dendrobatidis* (Bradley *et al.*, 2019). Dit is een schimmelziekte die grote gevolgen voor amfibieën kan hebben waarbij soorten lokaal kunnen uitsterven. In Nederland blijkt de infectie ook voor te komen (Spitzen, 2019). Er zijn vooralsnog echter geen infecties vastgesteld bij amfibiesoorten die in Nederlandse uiterwaarden voorkomen.

Versnelde droogval van voortplantingswateren

Toegenomen verdamping en minder regen in het voorjaar en zomer in een warmer klimaat zal tot eerdere droogval van ondiepe (tijdelijke) voortplantingswateren van amfibieën leiden. Droogval van voortplantingswateren ten gevolge van klimaatverandering is daarmee waarschijnlijk de meest belangrijke factor die de reproductie van amfibieën beïnvloedt. Droogval van een voortplantingswater in de periode dat larven nog niet gemetamorfoseerd zijn zorgt voor acute sterfte van de aanwezige larven. Vroegtijdige droogval in het voorjaar of aan het begin van de zomer zorgt voor vernietiging van de reproductie van een specifiek jaar.

Amfibieën blijken echter enigszins flexibel te zijn in het opvangen van droogval: de watertemperatuur van droogvallende wateren stijgt over het algemeen waardoor de larvale ontwikkelingstijd korter is en metamorfose sneller plaatsvindt (Gomez-Mestre *et al.*, 2013). Bancroft *et al.* (2008) liet ook zien dat amfibielarven juist ondiepe, snel opwarmende zones binnen een water opzoeken waardoor de metamorfose sneller verloopt. Het is tot op heden niet bekend of Nederlandse amfibieën ook op deze wijze vroegtijdige droogval kunnen opvangen. Waarschijnlijk zijn vooral soorten met relatief korte ontwikkelingstijden van ei tot en met larf het meest flexibel om droogval in wateren op te vangen. Dit zijn vooral soorten die vroeg in het voorjaar actief zijn en waarvan de larven al bij relatief beperkte grootte metamorfoserende tot juveniel zoals gewone pad, rugstreeppad, bruine kikker en heikikker. Soorten die later in het seizoen actief worden en/of waarvan de larven lang in het water blijven en pas bij een relatief groot stadium metamorfoserende (kamsalamander en knoflookpad), zijn kwetsbaarder voor droogval van voortplantingswateren.

Er is ook een positieve kant aan droogval: Als dit laat in de nazomer optreedt (als de meeste larve al gemetamorfoseerd zijn) kan het juist gunstig zijn voor de voortplanting van amfibieën in het daaropvolgende jaar. Eventueel aanwezige vissen in een potentieel voortplantingswater (bijv. na een inundatie door de rivier) sterven uit na droogval. In het daaropvolgend jaar is dan weer een visvrij voortplantingswater voor amfibieën beschikbaar.

Kwetsbare soorten voor droogval

Hoewel rugstreeppad een (zeer) korte larvale ontwikkelingstijd heeft, is de soort toch kwetsbaar voor verdroging. Rugstreeppad prefereert zeer ondiepe, tijdelijke wateren waarbij

de larven zich snel ontwikkelen. Deze strategie vormt een goede aanpassing op het koloniseren van hoog dynamische, tijdelijke pionierwateren. Het maakt de soort echter ook kwetsbaar voor klimaatverandering waarbij warme, droge voorjaren resulteren in het plotseling vervroegd droogvallen van deze tijdelijke wateren. Mede door toename van inundatie in de winterperiode, ontstaan mogelijk meer tijdelijke ondiep water zones in het vroege voorjaar. Het is dan de vraag of deze lang genoeg nat blijven om de metamorfose te kunnen doorlopen.

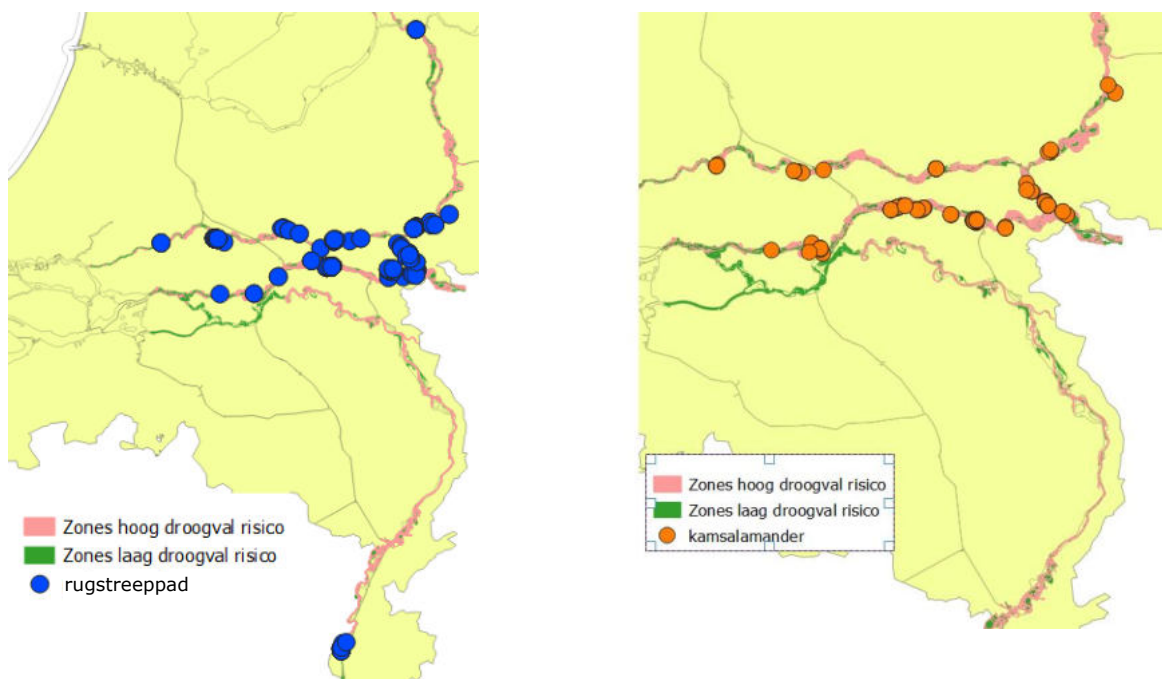
Daarnaast zijn soorten met een lange larvale ontwikkelingstijd kwetsbaar voor (vroegtijdige) droogval. Voor het rivierengebied zijn dit vooral kamsalamander en knoflookpad. Knoflookpad is extreem zeldzaam, de soort is eigenlijk uitgestorven in buitendijkse uiterwaarden maar heeft de langste larvale ontwikkelingstijd van de Nederlandse amfibieën. Kamsalamander komt daarentegen op meer locaties buitendijks in het rivierengebied voor. Frequente droogval van voortplantingswateren voor deze soort kan significante impact hebben op het overleven van de soort waarbij de populatiegrootte drastisch af kan nemen (von Bülow & Kupfer, 2019). Dit is vooral het geval als wateren meerdere jaren achtereen droogvallen.

Samenvattend hebben meer zoninstraling, toegenomen verdamping en minder regen in het voorjaar en zomer bij een warmer klimaat:

- weinig effect op ontwikkelende eieren en larven van amfibieën door verhoogde UB-B straling en verhoogde watertemperaturen;
- een potentieel negatief effect op amfibieën door een verhoogde kans op schimmelinfecties ten gevolge van hogere watertemperaturen;
- een potentieel groot negatief effect op de overleving van larven van soorten met een lange larvale ontwikkelingstijd (kamsalamander) of voorkeur voor extreem ondiepe tijdelijke wateren (rugstreeppad) door vroegtijdige droogval van voortplantingswateren.

Arealen van kamsalamander en rugstreeppad

In *Figuur 4.4* is in beeld gebracht in hoeverre populaties van kamsalamander en rugstreeppad voorkomen in uiterwaarden die minder frequent overstroomd worden en waar een groter risico op droogval ontstaat (*Figuur 4.5*).



Figuur 4.4: Weergave van het voorkomen van rugstreeppad (links, Maas en Rijn) en kamsalamander (rechts, alleen aangetroffen langs de Rijn) in zones die gevoelig zijn voor droogval onder het WHDry scenario (bron data soorten: NDFF-waarnemingen na 2010 in de droogte gevoelige gebieden).

Figure 4.4: Indication of habitats of natterjack toad (left (Meuse, Rhine) and great crested newt (right, Rhine) in areas that are sensitive for drought in the WHDry scenario (source data species: National database Flora & Fauna (NDFF) after 2010 in the sensitive areas).

Uit bovenstaande weergave blijkt dat de kwetsbare soorten kamsalamander en rugstreeppad ook daadwerkelijk voorkomen in uiterwaarden die nu nog regelmatig overstromen en onder het WHDry scenario niet meer (of minder vaak) gaan inunderen (Van Geest *et al.*, 2019).



Figuur 4.5: De Oude Waal in een uiterwaard bij Nijmegen viel in de zomer van 2019 na aanhoudende droogte vrijwel geheel droog (Foto: M. Dorenbosch).

Figure 4.5 The 'Oude Waal' in a floodplain near the city of Nijmegen desiccated completely after a long dry period (Photo: M. Dorenbosch).

4.6 Vogels

Algemeen

Vogels ondervinden in het algemeen vooral indirecte effecten van klimaatverandering, met name via een veranderend voedselaanbod en veranderingen in de vegetatiegemeenschap van hun broedhabitat. Voor migrerende trekvogels kunnen effecten van klimaatverandering ook optreden in broed- of overwinteringsgebieden ver buiten Nederland. Deze klimaatverandering elders kan de aanwezigheid van trekvogels in het Nederlandse rivierengebied in de winter of in voor- en najaar sterk beïnvloeden.

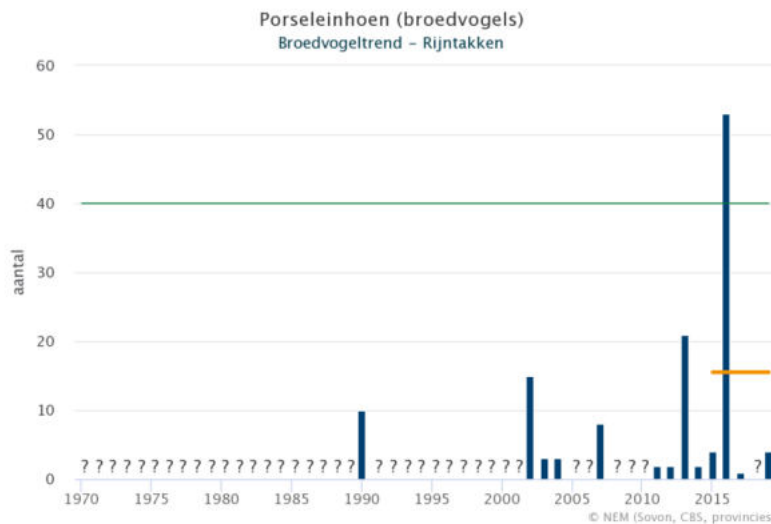
Daarnaast zijn er enkele directe effecten van klimaatverandering langs de rivieren op het broedsucces van vogels, zoals het inunderen van nesten of een ecologische mismatch tussen het optreden van de insectenvoedselpiek en het uitkomen van eieren. Veel vogelsoorten in het rivierengebied hebben het door ingrepen in het water- en landgebruik al moeilijk, een deel van deze effecten wordt versterkt door klimaatverandering.

Veranderende inundatiefrequentie en -duur van de grote rivieren

Door lagere waterstanden in het voorjaar en de zomer, zullen voor vogels relevante overstromingsvlaktes, nevengeulen, ondiepe plassen, moerassen en rietlanden vaker, langer en vroeger in het groeiseizoen droogvallen. Zachthout oobos zal enigszins gaan verdrogen waarbij vooral de ondergroei zal veranderen en vochtige moerasvegetaties (met o.a. gele lis) veranderen in ruigte (met o.a. brandnetel) (Van Geest, 2019). Tegelijkertijd worden in de zomer vaker hevige hoosbuien verwacht die kunnen resulteren in plotselinge zomerhoogwaters (zoals in juli 2021).

Effecten op broedvogels

Door klimaatverandering zal de kans op (en de intensiteit van) overstromingen in de winter toenemen. Dit kan leefgebied opleveren voor vogelsoorten, denk aan soorten die moerassige omstandigheden nodig hebben om te kunnen broeden en/of er voedsel te zoeken. Dit is vooral het geval als er sprake is van een laat winterhoogwater waarbij uiterwaarden ook in het voorjaar nog gedeeltelijk overstroomd zijn. De meest karakteristieke broedvogelsoort van overstroomde uiterwaarden is hierbij het porseleinhoen. Porseleinhoen is sterk afhankelijk van overstromingen van uiterwaarden in het voorjaar/vroege zomer. Vooral hoogwaters vanaf eind mei tot in juli kunnen tot massale vestiging van deze soort leiden (Figuur 4.6). Bij het recente zomerhoogwater in de tweede helft van juli in 2021 is deze piek van porseleinhoen echter niet waargenomen (Van Geest pers. com.). De hoogwatergolf was waarschijnlijk te extreem en maar kortdurend van aard waarbij er waarschijnlijk meer sprake was van overspoeling in plaats van langdurig overstroomde uiterwaarden. Omstreeks medio juli zijn er ook nog maar weinig vogelsoorten die zich vestigen voor een nieuw legsel. Voor porseleinhoen is een hoge waterstand in mei- juni essentieel (Sierdsema *et al.*, 2008), maar ook latere vestigingen kunnen voorkomen bij porseleinhoen (maar bijv. ook kwartelkoning). Het minder frequent optreden van voorjaars hoogwaters en/of versnelde waterafvoer door het inslijten van het zomerbed van de rivier in de laatste decennia wordt als één van de huidige en toekomstige knelpunten voor deze soort gezien (van Kleunen *et al.*, 2021; Kurstjens *et al.*, 2020).



Figuur 4.6: De aantallen van porseleinhoen (*Porzana porzana*) in het Natura 2000 gebied Rijntakken. In de meeste jaren zijn de aantallen zeer klein. Tijdens de voorjaarsoverstroming (juni) van de IJsseluiterwaarden in 2016 was een grote influx te zien. Groene lijn = instandhoudingsdoelstelling Natura 2000, oranje lijn = gemiddelde aantal van de laatste vijf jaar, ? = geen gegevens bekend. (Van Kleunen et al., 2021).

*Figure 4.6: Numbers of spotted crane (*Porzana porzana*) in the N2000 area Rijntakken. In most years the numbers of this species are very low. During the spring inundation of the floodplains of the river IJssel in June 2016, there was an influx of these birds. Green line = objective Natura 2000, orange line = average number in the last five years, ? = no data available (Van Kleunen et al., 2021).*

Het WHDry klimaatscenario voorspelt dat moerasvegetaties eerder in het seizoen en vaker droogvallen. De mei-piek in de afvoer verschuift langzaam naar eerder in het seizoen terwijl zomer zich gaat kenmerken door steeds lagere waterstanden. Hierdoor zullen moerasvegetaties verruigen. Dit is nadelig voor vogelsoorten van (riet)moeras met waterriet. Waterriet is nu al nauwelijks nog aanwezig in het rivierengebied, behalve in de gebieden met een gestuurd peil (bijv. Rijnstrangen) en in de gestuwde riviertakken (beneden Rijn-Lek). Het gaat dan om zeer kritische soorten (die nu al zeldzaam zijn in het rivierengebied): roerdomp, woudaapje, grote karekiet, snor en baardman, maar ook om een talrijkere soort als waterral. Rivierkundige inrichting voor bevaarbaarheid en hoogwaterveiligheid, de verdroging door zomerbedverlaging en de snelle hoogwaterafvoer hebben al in het verleden voor grote achteruitgang van deze soorten gezorgd. Voor deze soorten verkleint het effect van klimaatverandering de kansen op populatieherstel.

Dan is er nog een groep soorten die een gradiënt aan vochtigheid in het terrein nodig heeft. Ze broeden vaak op drogere delen maar hebben tegelijkertijd natte terreindelen nodig voor hun voedsel. Het gaat om veel eenden- en ganzensoorten en steltlopers zoals watersnip, kluut en kleine plevier (de laatste twee zijn geen Natura 2000 soorten, maar wel grondbroeders). Ook zij hebben last van vroegtijdige droogval van natte terreindelen.

Voor soorten van natuurlijke, kruidenrijke graslanden (zowel voor broeden als voedsel zoeken) is het gunstig als er regelmatig (jaarlijks tot om de paar jaar) overstromingen optreden van het grasland waarin ze broeden en dat dit water langer vastgehouden wordt. Het is ideaal als de graslanden geleidelijk droogvallen in de periode maart-april, zodat ze in de broedperiode droog zijn. Het late en geleidelijk droogvallen in het voorjaar zorgt ervoor dat de vegetatiegroei in de graslanden gradueel op gang komt zodat er voor broedvogels een mozaïek aan ontwikkelingsstadia en habitats beschikbaar is. In dergelijke graslanden kunnen kwartelkoningen leven, maar vochtig grasland is met name van belang voor het paapje dat nagenoeg verdwenen is uit het rivierengebied. Ook voor veel typische weidevogels in natuurlijke graslanden (o.a. tureluur en grutto) geldt dat ze geen drassige condities kunnen

gebruiken om in te broeden, maar dat de nabijheid van lagere uiterwaarden met ondiepe, langzaam droogvallende wateren goed foerageergebied vormt. Als in het voorjaar de graslanden door klimaatverandering eerder droogvallen (door verschuiving van de mei-piek en lagere waterstanden op de rivier) is dit dus negatief voor deze soorten. De kenmerkende gradiënt van droge graslanden (broedgebieden) in combinatie met langzaam droogvallende uiterwaarddelen (foerageergebieden) verdwijnt door klimaatverandering. Het effect van verruiging van graslanden in jaarrond begraasde gebieden met lage graasdichtheden, kan mogelijk deels worden opgevangen door maaibeheer en het aanpassen van het begrazingsbeheer. Hierbij is uiteraard maatwerk vereist om geen broedende vogels te verstoren en zal niet voor elk vegetatietypen een oplossing bieden.

Effecten op doortrekkers en overwinteraars

Naast een functie voor broedvogels kunnen overstromde uiterwaarden in het voorjaar, april – begin mei, belangrijke pleisterplaatsen vormen voor trekkende watervogels op weg naar noordelijke broedgebieden. Klimaatverandering zal het droogvallen van deze tijdelijke overstromingswateren vervroegen. Soorten die vroeg in het voorjaar doortrekken (maart/april) kunnen wellicht nog profiteren van late winterhoogwaters als er in maart -april nog sprake is van tijdelijke wateren. Soorten die later doortrekken, april – mei, komen mogelijk in de problemen doordat de tijdelijke wateren dan mogelijk al verdwenen zijn.

De toename van inundaties in de winter zal gevolgen hebben voor trekvogels uit noordelijke streken die in Nederland overwinteren. De uiterwaarden vormen dan pleisterplaatsen voor allerlei watervogels. We verwachten dat de meeste soorten zullen profiteren van overstromde uiterwaarden. Het biedt goede foerageeromstandigheden voor grondelende eenden en gebieden met ondiep en terugtrekkend water voor meeuwen en steltlopers. Enige nadelig effecten zouden verwacht kunnen worden voor ganzen die op de drogere graslanden foerageren.

Effect zomerhoogwaters

Het optreden van plotselinge zomerhoogwaters waarbij grote delen van de uiterwaard opeens inunderen zijn over het algemeen ongunstig als de overstroming nog in het broedseizoen plaatsvindt (bijv. in de periode juni – juli). Nesten van broedvogels kunnen dan verloren gaan, bijv. oeverwaluizen die in steilwanden langs de waterlijn broeden, of groundbroeders in gras- en moeraslanden of op kale zand- en grindbanken (bijv. langs de Grensmaas).

De hoge zomerwaterstanden maken ook foerageergebieden voor bepaalde soorten ongeschikt. Zomeroverstroming van kruidenrijke graslanden en ooibossen zal bijv. een negatief effect hebben op de vegetatiestructuur en de beschikbaarheid van insecten. Na een zomerhoogwater ontstaan echter waarschijnlijk ook weer tijdelijke overstromingsvlaktes die in de nazomer vervolgens weer als foerageergebied kunnen functioneren voor watervogels en steltlopers (bijv. in de najaarstrek).

Soorten die profiteren van klimaatverandering

Verruiging van habitats in uiterwaarden door klimaateffecten zoals afnemende hoogwaters en/of verdroging van moerasvegetatie zal ook vogelsoorten in de kaart spelen. Denk hierbij aan vogelsoorten van verruigd moeras, zoals Cetti's zanger en bosrietzanger en soorten van droge ruigte (verruigd grasland) als roodborsttapuit en grasmus.

Effect op vogels van ooibossen

De verdroging van ooibos kan negatieve gevolgen hebben voor broedvogels van natte/vochtige bossen als matkop, nachtegaal en wielewaal (deze laatste twee zijn nu al schaars in het riviereengebied). De verruiging van de ondergroei van ooibossen zal soorten die nu reeds nu talrijk zijn als zwartkop, roodborst en winterkoning juist verder faciliteren.

Effecten op vogels via veranderingen in het voedselaanbod

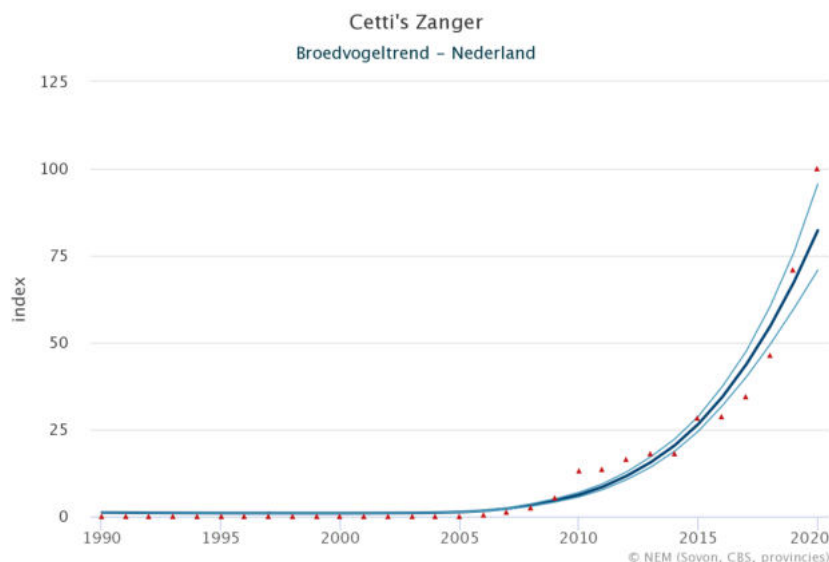
De insteek voor de beschrijving van de bovengenoemde veranderingen in de vogelpopulatie was veelal via veranderingen in terreincondities. Daarmee wordt natuurlijk indirect ook voedselaanbod en -beschikbaarheid meegenomen. Wat mist zijn de gevolgen van klimaatverandering op andere soorten dan vogels, die wel voedsel vormen voor die vogels. Er is weinig kennis over te verwachten veranderingen in de voedselketen. In algemene zin zijn positieve effecten te verwachten van late winterhoogwaters die resulteren in overstromingsvlaktes in het voorjaar op de beschikbaarheid van biomassa (Kurstjens *et al.*, 2020): vergroting voedselaanbod voor vis- (paragraaf 4.3) en amfibie-eters (paragraaf 4.5) evenals insecteneters (zie ook paragraaf 4.2). Klimaatverandering zorgt er tegelijkertijd echter voor dat hoogwaterperiodes in het vroege voorjaar steeds minder zal gaan voorkomen. De kans op de vorming van overstromingsvlaktes en de daarmee geassocieerde biomassa in het voorjaar wordt daarmee steeds kleiner waardoor uiterwaarden sneller uitdrogen in het voorjaar. Dit heeft vanzelfsprekend een negatief effect op de voedselbeschikbaarheid voor vogels die geassocieerd zijn met de biomassaproductie van overstromingsvlaktes in het voorjaar.

Gebiedsoverstijgende klimaateffecten: winters in Europa worden zachter

De aantallen en soorten vogels die gebruik maken van ons rivierengebied worden ook beïnvloed door klimaatveranderingen op een grotere schaal. Door het vaker voorkomen van zachte winters ten noorden van Nederland, in landen als Denemarken en (Zuid-)Zweden maken bijvoorbeeld sommige ganzen- en eendensoorten minder vaak, of in kleinere aantallen dan voorheen, gebruik van de Nederlandse pleisterplaatsen (Lehikoinen *et al.*, 2016, Foppen *et al.*, 2016). Voor lokale broedvogels die ook in Nederland overwinteren, met name die gebaat zijn bij de aanwezigheid van ijsvrij water, zullen de condities door klimaatverandering hier verbeteren, de meest uitgesproken voorbeelden hiervan zijn de vorstgevoelige blauwe reiger, roerdomp en ijsvogel. Deze soorten zouden dus in aantal kunnen toenemen in het rivierengebied.

Naast de noord(oost)waartse verschuiving van overwinteringsgebieden is er ook een verschuiving van verspreidingsgebieden van tot voor kort Zuid-Europese soorten te verwachten, die deels al zichtbaar is (Huntley *et al.*, 2007). Zo is de Cetti's zanger zich in hoog tempo aan het verspreiden over onder meer het rivierengebied (Figuur 4.7) en lijkt de Pontische meeuw op het punt te staan zich te vestigen als vaste broedvogel (Boele *et al.*, 2021). Andere soorten die de laatste jaren vaker in Nederland worden gezien, nu nog buiten het rivierengebied broeden maar er binnenkort wel worden verwacht zijn: bijeneter, kleine zilverreiger, steltkluut, orpheusspotvogel en graszanger. Aanvullend worden koereiger, hop en zwarte ibis verwacht als nieuwe broedvogels voor Nederland (Sovon, 2018). Tegelijkertijd zullen de watervogels onder deze nieuwkomers ook nadelig effecten ondervinden van verdroging in de uiterwaarden.

Klimaatverandering zou verder een effect kunnen hebben op de fysiologie van vogels, de fenologie (aankomst uit of vertrek naar overwinteringsgebieden) en de interactie tussen soorten. Zo zou er bij soorten die afhankelijk zijn van pieken in insectenaanbod in het voorjaar een mismatch kunnen ontstaan tussen hun broedcyclus en het voedselaanbod (Both *et al.*, 2009). In hoeverre dit al optreedt of kan gaan optreden langs de Nederlandse rivieren is niet duidelijk. Een lange monitoringsstudie van vier decennia in Tsjechië gaf aan dat door klimaatverandering de fenologie van loofbomen, rupsen en broedende koolmezen en withalsvliegenvangers in riviergebonden bossen enkele dagen is vervroegd (Bauer *et al.*, 2010). Het broedsucces van populaties van vergelijkbare soorten (bijv. bonte - en grauwe vliegenvanger) worden mogelijk ook in Nederlandse uiterwaarden op vergelijkbare wijze beïnvloed (hoewel hier (nog) geen meetreeksen van beschikbaar zijn).



Figuur 4.7: De broedvogeltrend van de Cetti's zanger, behalve 'klimaatsoort' profiteert deze van verruiging van moerassen.

Figure 4.7: Trend in breeding of Cetti's warbler (Cettia cetti), a species that benefits from climate change by the increased succession of marshes.

Gevolgen klimaatverandering op broedvogels Rijn en Maas

De voor deze studie doorgerekenende veranderingen in de inundatiepatronen onder het WHdry-scenario zijn kwalitatief vergeleken met de habitateisen van kenmerkende broedvogels en broedvogelsoortgroepen die momenteel voorkomen langs de Rijntakken en de Maas. Hierbij is zowel gekeken naar de delen van het rivierengebied die natter worden als die droger worden (zie Figuur 3.9 en 3.10). De resultaten van deze analyse zijn samengevat in bijlage 4. In grote lijnen komt het erop neer dat de soorten en soortgroepen die geassocieerd zijn met natte habitats in het voorjaar en de zomer negatief beïnvloed worden door de voorspelde verdroging in veel gebieden. Dit geldt voor de meeste gebieden, behalve de benedenloop van de IJssel en de Maas. Met name in het voorjaar zou dit voor problemen kunnen zorgen omdat dit het meest cruciale seizoen is (broedseizoen). Voor gebieden waar vernatting te verwachten is, zullen deze soorten mogelijk juist profiteren, terwijl de drogere soorten er niet altijd negatief door beïnvloed worden (bijv. Cetti's zanger).

Maatregelen voor soorten van overstromingsvlakten/riviermoeras

Mitigerende maatregelen kunnen ook voor vogels positief effect geven. Bijvoorbeeld door het langer vasthouden van water en het creëren van natte overstromingsvlaktes. Hierdoor blijven ondiep overstroomde kruidenvegetaties langer geschikt voor soorten als porseleinhoen en drogen moerassen met waterriet en typische rietvogels minder snel uit. Voor het porseleinhoen is het belangrijk dat de hoogwaterpieken tot laat in voorjaar en de vroege zomer worden vastgehouden (eind mei – juli), waarbij er lang sprake is van ondiep water (5-20 cm). Veel andere soorten zijn ook al gebaat als water vastgehouden kan worden tot halverwege het voorjaar, april - mei (van Kleunen *et al.*, 2021, Kurstjens *et al.*, 2020). Afhankelijk van het gebied en de lokale doelen of kansen kan een gericht beheerplan voor de vernatte zones worden opgesteld. Kurstjens *et al.* (2020) onderstreepte al het belang van overstromingsvlaktes als broed- en foerageergebied voor vogels.

De huidige studie laat daar bovenop zien dat er extra zorg moet worden besteed om natte overstromingsvlaktes zo klimaatrobuust mogelijk aan te leggen. Belangrijk bij het invullen van natte overstromingsvlaktes is hierbij de juiste locatiekeuze (hoog inundaties onder het WHDy klimaatscenario), door voldoende lage bodemhoogtes te realiseren en door op voorhand regelwerken aan te brengen die hoogwater in de winter langdurig tot en met voorjaar kunnen vasthouden.

Zo kan de voorspelde kans op de vorming van overstromingsvlaktes uit Kurstjens *et al.* (2020) ook daadwerkelijk benut worden. Ook het waterbeheer is hierbij van belang: de huidige inundatieduur van uiterwaarden wordt voornamelijk bepaald door waterbeheer dat gericht is op het snel uitlaten van inundatiewater, in verband met landbouw, kwel en dijkveiligheid. Dit geldt zelfs voor een erkend overstromingsgebied als Buiten Ooij als de inundatie voor 1 april plaatsvindt. Dit beheer is niet meer reëel in relatie tot de verwachte klimaatveranderingen in het rivierengebied.

Er zijn diverse praktijkvoorbeelden van kunstmatige en natuurlijke inundaties die in de jaren daarna tot (massale) vestiging van bijbehorende soorten leidde (zoals roerdomp, porseleinhoen, rietzanger, rietgors), bijvoorbeeld in natuurontwikkelingsgebieden in het noorden van het land (Onlanden; van Boekel *et al.*, 2017), maar ook een proefproject in de Ooijpolder bij Buiten-Ooij (Kurstjens *et al.*, 2014).

4.7 Habitattypen en leefgebieden

In deze studie wordt gekeken naar soorten en habitattypen die relevant zijn voor de rivierbeheerders. Relevante soorten zijn benoemd in de maatlatten van de KRW en in de beheerplannen voor Natura 2000. In dat laatste kader zijn ook de Natura 2000 habitattypen aangewezen, die heel precies gedefinieerd zijn in termen van plantengemeenschappen, een groep van soorten dus (waarbij ook nog typische soorten zijn aangeduid, die een kwaliteitsindicator van het habitatype vormen). Alle soorten maken echter gebruik van hun leefgebied, ook wel habitat genoemd. Dit is dus breder dan alleen de Natura 2000 habitattypen. Als we naar de effecten van klimaatverandering op soorten kijken, doen we dat aan de hand van de eisen die ze stellen aan hun leefgebied/habitat en wat er verandert aan de omstandigheden van dat leefgebied/habitat. Ondertussen is ook de term leefgebieden een beleidsterm geworden, namelijk als PAS-leefgebieden, gebaseerd op stikstofgevoelige habitattypen en Natura 2000-soorten in stikstofgevoelige habitats. In deze studie bedoelen we als we de term leefgebieden noemen, gewoon de ecologische term als 'het habitat waarin de soort voorkomt omdat dit de geschikte milieu-condities heeft'. We bedoelen dus niet de term leefgebieden zoals die momenteel ook voor Natura 2000 wordt gehanteerd, waarmee bedoeld wordt de niet-aangewezen gebieden waar wel habitatsoorten voorkomen.

4.7.1 Aanwezige habitattypen en belangrijkste differentiërende factoren

Langs de Rijn en de Maas zijn verschillende gebieden aangewezen als Natura 2000 gebied voor diverse soorten en habitattypen. Het grootste deel van de Rijntakken is aangewezen als vogelrichtlijngebied, en daarnaast zijn grote delen van de uiterwaarden, in veel gevallen inclusief de kribvakken, aangewezen als habitatrichtlijngebied. In het winterbed van de Maas, zijn de Grensmaas, de Oeffelter Meent en een klein stukje Maasduinen aangewezen als habitatrichtlijngebied. Voor de Maas geldt dat de zomerbedbegrenzing (situatie vóór de rivierverruimende maatregelen van het Grensmaasproject) de begrenzing van het habitatrichtlijngebied is, plus de gebieden Molensteen, Koningssteen en de Brandt (www.natura2000.nl).

In de aanwijsbesluiten van deze gebieden (<https://www.natura2000.nl/gebieden>) zijn in totaal negen Natura 2000 habitattypen aangewezen. In principe zijn overigens alle habitattypen binnen de begrenzing beschermd, maar voor niet-aangewezen habitattypen geldt geen verbeteropgave. Beuken-eikenbossen met hulst (H9120) en beekbegeleidende bossen (H91E0C) zijn wel aangewezen, maar hier buiten beschouwing gelaten omdat deze niet gebonden zijn aan rivierinundaties en uitsluitend onder specifieke omstandigheden in het rivierengebied voorkomen. Deze specifieke omstandigheden zijn met een generiek model niet te beoordelen. Het habitatype kranswierwateren is toegevoegd aan de lijst omdat dit

aquatische type voorkomt in het rivierengebied en gevoelig is voor veranderingen in hydrologie of waterkwaliteit.

Voor elk habitatype is in de profielendocumenten precies beschreven welke vegetatietypen (syntaxa) kwalificerend zijn (<https://www.natura2000.nl/profielen/habitattypen>). In Tabel 4.2 hebben we de belangrijke habitattypen en de hiervoor kenmerkende vegetaties op een rij gezet. Een vegetatietype wordt als kenmerkend beschouwd indien deze zelfstandig kwalificeert voor het habitatype en niet uitsluitend "in mozaïek met" een andere vegetatie.

Als een (sub)habitattype meerdere kenmerkende vegetaties heeft en deze kenmerkende vegetaties sterk verschillen in abiotiek (met name bodemtype en hydrologie), zijn deze gesplitst in subtypen door middel van een nummer. De koppeling met abiotiek is namelijk beter te leggen met vegetatietypen dan met habitattypen.

Tabel 4.2: N2000 Habitattypen die in het buitendijkse deel van het rivierengebied (Rijn en Maas) voorkomen en hun kenmerkende vegetatietypen (bron: <https://www.natura2000.nl/>).
* = kwalificeert uitsluitend als bepaalde soorten aanwezig zijn.

Table 4.2: N2000 habitat types occurring in the river floodplain (Rhine and Meuse) and their characteristic vegetation types (source: <https://www.natura2000.nl/>). * = qualifies only if certain species are present.

Code	Naam	Vegetaties
H3140	Kranswierwateren	Associaties uit het Verbond van stekelharig kransblad
H3150	Meren met krabbenscheer en fonteinkruiden	Krabbenscheerassociatie Associaties van het Waterlelieverbond*
H3260B	Beken en rivieren met waterplanten	Associatie van doorgroeid fonteinkruid Associatie van vlottende watteranonkel
H3270	Slikkige rivieroeveren	Associaties van het Tandzaadverbond
H6120	Stroomdalgraslanden	1. Wormkruidverbond* 2. Associatie van Sikkkelklaver en Zachte haver 3. Associatie van Vetkruid en Tijn
H6430A	Ruigten en zomen – Moerasspirea	Moerasspireaverbond
H6430B	Ruigten en zomen – Harig wilgenroosje	Verbond van harig wilgenroosje*
H6430C	Ruigten en zomen – droge bosranden	Verbond van look-zonder-look*
H6510A	Glanshaverhooilanden	Glanshaverassociatie
H6510B	Vossenstaarthooilanden	1. Associatie van Grote pimpernel en Weidekervel 2. Kievitsbloemassociatie
H91E0A	Vochtige alluviale bossen, subtype A	1. Bijvoetooibos 2. Lissenooibos 3. Veldkersooibos (buiten beschouwing, zoetwatergetijde)
H91E0B	Vochtige alluviale bossen, subtype B	Essen-Iepenbos
H91F0	Droge hardhoutooibossen	Abelen-Iepenbos

Het voorkomen van vegetaties en habitattypen wordt in sterke mate bepaald door de abiotiek en het beheer. In uiterwaarden zijn de belangrijkste abiotische factoren de inundatieduur, de bodem en de sedimentatie- en erosiedynamiek.

Daarnaast is het beheer belangrijk, in praktijk meestal begrazingsbeheer en/of maaibeheer. Maaien en intensief begrazen leidt in principe tot grazige vegetaties. Extensief begrazingsbeheer zorgt in theorie voor een afwisseling tussen bos en grasland, die zowel ruimtelijk als temporeel dynamisch kan zijn. In praktijk is het overigens vaak zo dat de kuddes bepaalde delen intensief begrazen en dat in overige delen ruigte, struweel en bos de overhand krijgen zonder dat daar veel dynamiek in zit. Het voorkomen van habitattypen in relatie tot deze belangrijkste differentiërende factoren is samengevat in Tabel 4.3.

Tabel 4.3: Belangrijkste differentiërende factoren voor de ontwikkeling van N2000 habitattypen in het buitendijkse deel van het riviereengebied. De nummers achter de habitattypencodes ('-1') refereren naar de nummers in Tabel 4.2.

Table 4.3: Most important differentiating factors for the development of N2000 habitats in the floodplains of the rivers Rhine and Meuse in the Netherlands. Numbers after the Habitatcodes ('-1') refer to the numbers in Tabel 4.2.

Beheervorm		Bossen			Grazig (maai- of begrazingsbeheer)			
Landschappelijke positie		rivierstranden	oeverwallen (& rivierstranden)	uiterwaardvlakten	rivierstranden	oeverwallen & rivierstranden	Hoge uiterwaardvlakten	Lage uiterwaardvlakten
Bodemtype		Zand - lichte zavel	zand / lichte zavel	zavel - klei	zand	zand / lichte zavel	zavel - lichte klei	klei
Inundatieduur	Dynamiek	hoog	laag	laag	hoog	laag	laag	laag
dagen per jaar*	dagen in groeiseizoen*							
<1	0	H91F0	H91F0	H91E0B	-	H6120-2	H6120/H6510A	H6510B
<10	0	H91E0A-1	H91F0	H91E0B	H6120-1	H6120-2	H6120/H6510A	H6510B
<20	<10	H91E0A-1	H91E0A-1	H91E0A-2	H6120-1	H6120-2	H6120/H6510A	H6510B
<60	<20	H91E0A-1	H91E0A-1	H91E0A-2	-	-	-	H6510B
<110	<60	H91E0A-1	H91E0A-1	H91E0A-2	-	-	-	-
<300	<150	(kaal/ vlieszaadass.)	H3270	H3270	(kaal/ vlieszaadass.)	H3270	H3270	H3270
365	365	H3260	H3140/H3150	H3140/H3150	H3260	H3140/H3150	H3140/H3150	H3140/H3150

* lezen als: vegetatie komt voor bij een MAXIMALE inundatie van X dagen/jaar of X dagen/groeiseizoen (1 apr-1okt)
Plaatsing H6430A en H6430B (Ruigten en zomen) op de grens van de inundatieduur van Overstromingsgrasland en Slikkige rivieroever. H6430C komt voor op drogere standplaatsen en is niet duidelijk gebonden aan een overstromingsbereik.

4.7.2 Inundaties

Sleutelfactoren voor riviervegetaties: inundatie, bodem en beheer

De waterstand is, samen met het bodemtype, één van de meest bepalende factoren voor vegetatie in het algemeen en dat geldt nog sterker in uiterwaarden waar inundatie optreedt. De effecten van rivieroverstromingen kunnen worden opgedeeld in hydrodynamiek en morfodynamiek. Hydrodynamiek omvat de directe (fysiologische) effecten op planten als gevolg van de (hoge) waterstand en de kwaliteit van het rivierwater (doorzicht, nutriënten en andere (verontreinigende) stoffen). De morfodynamiek omvat de verandering van standplaatsfactoren als gevolg van sedimentatie en erosie (Knaapen & Rademakers, 1990). Planten verschillen in hun aanpassingen aan overstromingen en dit heeft tot gevolg dat de vegetatiezonering in uiterwaarden vrijwel altijd gekoppeld is aan de inundatieduur. Als eerste factor (kolom 1 en 2 in Tabel 4.3) is dan ook de inundatieduur opgenomen, uitgedrukt in het gemiddeld aantal dagen per jaar dat een vegetatie onder water staat en gedurende het groeiseizoen. Op basis van literatuur (Wolf *et al.*, 2001, Aggenbach *et al.*, 2007, Runhaar & Hennekens, 2014; Rotthier & Sykora, 2016), aangevuld met expertkennis (M. Jalink en R. van de Haterd) is bepaald welke habitattypen binnen welke grenzen van inundatieduur voorkomen (Tabel 4.3). Habitattypen kunnen vaak bestaan uit uiteenlopende vegetatietypen, met verschillende abiotische vereisten, daarom is uitgegaan van de vegetatietypen die zelfstandig kwalificeren voor dat (sub)habitattype. Indien een (sub)habitattype bestaat uit verschillende kwalificerende vegetaties die verschillen in hun abiotiek, is het (sub)habitattype gesplitst (Tabel 4.2). Naast de inundatieduur, is het bodemtype in de tabel opgenomen. Ten slotte is een onderscheid gemaakt in bossen en grazige vegetaties, die hoofdzakelijk samenhangen met het beheer en de historie.

Inundatie is voor veel planten, zeker in het groeiseizoen, een stress-factor. Veel vegetaties in de uiterwaarden hebben echter ook (winter)inundaties nodig. In stroomdalgraslanden op zandige grond zijn kortdurende overstromingen of hoge waterstanden noodzakelijk om de basenrijkdom op peil te houden (Knaapen & Rademakers, 1990; Schaminée *et al.*, 1996, Ministerie LNV, 2008). Glanshaverhooilanden staan meestal op iets kleirijkere bodem, waardoor de basenverzadiging hier minder snel terugloopt. Ook voor kievitsbloemhooilanden is inundatie meestal noodzakelijk omdat anders overstromingsintolerante soorten de overhand krijgen (Runhaar *et al.*, 2014). Dit aspect is relevant omdat de inundatiefrequentie van uiterwaarden onder invloed van klimaatverandering kan veranderen.

Inundatie en nutriënten

Naast directe effecten op de vegetatie, leidt overstroming ook tot aanvoer van nutriënten, zowel door de opgeloste nutriënten in het rivierwater als door afzetting van sediment met nutriënten (Sival *et al.*, 2002). Daarbij heeft de afzetting van sediment vermoedelijk een groter effect dan de nutriënten in het water zelf, waardoor in de eerste 200-300 meter van de rivier de nutriëntenconcentraties hoger zijn (Klaus *et al.*, 2011). Gezien de huidige kwaliteit van het riviersediment resulteert sedimentatie nagenoeg altijd in eutrofiëring (Sival *et al.*, 2002 en bronnen hierin). Uiterwaarden zijn van nature relatief eutroof in vergelijking met bijvoorbeeld beekdalen of hogere zandgronden en schrale vegetaties komen vrijwel uitsluitend voor op relatief hoge en weinig geïnundeerde locaties. In sterk door menselijk handelen beïnvloede uiterwaarden is de vegetatie vaak helemaal niet meer door nutriënten gelimiteerd (Antheunisse *et al.*, 2006). Dit wil echter niet zeggen vegetaties in uiterwaarden altijd ongevoelig zijn voor eutrofiëring. Stroomdalgraslanden behoren tot de zeer stikstofgevoelige vegetaties; glanshaverhooilanden, bloemrijke weidevogelgraslanden, meren met krabbenscheer en fonteinkruiden, essen-iepenbossen en hardhoutooibossen zijn als gevoelig aangeduid (Van Dobben *et al.*, 2012). Ook uit empirisch onderzoek blijkt dat vochtige tot natte habitats, zoals soortenrijke natte graslanden dus wel degelijk gelimiteerd kunnen zijn door nutriënten zoals stikstof (Antheunisse *et al.* 2006) of door stikstof en kalium (Loeb *et al.*, 2009). De essen-iepenbossen en hardhoutooibossen verruigen met grote brandnetel door sedimentatie van voedselrijk slib (Hommel *et al.*, 2011). Onder invloed van klimaatverandering wordt verwacht dat concentraties in nutriënten in het water toenemen, onder andere doordat de afspoeling toeneemt (Kosten, 2011). De gevolgen hiervan op uiterwaardvegetaties worden als gering tot verwaarloosbaar ingeschat, omdat de toename als gevolg van klimaatverandering vrijwel zeker veel kleiner is dan de afname die in de afgelopen decennia is gerealiseerd door waterkwaliteitsmaatregelen.

Effecten van zomerhoogwaters

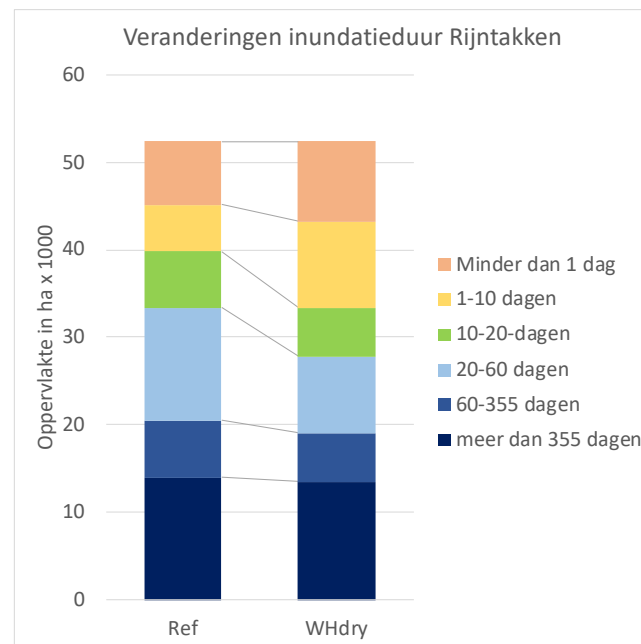
Naast de inundatiefrequentie, is het moment van inundatie ook van groot belang. Uiterwaardvegetaties zijn goed bestand tegen winterinundaties, maar veel minder goed tegen inundaties in het groeiseizoen, dat grofweg van 1 april tot 1 oktober loopt (Knaapen & Rademakers, 1990; Aggenbach *et al.*, 2007). In de onderstaande analyse is de verandering in de inundatiefrequentie geanalyseerd, niet de timing van de inundaties. Dit is gerechtvaardigd omdat de toename van piekafvoeren voornamelijk in de winterperiode zal liggen en zomerhoogwaters (zoals die in juli 2021) relatief zeldzaam zullen blijven. Het is echter vrij zeker dat het veranderende klimaat ook leidt tot een grotere kans op het optreden van zomerhoogwaters.

Veel plantensoorten in uiterwaarden zijn veel gevoeliger voor overstroming in de zomer dan in de winter (Van Eck *et al.*, 2004). Zomeroverstromingen hebben een direct effect op de vegetatie omdat planten gebrek krijgen aan zuurstof of licht (Aggenbach *et al.*, 2007) of last krijgen van toxische concentraties van stoffen die gevormd worden onder anaerobe omstandigheden (Loeb *et al.*, 2007; Loeb *et al.*, 2008). Vanwege de lichtbeperking zijn naast de duur van de overstroming dus ook de diepte en de troebelheid van het water van belang. Ten slotte kan ook een overstroming in de zomer ook nutriënten (fosfor) uit de bodem mobiliseren, hetgeen bij lage temperaturen veel minder optreedt (Loeb *et al.*, 2007). In een onderzoek aan dijkvegetaties kwamen de soorten van stroomdalgraslanden en glanshaverhooilanden niet of nauwelijks voor onder het hoogwaterniveau van de voorgaande twee jaren (Sykora *et al.*, 1988). Slikkige rivieroeveren zijn bij uitstek aangepast aan het riviermilieu en komen pas later in het groeiseizoen tot ontwikkeling op de droogvallende oevers van rivieren en nevengeulen, als het rivierwater voldoende gezakt is. Indien echter daarna een plotselinge hoogwatergolf optreedt, bijvoorbeeld midden augustus, verdwijnen vrijwel alle kenmerkende soorten van de slijkgroenassociatie en ontstaan dominantie-vegetaties met klonaal groeiende soorten als zilverschoon en vijfvingerkruid (waarneming R. van de Haterd). Pionierv egetaties zoals deze zijn bij uitstek in staat zich van een dergelijke verstoring te herstellen (Knaapen & Rademakers, 1990), maar als zomerinundaties vaak voorkomen kan dit uiteraard op termijn wel negatieve effecten hebben. De kenmerkende

soorten van de slijkgroenassociatie (slijkgroen, bruin cypergras, klein vlooienkruid, liggende ganzerik, rode - en zeegroene ganzenvoet) hebben allemaal een kortlevende zaadbank van één tot enkele jaren (Kleyer *et al.*, 2008) en moeten dus wel eens in de paar jaar zaad kunnen zetten. Zomerinundaties blijken desastreus voor veel ondergedoken waterplanten en nymphaeiden in uiterwaarden van de Rijn (Brock *et al.*, 1987).

Veranderingen in inundaties

Door klimaatverandering en rivierinsnijding verandert de inundatiefrequentie van de uiterwaarden. Op basis van de inundatiegrenzen uit het schema in Tabel 4.3 is gekeken naar het areaal dat binnen genoemde inundatiegrenzen ligt in de huidige situatie en in klimaatscenario WHdry met bodemdaling. Uiteraard is niet al dit areaal begroeid met habitattypen, maar het geeft wel een indruk van de richting van de veranderingen.



Figuur 4.8: Verandering in geïnundeerde arealen langs de Rijntakken referentie ten opzichte van WHdry met bodemdaling.

Figure 4.8: Changes in inundated areas along the river Rhine, reference against WHdry with riverbed incision.

Langs de Rijntakken (Figuur 4.8) is zichtbaar dat vooral de zone die tussen 20 en 60 dagen inundeert in omvang afneemt bij het WHdry+Bodem scenario. Beperkte afnames zijn er voor de nattere zones en de zone tussen 10 en 20 dagen. Het areaal dat relatief weinig inundeert (1-10 dagen en minder dan 1 dag) neemt juist in omvang toe.

Wat betreft grazige typen komen in de zone 20-60 dagen overstromingsgraslanden, ruigten uit de bijvoetklasse (beide geen N2000 habitatype) en vossenstaarthooilanden (H6510B) voor. De vossenstaartgraslanden komen echter ook voor in de minder geïnundeerde zones, dus het potentiële areaal hiervoor neemt netto niet af. Overstromingsgrasland en ruigten uit de bijvoetklasse nemen vermoedelijk wel af, en op relatief schrale bodems zou hier glanshaverhooiland (H6150A) of stroomdalgrasland (H6120) uit kunnen ontstaan.

In de zone van 20-60 dagen kunnen ook het Bijvoet- en Lissenooibos (H91E0A) voorkomen. Deze kunnen in areaal afnemen, maar omdat beide algemene typen zijn met een vrij brede range van voorkomen, zal deze afname relatief gezien klein zijn. Dat de zone tussen 1 en 10 dagen inundatie toeneemt, betekent dat er meer potentieel areaal is voor essen-iepenbossen

(H91E0B) en hardhoutooibossen (H91F0); beide typen zijn veel zeldzamer dan de Bijvoet- en lissenooibossen.

Om meer inzicht te geven in de veranderingen per habitattype, zijn twee vervolganalyses uitgevoerd:

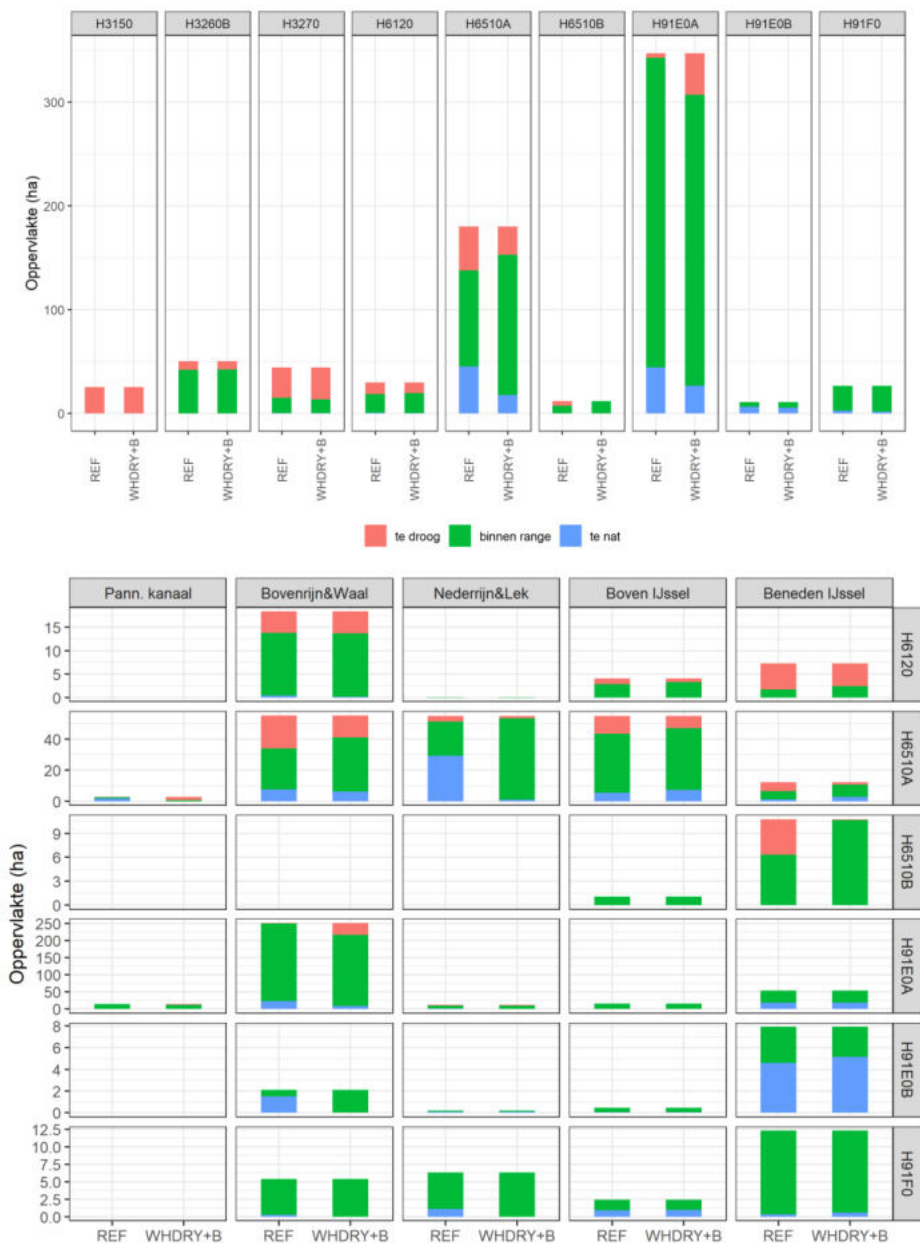
1. Welk deel van de actuele habitattypen (conform de vastgestelde habitattypenkaart van de Rijntakken en de (concept) habitattypen kaart van de Grensmaas, Oeffelter Meent en Maasduinen) komen als gevolg van de veranderingen in inundatiefrequentie buiten hun optimale inundatiebereik te liggen? Dit geeft een indicatie bij welke habitattypen er significante arealen bedreigd worden door klimaatverandering of waar mogelijk kwaliteitsverbeteringen optreden.
2. Waar liggen gezien de veranderende inundatiefrequenties potentieel nieuwe arealen voor habitattypen?

Effecten op bestaande habitattypen langs de Rijntakken

Voor de Rijntakken als geheel hebben we de inundatiefrequenties van bestaande groeiplaatsen van de Natura 2000 habitattypen vergeleken met de inundatiefrequenties die deze groeiplaatsen krijgen bij het WHDry+Bodem scenario. Hierbij hebben we bekeken welk deel van het huidige areaal in de geschikte zone ligt en welk areaal eigenlijk te droog of te nat staat (Figuur 4.9). Opmerkelijk is dat er ook voor de huidige situatie (REF) habitattypen op groeiplaatsen staan die volgens de analyse te nat of te droog zijn. Dit kan komen door onnauwkeurigheden in de begrenzingen van de habitattypen, onjuistheden in de inundatieduur uit Tabel 4.3, methodische artefacten (zoals het verwaarlozen van kades waardoor de inundatie geringer is dan gemodelleerd) of het kan gaan om habitattypen op suboptimale standplaatsen. De aquatische en semi-aquatische typen (H3150, H3260B en H3270) geldt dat er geen betrouwbare hoogtegegevens zijn (AHN ontbreekt in water), waardoor voor deze typen de analyse niet werkt.

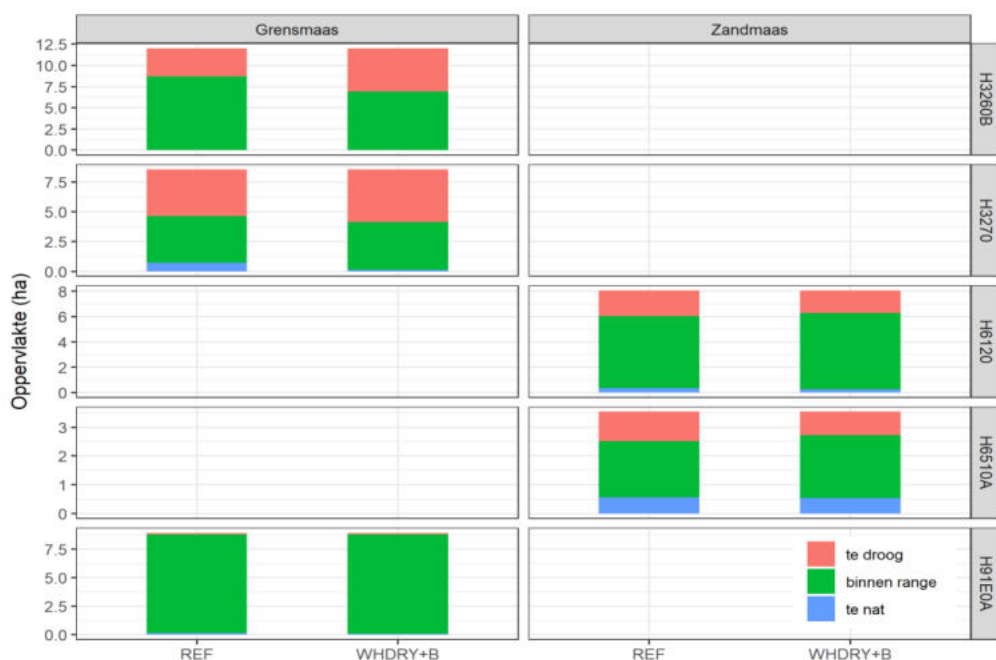
1. Stroomdalgrasland (H6120): Dit habitatype is nu zeldzaam; het grootste areaal komt voor langs de Bovenrijn, Waal en langs de IJssel. In de huidige situatie staat een aanzienlijk deel aangemerkt als 'te droog', vermoedelijk omdat de aanname van minimale inundatie (1 dag per jaar) te streng is; stroomdalgraslanden kunnen ook voorkomen bij inundatie van eens per 4 tot eens per 12 jaar (Herstelstrategie H6120: Stroomdalgraslanden). Bij het klimaatscenario zullen de huidige groeiplaatsen iets vaker inunderen, met name langs de IJssel, maar er komt nauwelijks areaal bij dat te vaak inundeert. Gezien het zeer geringe oppervlakte van dit habitatype is dit een kwetsbare situatie, die op lokale schaal moet worden bekeken om er harde conclusies aan te verbinden. Meer inwaaiend zand vanuit droogvallende oevers zou een ander positief aspect van klimaatverandering kunnen zijn voor dit habitatype (Van Geest, *pers. com.*).
2. Glanshaverhooiland (H6150A): In de huidige situatie is een relatief groot deel van de inundatiezones suboptimaal, zowel te nat als te droog. Mogelijk betreft dit suboptimaal ontwikkelde habitattypes of zijn de grenzen voor inundatiefrequentie niet helemaal juist. Onder het klimaatscenario neemt het areaal met een geschikte inundatiefrequentie toe voor dit habitatype; de hydrologische vereisten voor glanshaverhooiland worden van de bestaande habitattypen dus eerder beter dan slechter. Glanshaverhooilanden zijn gevoelig voor zomerinundaties; een toename daarvan zou dus een negatief effect kunnen hebben. Dit is niet meegenomen in de modelanalyse omdat deze toename nog erg onzeker is en de verwachting is dat zomerhoogwaters relatief zeldzame incidenten blijven.
3. Vossenstaarthooiland (H6150B): Dit habitatype komt binnen Natura2000-gebied Rijntakken alleen voor langs de IJssel (vooral in Scherenwelle bij Kampen) in de vorm van kievitsbloemhooiland en trosdravikgrasland. Uit de analyse lijkt de inundatiefrequentie voor dit type te verbeteren, maar juist in Scherenwelle wordt het

- peil gereguleerd met kades en een gemaal; het effect daarvan zit niet in de modelanalyse. In praktijk verandert er dus weinig tot niets voor dit type.
4. Zachthoutooibos (H91E0A): In de huidige situatie staat het meeste zachthoutooibos op geschikte groeiplaatsen. Het geschikt areaal neemt echter af bij het klimaatscenario. Het gevolg zal zijn dat het lissenooibos (het natte subtype) aan kwaliteit verliest (van goed ontwikkelde vormen met gele lis naar matig ontwikkelde vormen met grote brandnetel). Voor bijvoetooibos geldt dat dit mogelijk door successie zal overgaan in Essen-Iepenbos.
 5. Essen-Iepenbos (H91E0B): De ongeveer 10 ha Essen-Iepenbos ligt vooral langs de Beneden-IJssel. Dit zal relatief vaker overstroomd, terwijl het in de huidige situatie al relatief nat is; dit lijkt een aandachtspunt.
 6. Hardhoutooibos (H91F0): De hardhoutooibossen zitten helemaal aan de bovenkant van de zonering en de omstandigheden zullen voor dit type eerder verbeteren dan verslechteren.



Figuur 4.9: Areaal van de actueel aanwezige habitattypen in N2000-gebied Rijntakken in de huidige situatie (REF) en in het scenario WHDRY+B dat te weinig, voldoende en te vaak inundeert, gebaseerd op de gemodelleerde inundatieduur en de vereisten volgens (Tabel 4.3). Bovenste figuur geeft het gesommeerde areaal voor het hele Natura-2000 Rijntakken, in de onderste figuur zijn de niet-aquatische habitattypen gesplitst naar deeltraject.

Figure 4.9: Area of the currently present habitat types in N2000 area 'Rijntakken' in the current situation (REF) and in the scenario WHDRY+B that inundates too little, sufficiently and too often, based on the modeled inundation duration and requirements according to Table 4.3. The upper figure shows the summed acreage for the entire Natura-2000 area, in the lower figure the non-aquatic habitat types are split by river sections.



Figuur 4.10: Areaal van de actueel aanwezige habitattypen in de N2000-gebieden langs de Maas in de huidige situatie (REF) en in het scenario WHdry met bodemdaling (+B) dat te weinig, voldoende en te vaak inundeert, gebaseerd op de gemodelleerde inundatieduur en de vereisten volgens Tabel 4.3.

Figure 4.10: Area of the currently present habitat types in N2000 areas along the Meuse in the current situation (REF) and in the scenario WHdry with riverbed incision (+B) that inundates too little, sufficiently, and too often, based on the modeled inundation duration and requirements according to Table 4.3.

Effecten op bestaande habitattypen langs de Maas

Langs de Maas (Figuur 4.10) zijn veel minder habitattypen aanwezig dan langs de Rijn. De habitattypen rivieren met waterranonkels (H3260B), slikkige rivieroeveren (H3270) en zachthoutoobossen (H91E0A) komen alleen langs de Grensmaas voor, de habitattypen stroomdalgrasland (H3270) en glanshaverhooiland (H6510A) alleen langs de Zandmaas (Oeffelte Meent en Maasduinen). Voor de aquatische typen geldt wederom dat een relatief groot percentage in de huidige toestand al buiten de optimale range ligt. Desondanks lijkt hier wel sprake te zijn van enige verdroging. De zachthoutoobossen worden niet beïnvloed. In de graslanden langs de zandmaas zijn wel veranderingen zichtbaar. De relatief natte delen inunderen wat minder vaak en de relatief droge delen wat vaker. Hierdoor komt een groter deel van het habitattypen juist binnen de optimale range te liggen. Een iets frequentere inundatie zal op de relatief zwak gebufferde stroomdalgraslanden bij Oeffelt voor iets meer buffering zorgen, hoewel er wel een bestaat risico op aanrijking met nutriënten.

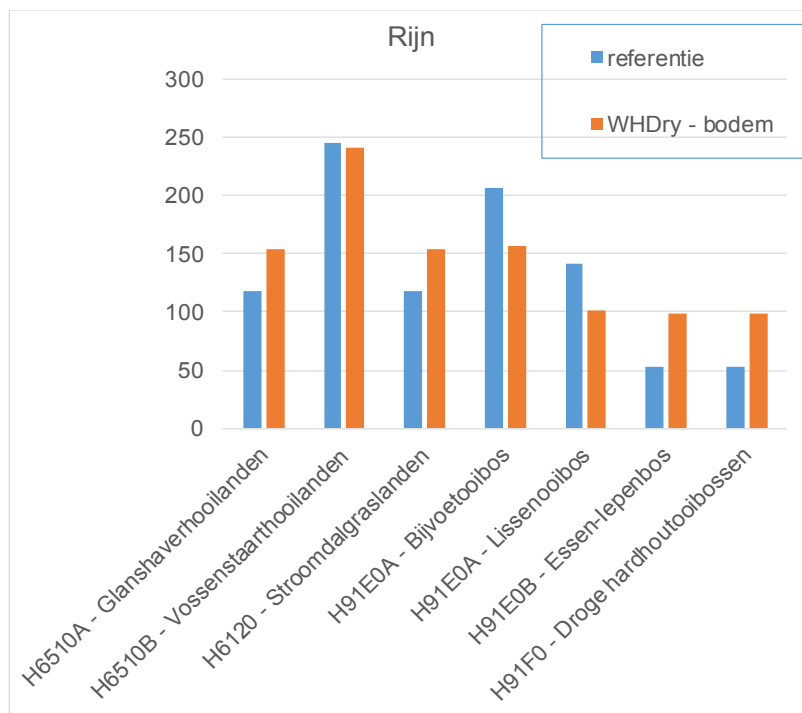
Effecten op potentieel areaal habitattypen

Naast effecten op de huidige groeiplaatsen hebben we ook de te verwachten effecten op het hele areaal (op basis van inundatieduur) bekeken (Figuur 4.11). Dit geeft een indicatie voor de omvang van de potentiële groeiplaatsen van de habitattypen. Er is volgens de Natura 2000 beheerplannen immers nog uitbreiding van het areaal van de verschillende habitattypen nodig.

Uit de berekeningen blijkt dat voor sommige habitattypen de kansen toenemen door klimaatverandering, voor andere neemt het juist af. Het areaal potentiële groeiplaatsen lijkt, op grond van inundatieduur, toe te nemen voor glanshaverhooiland, stroomdalgrasland, essen-iepenbos en hardhoutoobos. In de praktijk hangen de kansen voor de ontwikkeling

van deze habitattypen op nieuwe locaties ook af van vele andere factoren, zoals bodem, landgebruik en beheer. Vooral de bodem is hier een cruciale factor. De gronden die momenteel meer dan 20 dagen inunderen (en in de toekomst minder) zijn waarschijnlijk relatief kleiig. Dat zou betekenen dat hier wel kansen ontstaan voor glanshaverhooiland en essen-iepenbos, maar niet voor stroomdalgrasland en hardhoutooibos die zandiger substraat vereisen. Aan de bovenkant van de huidige range (minder dan 1 dag) zouden in theorie wel zandige substraten aanwezig kunnen zijn die voor deze laatste typen geschikt zijn. Een deel van deze terreinen zijn echter hoogwatervrij of kennen geen natuurlijke vegetatie. Door bovengenoemde factoren is dus geenszins zeker dat dit potentiële areaal ook daadwerkelijk gerealiseerd kan worden, maar de kans dat er een geschikte groeiplaatsen ontstaan voor glanshaverhooiland en essen-iepenbos lijkt dus reëel. Voor stroomdalgrasland en hardhoutooibos is dat nog maar zeer de vraag; dit vereist nadere gebiedsgerichte analyses.

Het ontstaan van potentieel nieuwe groeiplaatsen is belangrijk omdat voor glanshaverhooilanden, stroomdalgraslanden, essen-iepenbossen en hardhoutooibossen uitbreidingsopgaves gelden en de laatste drie ook een zeer ongunstige staat van instandhouding hebben. Omdat het ernaar uit ziet dat het aantal nieuwe potentiële groeiplaatsen voor stroomdalgraslanden en hardhoutooibossen het meest beperkt is, is het belangrijk extra alert te zijn op potenties voor deze typen op relatief zandige en hooggelegen locaties. Ten slotte is het goed om op te merken dat het areaal potentiële groeiplaatsen juist afneemt voor de zachthoutooibossen en vochtige tot natte graslanden. Deze laatste behoren in het bovenstroomse deel van de Rijntakken overigens meestal niet tot een habitattypen. Ze kunnen echter wel leefgebied zijn voor aangewezen soorten, zoals kwartelkoning en watersnip.



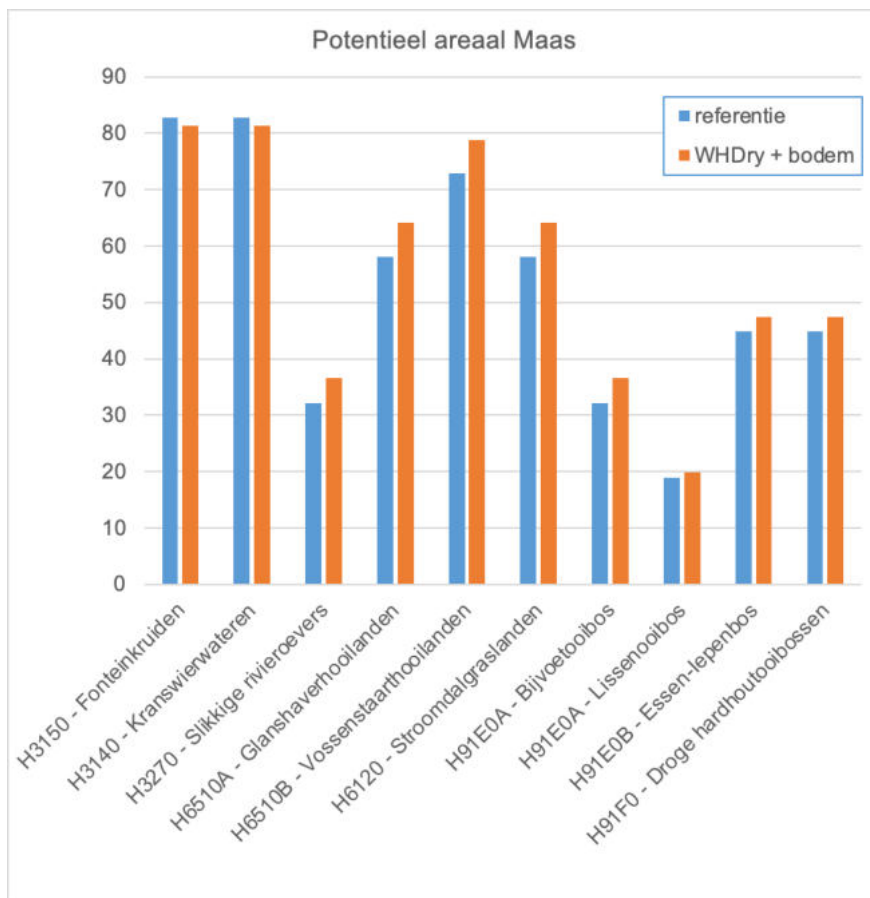
Figuur 4.11: Verandering in potentieel geschikte groeiplaatsen (op basis van inundatieduur) voor verschillende habitattypen langs de Rijntakken.

Figure 4.11: Changes in potential suitable area for habitat (based on inundated areas) along the river Rhine.

Langs de Maas is de verandering van potentiële arealen (gebieden die op basis van hun inundatieduur geschikt zijn voor de ontwikkeling van het betreffende habitattypen) anders dan langs de Rijn (Figuur 4.12). De arealen van alle niet-aquatische habitattypen (van slikkige rivieroever tot hardhoutooibos) nemen iets toe: tussen de 5% en de 14%. Dit komt omdat

de mediane waterstand iets lager komt te liggen en tegelijkertijd de hoogste pieken wat hoger uitkomen. Nu kan areaal niet zomaar toenemen, zonder dat er ergens ook areaal afneemt. Dit gaat ten koste van momenteel niet overstroomt areaal; het overstroomde winterbed wordt groter.

Ook in de natte delen verdwijnt er areaal: de berekende potentiële arealen voor watervegetaties nemen met enkele procenten af. Het is de vraag hoe dit in de praktijk uitpakt: het oppervlaktewater neemt af bij een dalende waterstand, maar mogelijk neemt hierdoor vooral het areaal diep water af. De habitattypen komen vooral voor in ondiepe delen; of die afnemen is niet te zeggen zonder gedetailleerde dieptekaart.



Figuur 4.12: Verandering in potentieel geschikte groeiplaatsen (op basis van inundatieduur) voor verschillende habitattypen langs de Maas.

Figure 4.12: Changes in potential suitable area for habitats (based on inundated areas) along the river Meuse.

4.7.3 Droogte

Naast hoge waterstanden, hier vertaald naar inundatieduur, zijn ook de mediane en lage waterstanden van belang voor vegetaties. Deze bepalen immers hoeveel droogtestress een vegetatie in het groeiseizoen te verduren krijgt, samen met het bodemtype. Als de grondwaterstand wegzakt droogt (grof) zand zeer snel uit, terwijl zavel en lichte klei veel langer en meer vocht naleveren. Zware klei heeft, net als zand, een beperkt vocht

naleverend vermogen, ook daar krijgen vegetaties snel te maken met droogtestress (Runhaar & Hennekens, 2014).

Slikkige rivieroeveren (H3270 en Lissenooibossen (H91E0A-2) verdragen geen of hooguit enkele dagen droogtestress, Vossenstaartgraslanden (H6510B), Bijvoetooibossen (H91E0A-1) en Essen-Iepenbossen (H91E0B) hooguit enkele weken en glanshaverhooilanden (H6510A) tot een maand (Runhaar & Hennekens, 2014). Stroomdalgraslanden (H6120) en Abelen-Iepenbossen (H91F0) daarentegen komen juist voorál (of uitsluitend) voor op bodems met één tot vijf weken droogtestress. Waterplantenvegetaties zijn uiteraard zeer gevoelig voor droogtestress, hoewel kortdurende droogval voor sommige soorten ook een positief effect kan hebben.

4.7.4 Veranderingen habitattypen door droogte

Lagere rivierpeilen in de zomer evenals langere droge perioden zorgen voor meer droogtestress. Een hogere temperatuur verstrekt dit effect. Doordat rivierstanden als gevolg van klimaatverandering vroeger in het jaar dalen (minder smeltwater- en meer regenrivierkarakter) treedt de droogtestress ook eerder in het jaar op. Een belangrijke factor hierin is de amplitude (het verschil tussen het maximum en minimum peil) van het rivierpeil, die afneemt in benedenstroomse richting. Stuwen hebben eveneens een dempend effect op de amplitude. Sommige vegetaties komen dan ook alleen in het benedenstroomse deel van het rivierengebied voor (kievitsbloemhooilanden) of zijn juist beter ontwikkeld in het bovenstroomse deel (slikkige rivieroeveren). De volgende effecten van droogte zijn te verwachten:

- In hardhoutooibossen (H91F0) en essen-iepenbossen (H91E0B) worden geen effecten van droogtestress verwacht, omdat het microklimaat en de humusrijke bodem de vochtigheid stabiliseren.
- In bijvoetooibossen op de oeverwallen (H91E0A-1) worden ook geen effecten verwacht. De hier aanwezige bomen bereiken met hun wortels het grondwater en de ondergroei bestaat reeds uit zeer droogte resistente soorten. Mogelijk wordt de ontwikkeling van nieuwe bossen vanuit zaailingen wel geremd (meer zaailingsterfte door droogtestress);
- In de lissenooibossen in uiterwaarden (H91E0A-2) zal vrijwel zeker een achteruitgang in kwaliteit optreden. Goed ontwikkeld lissenooibos bevat soorten van natte omstandigheden zoals gele lis, watermunt, grote wederk, moeraswalstro en scherpe zegge. Als de grondwaterstanden te diep wegzakken en droogtestress optreedt, dan gaan fioringras, rietgras of grote brandnetel domineren. Deze vormen behoren nog wel tot het habitatype, maar behoren tot de matig ontwikkelde vorm.
- Waarschijnlijk zal droogtestress een effect hebben op glanshaverhooiland (H6510A). Het gaat dan zowel op de relatief lange periode als vooral het eerder optreden van droogtestress. In principe zou het hooggelegen deel van de glanshaverhooilanden over kunnen gaan in stroomdalgrasland, maar voorwaarde is wel dat de bodem voldoende zandig en schraal is. Dat is vaak niet het geval in de huidige situatie.
- Voor stroomdalgraslanden (H6120) wordt verwacht dat meer dagen met droogtestress in de zomerperiode in principe geen groot probleem hoeft te zijn. Het eerder optreden van droogtestress, in de bloeiperiode (15 mei – 15 juni), zou echter wel een probleem kunnen zijn omdat de planten hierdoor niet tot bloei en zaadsetting kunnen komen.
- Voor kievitsbloemhooilanden (H6510B) zijn de directe effecten van klimaatverandering beperkt, omdat deze in het benedenstroomse deel van het rivierengebied liggen waar de peildynamiek gedempt is en rivierinsnijding een beperkte rol speelt. Wel worden deze habitats bedreigd door indirecte effecten; klimaatverandering noopt tot een betere hoogwaterbescherming (Balgstuw) en tot een grotere zoetwaterbuffer (peil IJsselmeer). Dit kan de peildynamiek in de beneden-IJssel beïnvloeden. Enkele van de best ontwikkelde voorbeelden van dit habitatype komen voor in zomerpolders, waar het peil gereguleerd kan worden. Dit kan een oplossing zijn als het habitatype onder de veranderende omstandigheden achteruit dreigt te gaan.
- Slikkige rivieroeveren zijn bij uitstek een habitatype dat afhankelijk is van droogval en dus zal droogte een grote invloed hebben op de lokale verspreiding van dit type. De

pioniervegetaties met éénjarige soorten zijn echter zeer goed in staat zich aan te passen aan veranderende omstandigheden en mee te schuiven met de specifieke omstandigheden op een locatie in een bepaald jaar. Het habitatype zal verdwijnen uit geulen die te langdurig droogvallen, maar dit wordt mogelijk gecompenseerd door geulen die voor het eerst droogvallen en snel gekoloniseerd worden. Hoe dit netto uitvalt is afhankelijk van de exacte lokale situatie (hydrologie en bodem). De nevengeul in de Klompenwaard bijvoorbeeld valt vaak dermate lang droog dat het habitatype slijkige rivieroeveren vaak niet tot ontwikkeling komt. In de Gamerensche Waarden ligt een heel complex aan nevengeulen met veel variatie in diepte, waardoor hier altijd wel plekken zijn waar het habitatype tot ontwikkeling kan komen (Figuur 4.13).



Figuur 4.13: De grote geul in de Gamerense waard, langs de Waal, in oktober 2015. Grote delen zijn drooggevallen, maar een brede zone met pioniervegetatie heeft zich langs de vochtige oever gevestigd (foto: W. Liefveld).

Figure 4.13: The big side channel in the Gamerense waard, along the river Waal in October 2015. Large areas are dry, but in the broad area with pioneer vegetation has colonized the moist banks of the side channel (photo: W. Liefveld).

Voor waterplantenvegetaties zijn deels dezelfde mechanismen bepalend, maar er zijn ook belangrijke verschillen; de focus verschuift van inundatiefrequentie naar droogvalfrequentie en droogvalperiode. Voor de bedekking van waterplanten zijn verschillende parameters van belang die samenhangen met peilfluctuaties (Van Geest & Teurlincx, 2014; van Geest *et al.*, 2019), namelijk:

- (1) de waterdiepte tijdens de start van het groeiseizoen (optimaal is 0,5 – 1,5 m in mei);
- (2) de tijdsduur dat in het groeiseizoen water aanwezig is (minimaal 3 maanden aaneengesloten watervoerend in de periode mei t/m augustus);
- (3) de mate van uitdroging van de standplaats bij droogval (grondwaterstand);
- (4) de stabiliteit van bovengenoemde factoren gedurende achtereenvolgende jaren; voor hoge waterplantenbedekkingen zijn 8 tot 10 gunstige jaren nodig.

De effecten verschillen per vegetatie of soort. In het algemeen zullen soorten die gebaat zijn bij weinig variatie in de groeicondities het zwaarder krijgen ten opzichte van soorten die bestand zijn tegen (of zelfs gebaat bij) dynamiek. Zo zullen de kansen voor kranswieren toenemen als uiterwaardwateren vaker droog gaan vallen in het najaar door frequentere en langere droge periodes. Soort als gele plomp, glanzig fonteinkruid en watergentiaan zijn juist gebaat bij weinig peilfluctuaties en zullen mogelijk in bedekking afnemen door klimaatverandering (van Geest *et al.*, 2019) (Figuur 4.14). Omdat deze drie soorten

kenmerkend zijn voor het habitatype 'Meren met krabbenscheer en fonteinkruiden', zullen de doelstellingen voor dit habitatype ook moeilijker gehaald kunnen worden. Van belang is daarbij dat in deze studie het effect van rivierinsnijding niet is meegenomen.

Omdat verschillende factoren door elkaar spelen, is het niet altijd makkelijk de effecten van klimaatverandering nu al in het veld terug te zien. Als gevolg van de droogte van de drie opeenvolgende jaren 2018, 2019 en 2020 lijkt bijvoorbeeld het bestand aan gele plomp in de Millingerwaard af te nemen: er is slechts nog ca. 10% over van de oorspronkelijke bedekking, de wortelstokken zijn verdroogd en afgestorven. Watergentiaan handhaaft zich hier vooralsnog beter; wat niet correspondeert met Van Geest *et al.* (2009). Mogelijk handhaaft watergentiaan zich beter dit omdat deze gemiddeld in iets dieper water voorkomt op tijdelijk droogvallende oevers. De soort neemt hiermee een intermediaire positie in. In het veld zijn dit soort effecten zoals verwacht meer zichtbaar in de bovenstroomse gebieden dan in de benedenstroomse trajecten (pers. com. G. Kurstjens, Rijn in beeld kartering).



Figuur 4.14: Waterplanten reageren verschillend op droogval: watergentiaan is robuust tegen tijdelijke droogval terwijl gele plomp gevoelig is tegen droogval (foto: M. Dorenbosch).

Figure 4.14: Macrophyte species have variable responses to desiccation: Nymphoides peltata is relatively resistant, whereas Nuphar lutea is sensitive to desiccation (photo: M. Dorenbosch).

5 Beheerders aan het woord

In de volgende hoofdstukken gaan we op zoek naar passende mitigerende maatregelen bij de knelpunten die in de voorgaande hoofdstukken geïdentificeerd zijn. Om dit goed aan te laten sluiten bij de beheerpraktijk, hebben we interviews afgenomen met acht beheerders uit het rivierengebied. Ter voorbereiding hiervan is ook een enquête afgenomen bij een grotere groep beheerders. Dit hoofdstuk geeft een samenvatting van de hiermee opgehaalde informatie.

In de enquête en interviews hebben we gevraagd (zie bijlage 3a) naar de effecten van klimaatverandering die beheerders nu al signaleren in het veld en welke mitigerende maatregelen ze ervaring mee hebben. Ook hebben we beheerders gevraagd naar hun visie op de haalbaarheid van de huidige natuurdoelen in relatie tot klimaatverandering.

De enquêtes waren bedoeld om een eerste indruk te krijgen van de problematieken waar beheerders tegenaan lopen. Dit is meegenomen in de interviews die daarop volgden. Door de lage respons op de enquêtes (n=19 van 37 verstuurde enquêtes) is deze informatie beperkt representatief. Samen met de interviews geeft de onderstaande uitwerking wel inzicht in wat er leeft onder beheerders met betrekking tot klimateffecten langs rivieren, waar ze tegen aan lopen en mogelijke oplossingen die ze zien. In bijlage 3b is ook een gedetailleerde uitwerking van de enquête opgenomen. In Figuur 5.1 is een aantal uitspraken weergegeven die meermalen genoemd zijn tijdens de interviews en in Tabel 5.1 veldervaringen van effecten door klimaatverandering en mogelijke oplossingen van beheerders uit de enquêtes en aangegeven tijdens de interviews.



Figuur 5.1: Enkele uitspraken die door meerdere geïnterviewden zijn genoemd.

Figure 5.1: A few quotes from people interviewed.

Hoewel klimaatverandering een langzaam proces is, zien veel beheerders nu al effecten in het veld. 'De klimateffecten blijken veel groter dan gedacht en vinden in de tijd sneller plaats'. Andere processen kunnen deze effecten versterken of verzwakken, zoals bijvoorbeeld de hydrologie (kweldruk en grondwaterkwaliteit) en de verrijking vanuit de bodem en de

lucht. 'Natuur, zeker in het rivierengebied is niet eenvoudig stuurbaar'. Waterstanden zijn daarin toch behoorlijk bepalend. Deze zouden volgens enkele ondervraagden meer leidend mogen zijn in de keuzes voor de typen ecosystemen en bijpassende soorten die in een gebied nagestreefd worden.

'Als de klimaatverandering in het huidige tempo doorgaat zal dat er vrijwel zeker toe leiden dat soorten en habitats gaan verdwijnen'. Natte moerassen langs dynamische rivieren krijgen het moeilijker. Dit is slechts deels het gevolg van klimaatverandering. Insnijding van de rivierbodem is in de bovenstroomse delen van de Rijntakken een dominant proces, dat verdroging van de aanliggende uiterwaarden veroorzaakt.

Om klimaatverandering op te vangen vindt het merendeel van de geïnterviewden dat hiervoor robuuste, spontane natuur nodig is waarbinnen diverse deelbiotopen aanwezig zijn voor de verschillende levensstadia van soorten en waar soorten zich kunnen her-rangschikken, verspreiden en migreren'. Hiervoor moet meer ruimte komen en dus grond aangekocht worden, ook in de regionale watersystemen, en moeten natuurgebieden met elkaar verbonden worden, en veel natuurlijker beheerd worden. Dit dient zowel binnendijs, als buitendijs te gebeuren. Hiermee en met de waterhuishouding herstellen kan men veel problemen tegelijk oplossen: erosieproblemen, watertekort, droogteschade, wateroverlast en kwijnende natuur.

Over vasthouden aan of loslaten van streefbeelden zijn de meningen verdeeld. Hierbij is een deel voorstander van procesnatuur en een deel streeft naar behoud van wettelijk beschermde riviernatuur die gericht beheer vraagt. Enkele reacties: 'Streefbeelden moet je durven los te laten'; 'De natuur moet je veel ruimte geven'; 'Laat natuurlijke processen hun werk doen', dan ontstaat vanzelf veerkrachtige natuur en 'Bijstellen van de streefbeelden is wel de gemakkelijkste uitweg', eigenlijk te gemakkelijk, dat is een soort van opgeven.

Bij degenen die de huidige streefbeelden aanhouden, speelt mee dat men bang is voor te lage ambities (met name nu al kwetsbare soorten en habitats zullen dan in de knel komen en mogelijk verdwijnen) en voor ondermijning van de hard bevochten wettelijke bescherming die natuur heeft met de KRW- en N2000 richtlijnen.

'Overal de streefbeelden halen is niet mogelijk'. Door te zoneren en de meest kansrijke locaties op orde te houden en deze met elkaar te verbinden behoud en ontwikkel je een ecologische structuur die nodig is en zorgt voor het behalen van de (huidige) doelen. Bijna alle geïnterviewden geven aan dat 'connectiviteit' en 'schaal' hierbij sleutelwoorden zijn voor 'robuuste' en 'veerkrachtige systemen'. Alle geïnterviewden zijn min of meer voorstander van het met beleid periodiek tegen het licht houden van streefbeelden op basis van de potenties die systemen hebben en de nieuwste inzichten en ontwikkelingen. Zo kan tussentijds bepaald worden of aanvullende of andere maatregelen nodig zijn. De haalbaarheid van referentiebeelden wordt overigens niet alleen bepaald door klimaatverandering.

'Beheerders hebben te maken met een resultante van alle veranderingen en omstandigheden die optreden'. Naast klimaatverandering spelen er nog meer factoren die zowel positief als negatief kunnen doorwerken, zoals bijvoorbeeld:

- De afgelopen decennia is de waterkwaliteit op een aantal punten verbeterd;
- Hoogwaterveiligheid in relatie het beheer van vegetaties in uiterwaarden;
- De bodeminsnijding die met name speelt in de bovenstroomse delen van de Maas en Rijn;
- Natuurlijke successie van vegetaties;
- De invloed van de uitgevoerde inrichtingsprojecten in het kader van HWBP, RvR en KRW
- Verandering kweldruk en grondwaterkwaliteit;
- Stikstofdepositie;
- Watergebruik voor landbouw, drinkwaterwinning en voeding van kanalen;
- etc.

Deze aspecten zijn in de huidige studie niet in samenhang beoordeeld, maar wel van belang voor de uiteindelijke resultaten.

Over het algemeen zien de geïnterviewden water vasthouden de belangrijkste klimaatmitigerende maatregel. Naast buitendijks (overstromingsvlaktes) en binnendijks water vasthouden, vindt men het belangrijk water vast te houden in de haarvaten en brongebieden.

Veel van de geïnterviewden geven aan dat de kennis over klimaateffecten binnen hun organisatie enigszins versnipperd aanwezig is, 'dat zou beter kunnen'. 'Wellicht is het een idee om een gericht monitoringprogramma op te zetten voor klimaateffecten op (rivier)natuur'. Doel zou zijn meer kennis te verkrijgen over de effecten, gevolgen en mogelijke mitigerende maatregelen. In het ontwerpproces van inrichtingsmaatregelen wordt klimaatverandering nog maar mondjesmaat meegenomen. 'Neem klimaatrobuustheid standaard mee als te beoordelen onderwerp tijdens de kwaliteitscontrole van een ontwerp door Q-teams'.

'Er is betere afstemming nodig tussen beheerders (RWS, waterschappen, beheerders, etc.) over de manier van aanpak van exotenbestrijding'. Goede gezamenlijke afwegingen maken, bijvoorbeeld, bestrijden van exotische waterplanten alleen van boven- naar benedenstrooms, want anders treedt herbesmetting op. Overigens heeft het voorkomen van exoten maar ten dele te maken met klimaatverandering.

Zomerhoogwaters

Rivier- en terreinbeheerders werden in de zomer van 2021 verrast door een plotselinge hoogwatersituatie. Net als de winterhoogwaters worden dit soort situaties veroorzaakt door een mix van weersinvloeden en landinrichting. Door klimaatverandering zullen zomerinundaties zich vaker voor kunnen gaan doen (Kreienkamp *et al.*, 2021)). De meeste beheerders hadden dit aspect niet op hun netvlies ten tijde van de enquêtes, die voor of net na het zomerhoogwater van juli 2021 plaatsvonden, en ook in de interviews kwam hier weinig informatie over naar voren. Daarom is in een later stadium een korte aanvulling over dit aspect aangeleverd vanuit Staatsbosbeheer (pers. com. A. Blankena). Beheerproblemen die optreden hebben nadrukkelijk een kostenaspect:

- Vee moet bijgevoerd worden in de zomer, omdat de geïnundeerde uiterwaarden niet begaanbaar zijn en het gras oneetbaar is voor het vee, terwijl dit normaal niet nodig is;
- Evacuatie van vee kan nodig zijn: niet elk gebied met seizoensbegrazing heeft hoogwatervluchtplaatsen;
- Het hooi van de hooilanden kan niet binnengehaald worden of is moeilijk afzetbaar omdat er slib op is afgezet. De SNL-subsidies geven dan onvoldoende kostendekking;
- Veel rasters spoelen weg, met hoge herstelkosten als gevolg;
- Meer zwerfafval en kosten voor opruimen;
- Meer dode dieren en kosten voor ruimen (deels publiekswestie).

Tabel 5.1: Veldervaringen van effecten door klimaatverandering en mogelijke oplossingen van beheerders uit de enquêtes en aangegeven tijdens de interviews.

Table 5.1: Field experiences of effects of climate change and possible measures of managers collected from the questionnaire and during the interviews.

Vraag	Aspect
klimaat effecten waargenomen	• isolatie gebieden • vissterfte • meer zwerfvuil • droogte • slechte waterkwaliteit → hoge T, lage O₂, piekbelasting vanuit RWZI (concentratie-effect) • snelle successie en verzuivering • lage rivierstand → meer 'knak aal'
habitats/soorten in de knel	• rietmoerassen • ondiep water habitats, overstromingsvlaktes • koudeminnende soorten • kwelplassen • macrofauna met meerjarige ontwikkeling
habitats/soorten met voordeel	• exoten • stroomdalgraslanden • hardhoutoibossen • warmteminnende soorten
oplossingen	• water vasthouden (buffers tegen droogte) • schaal → robuuster en veerkrachtiger • connectiviteit → uitwijkmogelijkheden, rekolonisatie • dynamisch stuwbeheer • overdimensionering • lange termijn, niet ad hoc, van groot naar klein • stuurknoppen inbouwen bij inrichting (regelwerken) • variatie in waterdiepte, begroeiing • faciliteren schaduw bomen en struiken
toekomst	• vasthouden streefbeelden • loslaten streefbeelden • niet alles overal willen, maatwerk • leer meer van buitenlandse maatregelen • kennis vasthouden in beheerorganisaties
tips	• vergeet de haarkvaten niet • zet monitoring op voor klimaat effecten • opnemen klimaat als onderwerp in Q-teams • landelijke afstemming exoten bestrijding

6 Mitigerende maatregelen

6.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken is duidelijk geworden welke effecten van klimaatverandering (gecombineerd met het effect van bodeminsnijding in de bovenstroomse trajecten) in het rivierengebied ophanden zijn, deels zijn de effecten al in de huidige tijd zichtbaar.

Klimaatverandering resulteert in sommige gevallen in ecologische kansen, vooral voor de iets drogere vegetatietypes en soorten die passen bij korte inundaties in de uiterwaarden, zoals stroomdalgraslanden en de drogere bostypen. Uiteraard moeten daarbij ook de andere milieuparameters op orde zijn. Voor vegetatietypen die afhankelijk zijn van langdurige inundaties zoals natte zachthoutoibossen (bijv. Lissenoibos) en moerasvegetaties, zal de kwaliteit in vooral de bovenstroomse delen van de rivier in gevaar komen. Ook voor soorten die slecht tegen warmte kunnen of die afhankelijk zijn van ondiep water in het voorjaar en zomer, nemen de risico's toe. Soorten die daarnaast ook nog stromend ondiep water nodig hebben in voorjaar en zomer zijn nog kwetsbaarder.

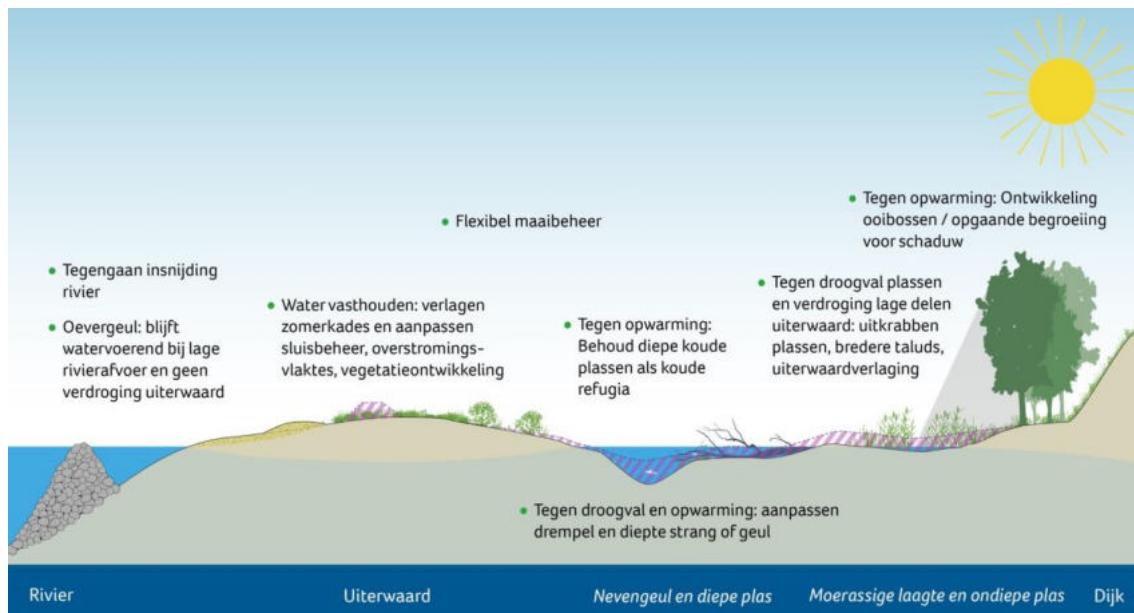
In sommige benedenstroomse rivierdelen zijn er juist kansen voor soorten en habitats die baat hebben bij langdurige overstromingen, hier neemt het areaal dat overstroomd raakt juist toe. In benedenstroomse rivierdelen is door de opstuwende werking van de stijgende zeespiegel waarschijnlijk minder sprake van stroming. Dit laatste is voor stroomminnende soorten weer ongunstig.

Om deze effecten te beperken of juist te faciliteren zijn grootschalige maatregelen nodig. Duidelijk is dat het klimaatverandering zelf niet zomaar gekeerd zal kunnen worden, zelfs als de afspraken uit de klimaatakkoorden wel gehaald worden. Beheerders van het rivierengebied zullen dus hoe dan ook moeten omgaan met de effecten van klimaatverandering. Ze kunnen hierbij meebewegen of mitigeren. Welke strategie opportuun is hangt af naar welk aspect we kijken en waar het betreffende gebied in de rivier ligt. Vaak is een gecombineerde strategie het meest logisch.

Omdat klimaatverandering niet door een rivierbeheerder tegengegaan kan worden, zullen de vestigingskansen van warmteminnende soorten onherroepelijk beter worden. Mogelijk zullen deze soorten op termijn ook als doelsoort gehanteerd gaan worden (meebewegen). Tegelijk kan de rivierbeheerder met de inrichting en beheer van het rivierengebied wel rekening houden met het beschikbaar maken of behouden van kouder water, bijvoorbeeld door sommige diepe plassen als koude refugium te behouden en door het faciliteren van de schaduwwerking van bomen en struiken in de uiterwaard. Op deze manier kunnen de effecten van opwarming van water lokaal tot op zekere hoogte gemitigeerd worden, in warme periodes blijft kouder water beschikbaar.

Een ander voorbeeld van mitigatie is het inspelen op het zo efficiënt mogelijk benutten van hoogwatergolven die zich in de (late) winter voordoen, ook in een warmer klimaat. Nevengewalen en strangen kunnen bijvoorbeeld voldoende diep worden aangelegd, desnoods kunnen drempels worden aangebracht om langer water vast te houden. Kurstjens *et al.* (2020) onderstreepte reeds het belang en de kansen van natte overstromingsvlaktes. Bij het vormgeven van nieuwe overstromingsvlaktes moet robuust op klimaatverandering worden ingespeeld door de juiste locaties te kiezen (die nog frequent inunderen bij een warmer klimaat), voldoende lage bodemprofielen aan te houden en op voorhand regelwerken aan te brengen om hoogwater uit de winterperiode tot ver in het voorjaar vast te houden.

In Figuur 6.1 zijn mogelijke mitigerende maatregelen gevisualiseerd. In tabel 6.1 zijn deze verder uitgewerkt.



Figuur 6.1: Schematische weergave van maatregelen die in het rivierengebied genomen kunnen worden tegen de verandering van processen veroorzaakt door klimaatverandering.

Figure 6.1: Schematization of some measures to mitigate the change in processes along rivers due to climate change.

In de interviews met de beheerders kwam duidelijk naar voren dat men zich bewust is van het grote schaalniveau van de klimaatproblematiek. Maatregelen voor klimaatadaptatie in het rivierengebied moeten dan ook beschouwd worden in het grotere perspectief van het ecologische netwerk waar de rivier deel van uitmaakt.

Een uitgangspunt voor adaptatie moet *systeemherstel* zijn, waarbij het beleid zich moet richten op het beter laten functioneren van ecosystemen door het creëren van de juiste abiotische condities. Dit past het best bij de dynamiek van rivierecosystemen en de verwachte veranderingen daarin (Makaske & Maas, 2013). In een veranderend klimaat is het verder belangrijk om de veerkracht van rivierecosystemen op peil te houden of te vergroten. Dit betekent dat maatregelen gericht moeten zijn op: (1) het vergroten van natuureenheden, (2) het verbinden van natuureenheden, en (3) het vergroten van de heterogeniteit binnen natuureenheden (Makaske & Maas, 2013). Dit zijn algemene uitgangspunten die meegenomen kunnen worden in de maatregelenprogramma's voor KRW en PAGW. Daarnaast zijn specifieke maatregelen voor beheer en inrichting denkbaar die inspelen op specifieke effecten op specifieke soorten en leefgebieden. Hier gaan we in de volgende paragrafen op in.

6.2 Mitigerende maatregelen temperatuur

De temperatuur van de lucht kan niet aangepast worden. Door meer opgaande begroeiing (bomen, struiken, riet) en daarmee beschaduwning in uiterwaarden toe te staan, kunnen de effecten van opwarming op de bodem, de lage vegetatie en de aanwezige ondiepe natte habitats enigszins getemperd worden. Het faciliteren van beschaduwning is bijv. inmiddels succesvol toegepast om de opwarming van enkele Nederlandse stromende beken tegen te gaan (Browne *et al.*, 2016; Verdonschot *et al.*, 2017).

Een andere mitigerende maatregel tegen de opwarming van aquatische habitats is het aanbrengen van meer landschapsdiversiteit, met speciale aandacht voor het creëren van verschillen in watertemperatuur (thermische habitatdiversiteit). Het doel van deze maatregel is het faciliteren van de aanwezigheid van koud water refugia tijdens warme periodes. Hierbij kan bijvoorbeeld gebruik gemaakt worden van kwelstromen (zowel diepe kwelstromen vanuit pleistocene zandgronden, als ondiepe rivierkwel) door deze te beschermen (grondwaterbesparing, niet afvoeren oppervlaktekwel). Ook temperatuur-gestratificeerde

diepe zand- of kleiwinputten of diepe oeversgeulen (zoals achter de langsdam in de Waal) die permanent met de rivier zijn verbonden vormen een waardevol koude-refugium in tijden van langdurige warmte (Collas *et al.*, 2019; Verstijnen *et al.*, 2022).

Ook een zogenaamde stuwgeul zou kunnen helpen bij het mitigeren van hoge watertemperaturen, waarbij een ondiepe geul achter een stuw wordt gescheiden van de hoofdstroom, zodat bij gemiddelde of lage afvoeren langer stromend (en koeler) water beschikbaar is (Vriese *et al.*, 2021). Ook de inrichting van de waterbodem en oevers kan hierbij een rol spelen (Van Geest, 2020).

Een deel van de ondiepe aquatische habitats in het rivierengebied wordt gevoed door kwelstromen uit dieper grondwater (Grensmaas, uiterwaarden langs de Nederrijn/Lek en langs de IJssel). Droogte in een warmer klimaat kan ook resulteren in een afname van deze kwelstromen door watertekorten. Watervasthoudende maatregelen buiten het rivierengebied hebben daarmee ook een positief effect op het behouden van koudere kwelstromen in het rivierengebied. Het uittreden van koude kwel in rivieruiterwaarden kan ook behouden worden door de bodemhoogte van kwelzones te verlagen waardoor ze langer (kouder) water behouden.

Langs de Limburgse Maas monden diverse beken in de Maas uit. Deze beken zijn doorgaans enkele graden kouder dan de Maas. De invloed van het koudere water in de beekmonding kan een prominentere rol in de Maasuitwaard krijgen door het mondingstraject te verlengen en de connectiviteit met de Maas te verbeteren.

Naast grond- of beekwatertoestroom is ook de doorstroming van de rivier of nevengeul een beperkende factor voor opwarming van het water. Hoe meer stagnatie, des te sneller warmt het water op. Ook krijgen neveneffecten, zoals (blauw) algenbloei of botulisme hierbij meer kans. Een zo lang mogelijke doorstroming van nevenwateren in de zomer (bijvoorbeeld plassen en dode rivierarmen) kan dus ook als mitigerende factor worden gezien. Doordat hier niet, zoals in de hoofdstroom, menging van het water optreedt door scheepvaart, kan hier makkelijker gelaagdheid in temperatuur ontstaan en dus koude-refugia. Bij de aanleg van nieuwe nevengeulen moeten de ontwerpen zo zijn dat er ook onder de voorziene klimaateffecten voldoende debiet en stroomsnelheid blijft. Dit stelt strengere eisen aan instroom- en uitstroomopeningen en aan de dimensionering, geulen moeten voldoende diep en groot zijn om ook in de zomer voldoende water te ontvangen. Bij het ontwerpen van geulen en strangen kan bijv. gebruik gemaakt worden van waterstanden uit het klimaatscenario waarbij al ingespeeld wordt op lagere waterstanden, te meer omdat deze habitats jarenlang moeten kunnen functioneren.

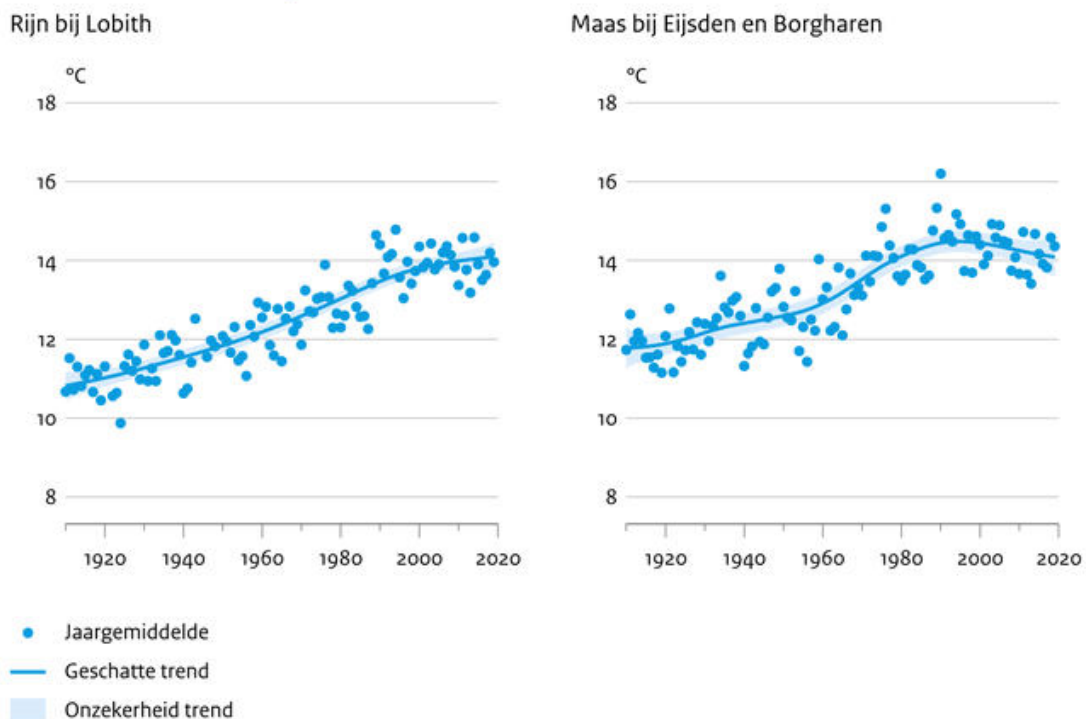
Uit een recente studie naar het ecologisch functioneren van diepe plassen (Verstijnen *et al.*, 2022) blijkt dat matig diepe plassen een belangrijke buffer kunnen vormen om warme perioden op te vangen voor verschillende aquatische soorten. Er is in die plassen een zone (ca. tussen 9 en 12 meter waterdiepte) waarin wel voldoende zuurstof beschikbaar is, maar ook het water nog enigszins gekoeld blijft. Dit pleit ervoor om diepe uiterwaardplassen aan te takken zodat ze bereikbaar zijn voor soorten uit de rivier en ze vooral niet integraal te verondiepen. Wel kunnen de oeverzones geoptimaliseerd worden om bredere helofytenzones of moerasbossen te creëren. Deze vegetatierijke zones fungeren zowel als leef- en schuilgebied (schaduw) voor allerlei soorten (Collas *et al.*, 2019), maar versterken ook de ecologische relaties en processen (primaire productie) langs de rivier. Dit maakt het rivierecosysteem robuuster en daarmee klimaatbestendiger. Bomen op de oever zullen de rivier niet koel kunnen houden, maar bomen langs oevers van nevengeulen kunnen dankzij hun schaduwwerking de opwarming van het water in de geul wel beperken (Studinski *et al.*, 2012; Noordhuis *et al.*, 2021).

In Groot-Brittannië wordt hier al jaren aan gewerkt in het 'Keeping rivers cool-project' (Woodland trust, 2016). Naast schaduwwerking hebben de bomen op de oever ook het voordeel dat ze voor rivierhout en bladmateriaal in het water zorgen, waar allerlei aquatische organismen weer van profiteren. Ook de opwarming van de bodem, en de verdamping wordt getemperd door bossen in uiterwaarden. Je hoeft maar één keer op een warme dag een

oibos in te lopen en je voelt direct het temperatuurverschil. Hoe hoger de bomen en hoe dichter het bladerdak, des te sterker het bufferende effect (Kaspar *et al.*, 2021). Daarmee vormt oibos ook voor allerlei terrestrische soorten (waar onder grote grazers) een belangrijk temperatuur refugium.

Verder behoeft het geen toelichting dat het beperken van opwarming door koelwaterlozingen ook actueel blijft. De recente afvlakking van de temperatuurstijging die de afgelopen eeuw te zien was in de Maas illustreert dat strengere lozingsnormen effectief zijn (Figuur 6.2). Nieuwe ontwikkelingen, zoals warmte-, en koudeopslag, zullen de komende jaren toenemen. Hierbij moeten de temperatuureffecten op het ontvangende (of leverende) water goed in de effectbeoordeling meegenomen worden. Hergebruik van restwarmte voor andere productieprocessen verdient de voorkeur boven lozen. Dit vraagt creativiteit in de opzet van industriële zones langs de grote rivieren, waarbij rekening gehouden wordt met de mondiale opwarming.

Gemiddelde watertemperatuur



Figuur 6.2: Gemiddelde watertemperatuur bij meetstation Lobith en Eijsden in de afgelopen eeuw (bron: Compendium voor de Leefomgeving, www.clo.nl).

Figure 6.2: Mean water temperatures at monitoring sites Lobith (river Rhine) and Eijsden (river Meuse) during the last century (source: Compendium voor de Leefomgeving, www.clo.nl).

6.3 Mitigerende maatregelen droogte

Voor het tegengaan van de verdrogende effecten van klimaatverandering in combinatie met insnijding van het rivierbed, zijn verschillende mitigerende maatregelen in beeld. Doel van de maatregel zou moeten zijn om de drainerende werking op de uiterwaard te beperken. Bijvoorbeeld door het verschil tussen de waterstand in het zomerbed en de hoogteligging van de uiterwaard klein te houden. Dit bij voorkeur met een zo hoog mogelijke rivierbodem om de drainerende werking van de rivier te beperken. Dit kan bijvoorbeeld door de rivierbodem

te suppleren met sediment (zandmotor). In Nederlandse beken is hier inmiddels ervaring mee opgedaan (bijv. Springendalse beek). Bijkomend voordeel is dat de morfodynamiek toeneemt door de gunstiger breedte-diepte verhouding van het zomerbed en dat de uiterwaarden eerder inunderen. In de Grensmaas is de maatregel op kleine schaal ook al toegepast door grindsuppleties vanuit Vlaamse zijde.

Suppleties

Op dit moment start RWS Oost Nederland langs de Waal met een pilot om zandsuppleties toe te passen in kribvakken om daarmee zandafzetting in het zomerbed te vergroten of in elk geval de bodemerosie te remmen. Dit proces verkeert nog in de beginfase en zal ook als het grootschalig wordt uitgerold nog vele tientallen jaren duren. Ook door oevers te ontstenen en meer erosie toe te staan kan op natuurlijke wijze weer meer sediment in de rivier terechtkomen. Sedimenttekort is één van de grote rivierkundige problemen waar Nederland voor gesteld staat. Niet alleen in de bovenlopen, maar ook in de delta. De aanvoer van sediment van bovenstroomse trajecten is afgenomen door ingrepen in het riviersysteem (dammen bovenstrooms, vastleggen oevers) en de rivier voert het sediment versneld af door de normalisatie en kanalisatie. Het negatieve effect dat de bodeminsnijding heeft op de vochthuishouding in de uiterwaarden worden versterkt door de lagere afvoeren in het groeiseizoen als gevolg van klimaatverandering.

Als rivieren ondieper worden is het handig als schepen minder diepgang hebben. De belangstelling voor schepen met minder diepgang is al in gang gezet na de droge perioden van 2018 en 2019 (Scheepvaartkrant 30 maart 2020). Als er minder strenge eisen aan de vaardiepte gesteld worden, schept dit meer mogelijkheden voor zomerbed suppleties en vrij eroderende oevers als klimaat-mitigerende maatregelen.

Uiterwaardverlaging

Behalve de rivierbodem omhoog brengen kan natuurlijk ook de uiterwaard naar beneden gebracht worden door uiterwaardverlaging. Feitelijk wordt hiermee de overstromingsvlakte van de rivier verbeterd, die door de bedijking onnatuurlijk hoog is opgeslibd, waardoor de connectie met het zomerbed verstoord is. De maatregel is al in beeld sinds Ruimte voor de Rivier, omdat het ook een hoogwatermaatregel is: er ontstaat meer ruimte in het winterbed om piekafvoeren te bergen.

Het Grensmaasproject is een prachtig voorbeeld van een grootschalige toepassing van deze maatregel. Over vele hectares zijn de afgelopen jaren de weerden verlaagd door grindwinning waarbij ook grindige pioniermilieus, ondiepe oeverzones en natte rivierbegeleidende habitats zijn ontstaan (Figuur 6.3). Hierdoor is het winterbed ruimer geworden en is nieuwe riviernatuur ontstaan. Het lijkt er ook op dat deze verruiming gepaard gaat met geleidelijke verhoging van het zomerbed.



Figuur 6.3: Langs de Grensmaas zijn door weerdverlagingen veel hoog- en laagdynamische natte oeverzones ontstaan, zowel (foto: W. Liefveld).

Figure 6.3: Along the Common Meuse large amphibious high and low-dynamic areas are created by floodplain lowering, both. (Photo: W. Liefveld)

Overstromingsvlaktes

Het eerdergenoemde concept van overstromingsvlaktes (o.a. paragraaf 4.6) is een klimaatmaatregel bij uitstek. Het principe is een verbijzondering van de bovengenoemde uiterwaardverlaging, waarbij in dit geval het water na een hoogwater actief wordt vastgehouden door de bestaande zomerkades te handhaven en stuwtjes en sluisjes actief in te zetten voor het vasthouden van water, in plaats van het versneld afvoeren van het inundatiewater.

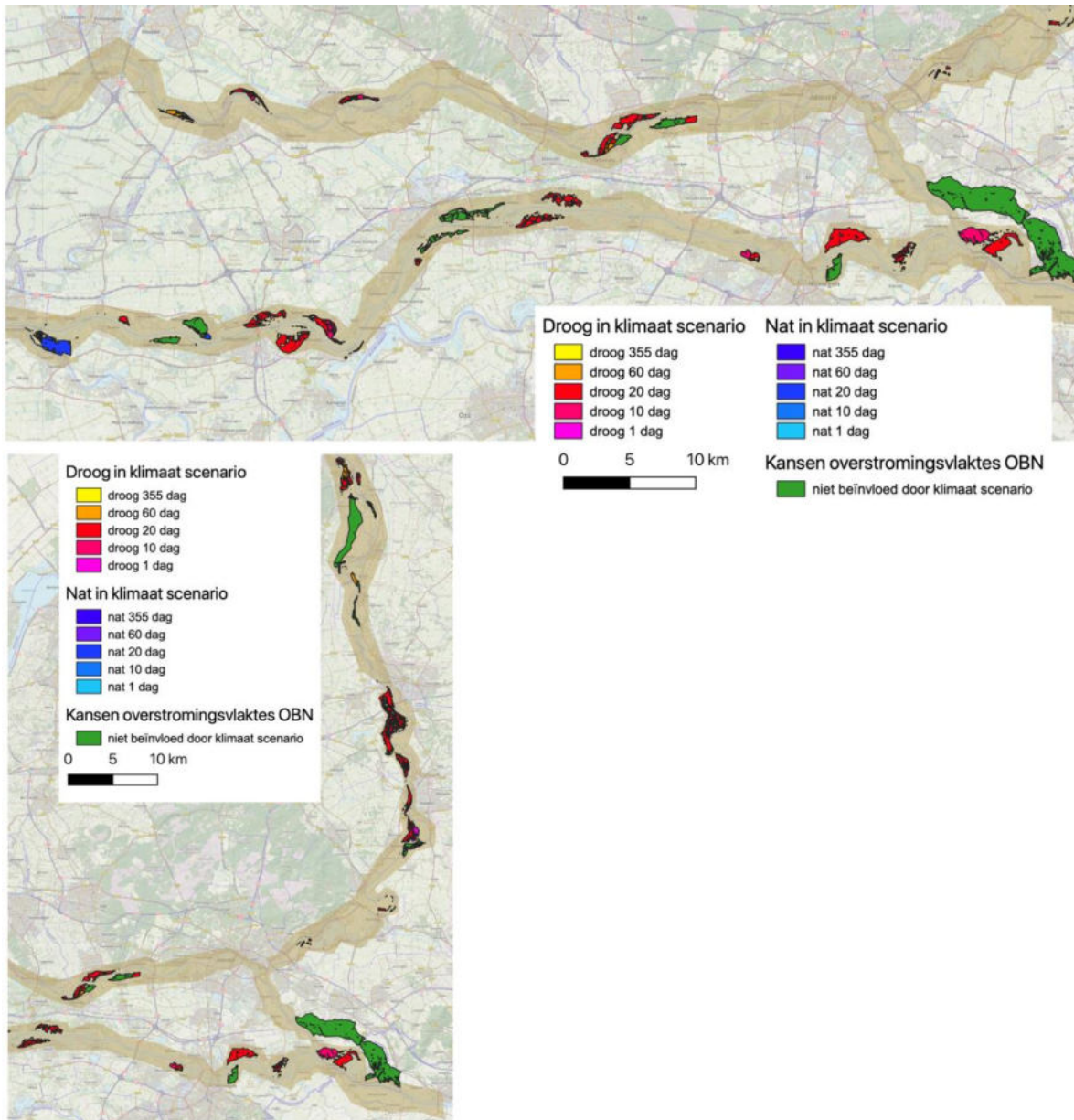
Naast het vasthouden van het rivierwater voor de ontwikkeling van watergebonden natuur, verbetert het ook de infiltratie van het rivierwater in de bodem: in plaats van het water zo snel mogelijk naar zee af te voeren, komt het nu de grondwateraanvulling ten goede. Het is dus zowel een mitigerende als een brongerichte maatregel.

In een eerder uitgevoerd OBN-onderzoek is een kansenkaart opgesteld die weergeeft welke gebieden langs de Rijntakken op basis van hoogteligging ten opzichte van de rivierafvoer, in potentie geschikt zijn om overstromingsvlaktes te herstellen (Kurstjens *et al.*, 2020). Bij het selecteren van deze gebieden zijn echter waterstanden uit de huidige tijd gebruikt. De hydrologische analyses uit deze klimaatstudie, maken het mogelijk om ook een combinatie te maken van het effect van klimaatverandering met de kansen voor overstromingsvlaktes van Kurstjens *et al.* (2020). Figuur 6.4 geeft voor de kansenkaart overstromingsvlaktes weer voor welke gebieden verdroging (afname van het inundatieareaal), vernatting (toename van het inundatieareaal) of geen effect (geen merkbare verandering van het inundatieareaal) verwacht worden in het WHdry-klimaatscenario.

Er zijn een aantal potentiële overstromingsvlaktes die duidelijk minder inunderen onder het klimaatscenario, voornamelijk in de bovenstroom van de Rijntakken, bijv. in de IJssel tussen Zutphen en Deventer, in de Nederrijn nabij Wageningen en in de Waal nabij Nijmegen en Druten.

Ook verder stroomafwaarts liggen echter potentiële overstromingsvlaktes die gevoelig zijn voor klimaatverandering, in de Waal bij Zaltbommel en de Lek nabij Culemborg. Voor deze gebieden zijn waarschijnlijk extra mitigerende maatregelen nodig zoals het verlagen van de bodem of slim watervast houden met regelwerken om de gebieden op de lange termijn ook daadwerkelijk als overstromingsvlakte te laten functioneren.

Er zijn in de Rijntakken tegelijkertijd echter ook potentiële overstromingsvlaktes die nauwelijks beïnvloed worden door klimaatverandering, bijv. een deel van de Rijnstrangen, uiterwaarden langs de IJssel ten noorden van Deventer, Buitenoij langs de Waal bij Nijmegen, uiterwaarden langs de Waal bij Tiel en bij Gameren en sommige polders langs de Nederrijn bij Wageningen. Tenslotte is er in de Waal nabij Vuren een potentiële overstromingsvlakte waar het overstromingsareaal juist toeneemt in het klimaatscenario. Bij het kiezen van gebieden om overstromingsvlaktes te realiseren ligt het voor de hand om eerst gebieden te selecteren waar het effect van klimaat neutraal is of waar juist meer inundatie verwacht wordt.



Figuur 6.4: Extrapolatie van het effect van klimaatverandering (deze studie) op de kansenkaart overstromingsvlaktes in de Rijntakken (Kurstjens et al., 2020). Rood = hier wordt verminderde inundatie verwacht, groene = neutraal wat betreft effecten van klimaat op inundatie, blauw = meer inundatie verwacht.

Figure 6.4: Extrapolation of the effect of climate change (this study) to the floodplain opportunity areas in the Rhine tributaries (Kurstjens et al., 2020). Red = reduced inundation is expected, green = neutral with regard to the effects of climate on inundation, blue = more inundations are expected.

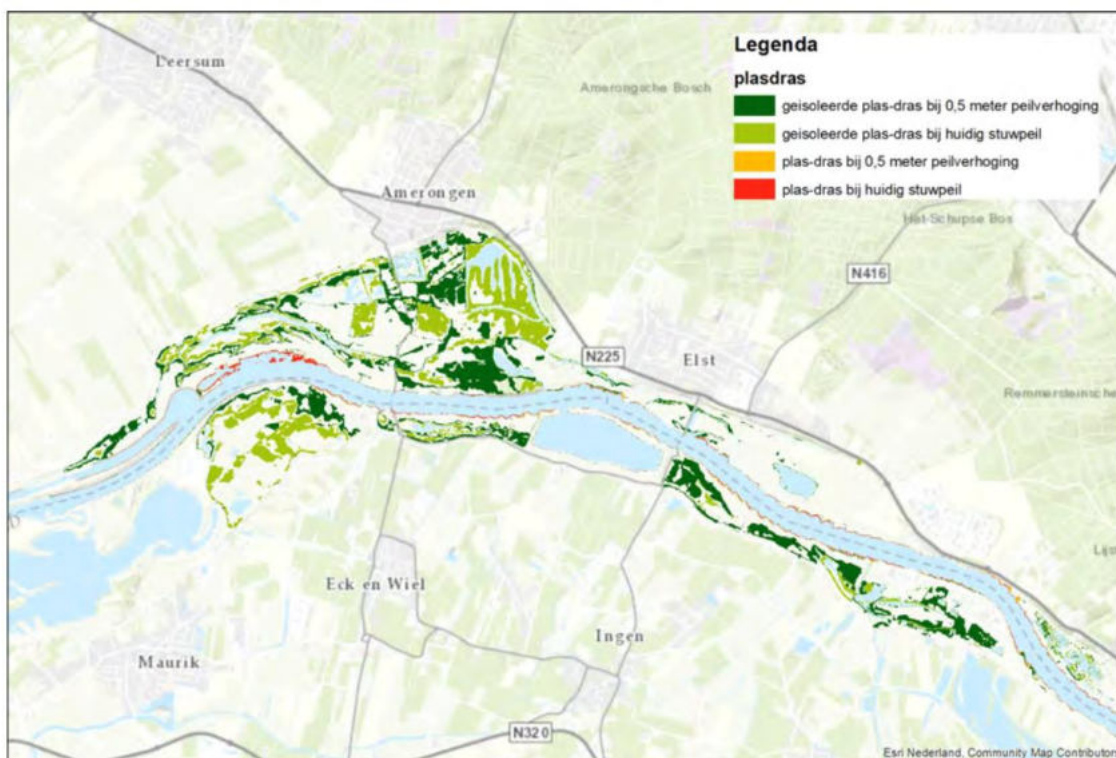
Verdrogingseffecten meewegen bij inrichtingsmaatregelen

Aandachtspunt in de strijd tegen verdroging van de uiterwaarden is dat de aanleg van nevengeulen in de uiterwaarden ook verdrogend kan werken. Dit is bijvoorbeeld zichtbaar bij de overstromingsvlakte van Buiten Ooij bij Nijmegen, waar de geul in de naastgelegen Stadswaard een drainerende werking op heeft. Hier moet goed op gelet worden bij de realisatie van nevengeulen. De drainerende werking van geulen kan enigszins getemperd worden door (voldoende) rivierhout aan te brengen of door een lage drempel in de ingang aan te brengen. Ook vormt een oevergeul achter een langsdam een waardevol alternatief voor een nevengeul, omdat een oevergeul juist voor hogere waterstanden bij lage rivierafvoeren zorgt en niet drainerend werkt op de grondwaterstand in de uiterwaard. Rijkswaterstaat Oost-Nederland gaat de komende jaren metingen uitvoeren om deze verdrogingseffecten in kaart te brengen. Ook kan de toepassing van kleischermen uitgetest worden om water beter vast te houden.

Peilbeheer optimaliseren

In gestuwde riviertrajecten kan het peilbeheer lokaal geoptimaliseerd worden voor een gunstiger vochthuishouding in de uiterwaarden. Uit een studie naar optimalisatie van het stuwbeheer op de Nederrijn-Lek bleek een fictieve peilopzet van een halve meter in grote delen van de Nederrijn-Lek tot aanzienlijke vernatting van de uiterwaarden te leiden (Figuur 6.5). Het opzetten van stuwpeilen leidt echter ook tot negatieve effecten, bijvoorbeeld dat het gestuwde karakter van de rivier toeneemt en beekmondingen 'verdrinken' (dit laatste kan weer deels verholpen worden door de beekbodem te verhogen). Ook hebben verschillende kenmerkende oevervegetaties tijdelijk droogval nodig. Daarom is dit alleen te overwegen in de trajecten waar stromende habitats weinig kans hebben en moet dit goed afgezet worden tegen bestaande natuurwaarden (van Doornik *et al.*, 2019). Een hogere verstuwingsgraad maakt het water ook gevoeliger voor opwarming (Noordhuis *et al.*, 2021). Bovendien is afhankelijkheid van een onnatuurlijk peilregime een knoop die later vaak lastig te ontwarren is, denk aan de situatie in het IJsselmeergebied. Daarom heeft het aansluiten bij een natuurlijk peilregime vaak de voorkeur.

Daarnaast is het natuurlijk een voor de hand liggende maatregel om de ontwatering in uiterwaarden te optimaliseren voor het vasthouden van water, in plaats van zo snel mogelijk afvoeren wat bij een agrarisch landgebruik meestal het doel is. Waar mogelijk kunnen slootjes en watergangen gedempt worden of het beheer van lokale stuwtjes en sluisjes aangepast worden. Deze maatregel kan ook goed binnendijs plaatsvinden, door herstel /verbetering sponswerking van de bodem en afkoppelen van regenwater. Niet voor niets wordt in het moderne waterbeheer de trits: 'vasthouden, bergen, afvoeren' gehanteerd ([Kabinetsstandpunt Waterbeleid 21e eeuw](#)). Dit geldt zowel op kleine schaal als op grote schaal (zie ook Figuur 6.6).



Figuur 6.5: Areaal plas-draszone bij huidig stuwpeil (rood en lichtgroen) en bij 0,5 meter peilopzet (oranje en donkergroen) in de Amerongse Bovenpolder op basis van modelberekeningen (bron: van Doornik et al., 2019)

Figure 6.5: Area of wetland-marsh zone at current weir level (red and light green) and at 0.5 meter water level (orange and dark green) in the Amerongse Bovenpolder based on model calculations (source: van Doornik et al., 2019)

Om de verdroging van natte uiterwaardnatuur die afhankelijk is van grondwaterkwel tegen te gaan zijn uiteraard hele andere maatregelen nodig. Hier zijn vooral brongerichte maatregelen om grondwaterstromingen op gang te houden (of brengen) van belang. Denk hierbij aan minder wateronttrekkingen of meer infiltratie in de brongebieden. Op basis van een goede hydrologische analyse van de drainerende werking van lokaal aanwezige wateren (bijv. diepe plassen) kan een gericht herstelplan gemaakt worden. Goede samenwerking met waterschappen en andere inrichting van landbouwgebieden binnendijks is hiervoor nodig evenals herstel van de sponswerking van de bodem in de intrekgebieden.



Sluis in zomerkade
- gesloten vanaf medio mrt '20 -



Figuur 6.6: Voorbeeld water vasthouden na hoogwater in Buitenooy - Nijmegen in 2020. Begin februari 2020 was er sprake van hoogwater waarbij de polder Buitenooy onderwater liep. De sluis in de zomerkade is vanaf medio maart gesloten waardoor de hoge waterstand tot begin mei in het gebied kon worden vastgehouden en het water langzaam uitzakte in de bodem (Luchtfoto Remco Versluijs/Bargerveen, overige foto's M. Dorenbosch).

Figure 6.6: Example of water retention after floods in Buitenooy - Nijmegen in 2020. Early February 2020 the Buitenooy polder was flooded. The lock in the summer quay was closed from mid-March, in order to maintain the high-water level in the area until early May and the water slowly subsided into the bottom (Aerial photo Remco Versluijs/Bargerveen, other photos M. Dorenbosch).

6.4 Maatregelen veerkracht

Om de veerkracht van het rivierecosysteem om tijdelijk ongunstige omstandigheden op te vangen te vergroten, is meer ontwikkelruimte nodig. Een natuurlijkere inrichting en vegetatieontwikkeling van de uiterwaarden hoort daarbij. Maatregelen die hiervoor effectief zijn, dragen bij aan het creëren van ruimte voor hoogwater. Makaske & Maas (2013) noemen bijvoorbeeld ruimte voor riviernatuur maken door dijkverleggingen, met een grotere laterale diversiteit aan milieus en dus een grotere heterogeniteit. Hiermee bedoelen we: een bredere zone in het winterbed zodat er meer ruimte is voor verschillende milieus en meer afwisseling variatie in leefgebied en begroeiingstypen. Het is hierbij vooral van belang ruimte te reserveren voor vegetatiesuccessie. Omdat de natuurlijke vegetatiesuccessie leidt tot verhoogde ruwheid van de vegetatie is dit vanuit hoogwaterveiligheid kritisch. Vanuit ecologisch perspectief is dus extra overruimte nodig om ook ruimte te houden voor natuurlijke processen en daarmee veerkracht van het systeem. In een recente studie is becijferd dat op verschillende plekken langs de grote rivieren in de huidige situatie al ruimte is om meer vegetatieontwikkeling toe te staan binnen de geldende veiligheidsnormen (<https://dijkenvoor biodiversiteit.flowsproductions.nl/>). Daarnaast kan meer ruimte voor vegetatieontwikkeling beschikbaar komen door creatiever om te gaan met de huidige veiligheidsbenadering en ook te kijken waar ruimte voor natuur benut of gerealiseerd kan worden, tegen beperkte kosten.

Naast ruimte zijn verbindingen cruciaal om de veerkracht van het systeem te versterken (Braakhekkens *et al.*, 2014; Noordhuis *et al.*, 2019). Soorten en hun leefgebied “schuiven” dan makkelijker mee met het veranderende klimaat. Rivieren vormen hierbij een natuurlijk verbindend element (Van Looy *et al.*, 2019). Denk hierbij niet alleen aan verbindingen tussen de uiterwaarden, maar ook aan verbindingen herstellen door het wegnemen of passeerbaar maken van barrières tussen het uiterwaardecosysteem en aangrenzende ecosystemen, bijvoorbeeld in beekdalen, binnendijkse (klei)bossen of op stuwwallen, zodat ecologische gradiënten ontstaan en de verbinding met brongebieden of refugia hersteld wordt en ook een grotere compleetheid van de ecosysteem gradiënt ontstaat. Soms kan het binnendijks realiseren van laag-dynamische natte (kwel)natuur bijdragen aan het realiseren van grotere natuureenheden in samenhang met buitendijkse gebieden of juist ruimte creëren voor meer dynamiek buitendijks (Makaske & Maas 2013).

Een mooi voorbeeld van het robuuster maken van het riversysteem zijn de plannen voor het versterken van de verbinding tussen de Maas en de Waal in het gebied rondom Heerewaarden. Hier komen Waal en Maas dicht bij elkaar en in het verre verleden was dit een dynamisch gebied waarin beide rivieren meestal met elkaar verbonden waren. In kleine vorm zou zo’n verbinding mogelijk weer tot stand kunnen komen. Hierbij zou bijvoorbeeld de kweldruk vanuit de Waal richting de Maas benut kunnen worden voor permanent ondiep stromend water, maar ook voor vochtige overgangsgebieden en moerassige habitats. In de Natuurverkenning Grote Rivieren worden hier verschillende kansen voor beschreven (RVO, 2017). Ook zou de Maas in droge tijden wellicht water uit de grotere Waal kunnen ontvangen, waardoor het systeem ook hydrologisch robuuster wordt (Liefveld *et al.*, 2018).

Naast fysieke ruimte is ook ecologische en morfologische ruimte nodig. Door ruimte te maken voor natuurlijke processen en de onzekerheden die hiermee gepaard gaan in te calculeren, ontstaat een meer diverse en daarmee robuustere natuur. Ingrepen zoals het verwijderen van zomerkades en oeverbestorting kunnen lokaal natuurlijke morfodynamische processen meer ruimte geven en zo de heterogeniteit en veerkracht vergroten. Hetzelfde geldt voor de aanleg van nevengeulen en uiterwaardverlaging (Makaske & Maas 2013). Een concept als cyclisch beheer past hierbij. Mits goed uitgevoerd, kan dit beheer leiden tot grotere heterogeniteit doordat ruimtelijke diversiteit in successiestadia ontstaat wanneer natuurlijke dynamiek dit onvoldoende tot stand kan brengen (Peters *et al.*, 2006).

Aandachtspunt is dat sommige vegetatietypen zoals hardhoutooibossen of bepaalde laagdynamische uiterwaardplassen juist een lange ontwikkeltijd hebben en helemaal niet gebaat zijn bij dynamiek of cyclisch beheer. Hiervoor is meer ruimte in de breedte van het winterbed nodig en wellicht aankoppeling van binnendijkse gebieden. Hiermee wordt de gradiënt van hoog- naar laagdynamische natuur (deels) hersteld. De kansen voor de ontwikkeling van (aquatische) laagdynamische riviermilieus staan beschreven in Arts *et al.* (2016), inclusief kansenkaart.

De Programmatische Aanpak Grote Wateren sluit aan bij deze principes en richt zich zowel op de realisatie van grote kerngebieden als op de verbindingen en stapstenen tussen deze kerngebieden. De uitvoering van het NNN en het Natura 2000 netwerk zijn ook gericht op het realiseren van verbinding tussen natuurgebieden. Ook de maatregelen die in het kader van de Kaderrichtlijn Water worden uitgevoerd kunnen bijdragen aan een klimaat robuuster riviersysteem, mits de bovengenoemde aspecten hierin tot hun recht komen. En integraal gebiedsgericht uitgewerkt.

6.5 Maatregelen op hoger schaalniveau

Naar aanleiding van de recente hoogwaters in het Maasstroomgebied is het belang van maatregelen op stroomgebiedsschaal opnieuw indringend onder de aandacht gekomen. Dit geldt niet alleen voor hoogwaterbestrijding, maar ook voor droogtebestrijding. Deze concepten zijn niet nieuw. De afgelopen decennia is al in vele rapporten en beleidsnota's becijferd welke waterbesparende voordelen het oplevert om water vast te houden in de haarvaten van het riviersysteem en natuurlijke vegetaties te herstellen (Van Winden *et al.*, 2003; van Deursen *et al.*, 2013, [\(Kabinetsstandpunt Waterbeleid 21e eeuw\)](#)). Hierbij maakt het overigens veel uit welk vegetatietype ontstaat. Zo blijken naaldbossen weliswaar veel regenwater op te vangen, maar ook veel te verdampen, waardoor de grondwateraanvulling mogelijk minder is (Pflug *et al.*, 2021). Veel van de vroegere sponswerking van veengebieden in de bovenlopen is inmiddels verdwenen. Gelukkig wordt de laatste jaren hard gewerkt om deze natuurlijke klimaatbuffers te herstellen (zie onder).

Ook op regionale schaal kunnen al stappen gemaakt worden, bijvoorbeeld door de ontwatering aan te passen waar mogelijk. Om effecten op andere functies te beperken is hier bijna per definitie een boven-lokaal schaalniveau vereist om de inrichting hierop af te stemmen: functies moeten bijvoorbeeld in de ruimte herverdeeld worden of bufferzones zijn nodig. Hierbij kunnen waterbergende maatregelen die hoogwaterpieken remmen, tegelijk een bijdrage leveren aan de verdrogingsbestrijding <https://www.h2owaternetwerk.nl/h2o-actueel/in-zuid-limburg-meer-natuurlijke-ruimte-voor-water-nodig>.

Op hoger schaalniveau wordt in dit verband ook door allerlei organisaties gewerkt aan 'Natuurlijke Klimaatbuffers' (<https://www.klimaatbuffers.nl/>). Dit zijn natuurgebieden die de gevolgen van klimaatverandering beperken en tegelijk andere functies bedienen (hoogwaterveiligheid, recreatie, economie). Het concept van overstromingsvlaktes langs rivieren past hier perfect in. Daarnaast gaat het om bijvoorbeeld veengebieden, moerassen of natte bossen, maar ook kwelders, schelpdierbanken, zandplaten en duinen bij het opvangen van de stijgende zeespiegel. Langs de rivier zijn voorbeelden van lopende projecten Rivierklimaatpark IJsselpoort en Maascorridor Venlo. Kenmerk van de projecten is dat het met een brede groep lokale partijen en overheden wordt uitgevoerd. Dit kost misschien iets meer tijd, maar levert wel een breed gedragen en integrale ruimtelijke oplossing op.

Uiteindelijk zijn het dit soort brongerichte maatregelen die plaats moeten gaan vinden middels een internationale watertransitie en het vooropstellen van water als ordenend principe voor landgebruik.

6.6 Binnendijkse riviernatuur

Behalve water vasthouden in de bovenlopen van het stroomgebied, zijn er misschien nog nieuwe maatregelen denkbaar die de riviernatuur beter bestand maken tegen de effecten van klimaatverandering. Een van de redenen waarom de huidige riviernatuur kwetsbaar is geworden voor de effecten van klimaatverandering is het keurslijf waar de rivier in ligt. Door de bedijking is veel ruimte aan de natuurlijke overstromingsvlakte ontnomen, daardoor lopen de waterstanden bij een piekafvoer dus ook veel hoger op dan natuurlijk is: het water verspreidt zich niet meer over een brede vlakte. Door binnendijkse gebieden aan te koppelen zou hier mogelijk in voorzien kunnen worden. Door deze gebieden mee te laten inunderen kan enerzijds overtollig water afgevangen worden, maar kan het vervolgens ook langer vastgehouden worden en gebruikt voor de ontwikkeling van bijvoorbeeld moerasbossen, die binnendijks wellicht minder problematisch zijn vanuit hoogwaterperspectief. In sommige gevallen kunnen binnendijks ook kwelsituaties benut worden waardoor laag- dynamische natte natuur minder kwetsbaar is bij langdurige droogte en laagwater (Makaske & Maas 2013). Het in Nederland zeldzame bostype essen-iepenbos komt tegenwoordig bijvoorbeeld alleen nog binnendijks voor, bijvoorbeeld het landgoedbos bij Windesheim langs de IJssel (A. Blankena, pers. com.). Dit principe kan lokaal ook met vochtige graslandtypen op de binnendijkse komgronden toegepast worden, wanneer de hydrologie geoptimaliseerd kan worden. Voorbeeld is het grote vossenstaarthooiland (kivietsbloemhooiland) in de Molenpolder bij Lierderholthuis (A. Blankena, pers. com.). Uiteraard zullen hiermee niet alle functies van dergelijke riviergebonden natuur vervuld kunnen worden, maar het is het verkennen waard.

6.7 Maatregelen voor het beheer

De effecten van klimaatverandering op het functioneren van riviernatuur heeft niet alleen consequenties voor inrichting, maar ook voor het beheer van uiterwaarden. Dit komt niet duidelijk terug in de literatuur, maar er zijn wel verschillende praktijkervaringen benoemd in de interviews en enquêtes, aangevuld vanuit SBB (A. Blankena, pers. com.):

- Blauwalgen: In opwarmende poelen en plasjes, maar ook in grotere strangen, plassen of dode rivierarmen, kan door hoge temperatuur in combinatie met voedselrijke omstandigheden blauwalgenbloei optreden. Hier dienen borden geplaatst te worden om het publiek te informeren.
- Dode vis: In opwarmende poelen en plasjes kan door hoge temperatuur en zuurstofgebrek vissterfte optreden. Dit moet vervolgens geruimd worden en het publiek dient geïnformeerd te worden.
- Dode vogels: In opwarmende poelen en plasjes kan door hoge temperatuur botulisme optreden. Dode dieren moet vervolgens geruimd worden en het publiek dient gewaarschuwd te worden.
- Stortkosten na zomerhoogwater: Na de zomerhoogwaters van 2021 bleek veel hooi van de gemaaide graslanden niet meer geschikt voor de verkoop doordat er rivierslib in terecht was gekomen (Figuur 6.7). In plaats van opbrengst leverde het hooi dus kosten met zich mee om het te storten.
- Afname voedselbeschikbaarheid: De aanwezigheid van slib op de vegetatie na een zomerhoogwater, vermindert ook de voedselkwaliteit voor de graasbeheerdieren in de uiterwaarden. Dit kan extra kosten met zich meebrengen als ze vervolgens bijgevoerd moeten worden (Figuur 6.7).
- Drijfvuil na zomerhoogwater: Net als na een winterhoogwater bleef na het zomerhoogwater van 2021 veel afval achter in de uiterwaarden. In de zomer is dit echter lastiger op te ruimen door de opgaande begroeiing.
- hoogwatervluchtplaatsen (HVP's) voor zomerbegrazing: Bij de aanleg van HVP's voor grote grazers wordt meestal uitgegaan van winterhoogwaters. In de zomer worden

ook uiterwaarden zonder HVP's begraasd. De recente zomerhoogwaters laten zien dat dit een extra risicofactor betekent omdat dieren dan mogelijk actief geëvacueerd moeten worden.

- Aanpassen maaibeheer: Om verruiging tegen te gaan (als gevolg van lokale verrijking), zal mogelijk vaker gemaaid moeten worden om de beheerdoelen te realiseren. Hoe dit precies uitpakt verschilt sterk per situatie en per locatie: zo moest na de zomerhoogwaters langs de Lek vaker gemaaid worden doordat de grassen weer de overhand kregen nadat in de voorgaande drie droge jaren de (gewenste) kruidenvegetaties zich juist beter ontwikkeld hadden (C. de Lange, *pers. com.*).

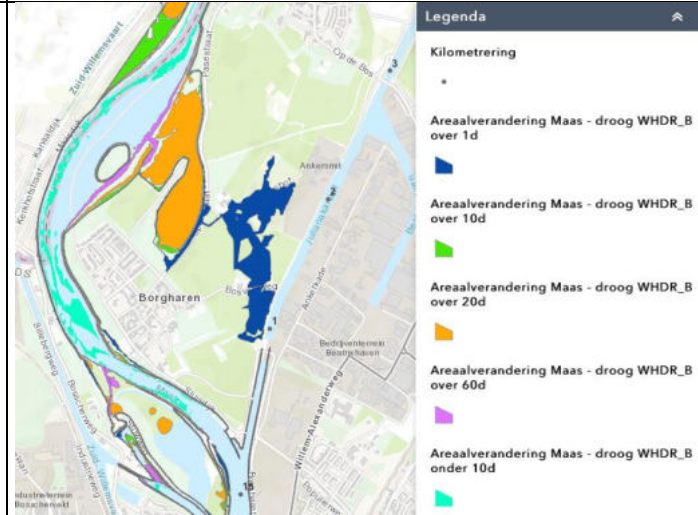


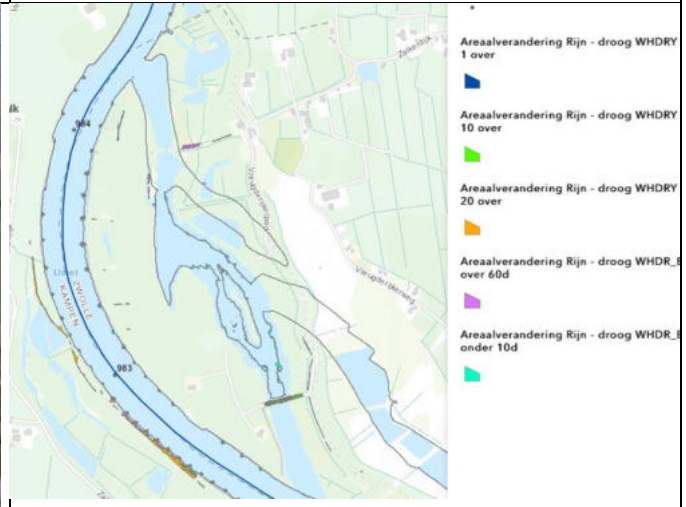
Figuur 6.7: Met slib bedekte en grotendeels afgestorven vegetatie in een uiterwaard langs de Rijntakken na het zomerhoogwater van 2021, ongeschikt om te oogsten als hooi en als voedsel voor grazers (foto: F. van Schie).

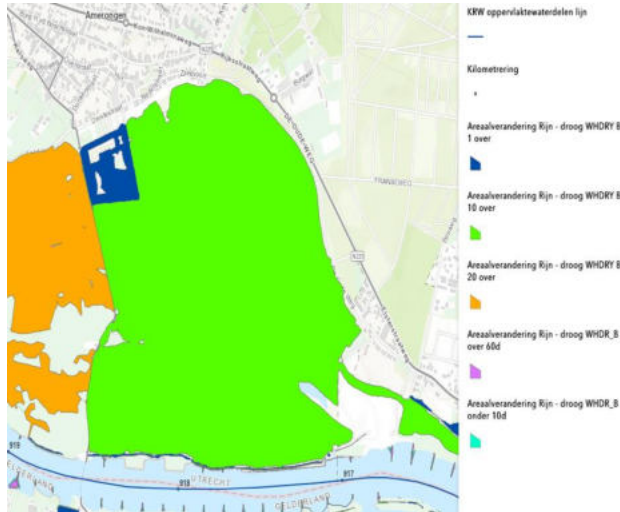
Figure 6.7: Vegetation covered with silt and partly death in the major bed of the river Rhine after the summer floods of 2021, not suitable to harvest as hay and as food for grazers (photo: F. van Schie).

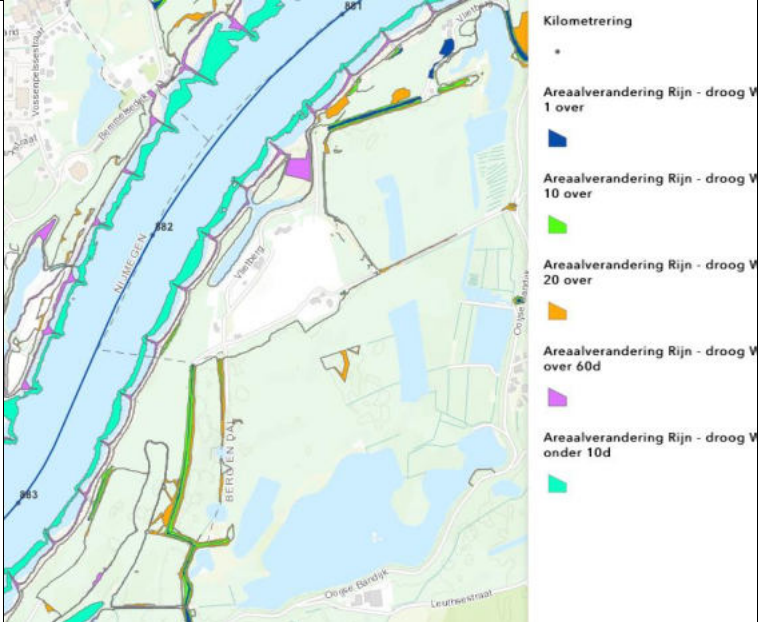
6.8 Voorbeelden van maatregelen uit de praktijk

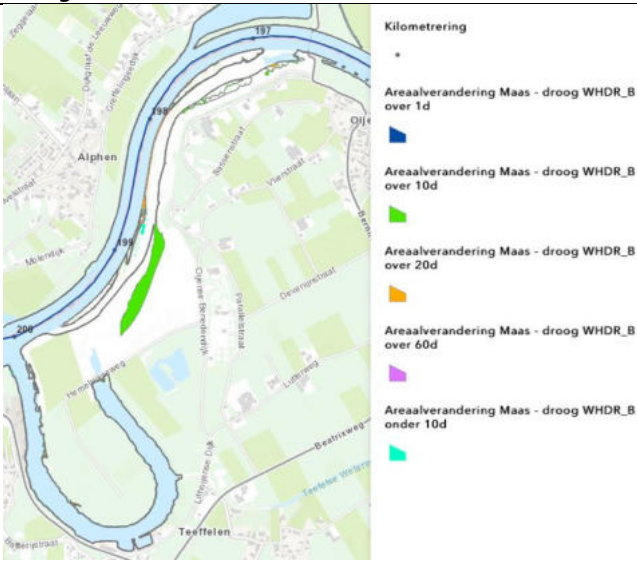
In deze paragraaf lichten we aan de hand van praktijkvoorbeelden de gevolgen van het WHdry scenario inclusief bodemdaling toe op de verandering in geïnundeerde arealen in vijf voorbeeld gebieden waar inrichtingsmaatregelen getroffen zijn. De legenda geeft aan in welke klassen van inundatiefrequentie, de inundatiefrequentie afneemt, dus verdroging optreedt. Deze gebieden zijn geselecteerd op basis van verschillen in riviertraject, beheerder, inrichtingsmaatregel en de beschikbaarheid aan gegevens.

Rivier	Maas
Riviertraject:	Grensmaas
Afvoer:	Vrij afstromend
Naam gebied:	Borgharen
Rkm:	15-19
Beheerder:	Staatsbosbeheer/Natuurmonumenten
Maatregel(en):	Stroomgeulverbreding en weerdverlaging (UVER)
Oppervlakte:	110 ha
Jaar aanleg:	2010-2015
Korte beschrijving:	Borgharen is de meest zuidelijk gelegen locatie van het Grensmaasproject. Een project met als doel natuurontwikkeling en hoogwaterbescherming d.m.v. grindwinning in de vorm van stroomgeulverbreding en weerdverlaging. Bij het ontwerpproces is uitgegaan van toekomstige hogere waterstanden waarmee het tevens een klimaat maatregel is. Die zich bij het zomerhoogwater van 2021 bewezen heeft, de gemeten waterstanden waren lager dan bij het hoogwaters van de winter van 1993.
	
Overzicht van de weerdverlaging bij Borgharen (foto: streetview google maps).	Effecten van WHdry scenario (incl. bodemdaling) op de inundatie frequentie: Op deze locatie langs de Grensmaas laten alle arealen van de vijf onderscheiden inundatie klassen een afname zien, er treedt verdroging op, ook in het zomerbed van de rivier.
Bronnen: Kurstjens & Peters, 2017; https://www.waterpeilen.nl/berichten/hoogwaterbericht-rijn-en-maas-4	

Rivier	IJssel
Riviertraject:	IJssel benedenstrooms Deventer
Afvoer:	Vrij afstromend
Naam gebied:	Vreugderijkerwaard
Rkm:	981- 984,5
Beheerder:	Natuurmonumenten
Maatregel(en):	Nevengeul (NTWE) en weerdverlaging (UVER)
Oppervlakte:	74 ha
Jaar aanleg:	2000-2004
Korte beschrijving:	De eerste meestromende nevengeul langs de IJssel. Een project met als doel natuurontwikkeling en hoogwaterbescherming. Door de geul is ondiep stromend water gerealiseerd afgeschermd van effecten door scheepvaart. Met de geul en de weerdverlaging is er ook meer ruimte voor de waterafvoer voor toekomstige situaties. Het gebied herbergt belangrijke stroomdalflora. Naar verwachting zal dit vegetatietype weinig te lijden hebben onder de effecten van klimaatverandering (zie paragraaf 4.7.2), mits de planten tot zaadzetting kunnen komen en er dus geen zomerhoogwater in deze cruciale periode optreedt. Zo nodig kan het graasregime aangepast worden als er toch te veel verruiging optreedt.
	
Overzicht van de nevengeul Vreugderijkerwaard vlak na aanleg (foto: B. Boekhoven, RWS).	Effecten van WHdry scenario (incl. bodemdaling) op de inundatie frequentie: Op deze locatie langs IJssel is bij geen van de arealen van de vijf onderscheiden inundatie klassen een grote verandering te zien, er treedt geen noemenswaardige verdroging op, dus er zijn als gevolg van dit aspect van klimaatverandering geen effecten te verwachten.
Bronnen: Peters <i>et al.</i> , 2011;	

Rivier	Nederrijn-Lek
Riviertraject:	Nederrijn-Lek: IJsselkop-Hagestein
Afvoer:	gestuwd
Naam gebied:	Amerongse Bovenpolder
Rkm:	917-918,5
Beheerder:	St. het Utrechts Landschap/Staatsbosbeheer
Maatregel(en):	Kwelgeul (HKW)
Oppervlakte:	138 ha
Jaar aanleg:	2013-2015
Korte beschrijving:	De rivierkwelgeul is aangelegd met als doel natuurontwikkeling en meer water kwijt te kunnen bij hoogwater. Het kwelwater van de Utrechtse Heuvelrug stroomt nu niet langer direct naar de rivier, maar via de kwelgeul door het gebied en dan naar de rivier. Naast aan water vasthouden draagt de kwelgeul ook bij aan de connectiviteit tussen de rivier en de uiterwaardwateren.
	
Overzicht van de kwelgeul in de Amerongse Bovenpolder (foto: Stichting het Utrechts Landschap).	Effecten van WHdry scenario (incl. bodemdaling) op de inundatie frequentie: Op deze locatie langs Nederrijn-Lek laten afnames zien in arealen die 1, 10 en 20 dagen per jaar inunderen, er treedt flinke verdroging op. Hierin zijn nog geen effecten op kwel meegenomen. Het gebied ligt dus duidelijk in een risico-zone, zeker omdat het ook nog kwelgerelateerde natuur bevat. Uit een kwaliteitstoets van het Utrechts landschap blijkt dat de benutting van de potenties voor kwel verbeterd kunnen worden, maar wordt niet gesproken van verdrogingseffecten (Utrechts Landschap 2019). Wel worden hier verbetermaatregelen voorgesteld om de natuurkwaliteit te verbeteren, o.a. door herinrichting van de kwelgeulen.
Bronnen: SBB, 2016; Stichting het Utrechts Landschap, 2011 en 2019	

Rivier	Waal
Riviertraject:	Bovenrijn-Waal
Afvoer:	Vrij afstromend
Naam gebied:	Oude Waal
Rkm:	881-883
Beheerder:	Staatsbosbeheer
Maatregel(en):	Overstromingsvlakte (en uiterwaardverlaging)
Oppervlakte:	80 ha
Jaar aanleg:	2008
Korte beschrijving:	De Oude Waal is geheel ingepolderd door een zomerdijk, in de dijk bevindt zich echter een sluis. De sluis kan gebruikt worden om na een periode van hoogwater, de hoge waterstand in de Oude Waal langer vast te houden. Vanaf 2008 wordt het inlaat mechanisme regelmatig gebruikt om water na een hoogwater periode langer vast te houden in de Oude Waal.
	
Overzicht van de overstromingsvlakte Oude Waal (foto: RWS).	Effecten van WHdry scenario (incl. bodemdaling) op de inundatie frequentie. Op deze locatie langs de Waal is bij geen van de arealen van de vijf onderscheiden inundatie klassen een grote verandering te zien, er treedt geen noemenswaardige verdroging op onder dit scenario.
Bronnen: Kurstjens <i>et al.</i> , 2010; Dorenbosch <i>et al.</i> , 2020	

Rivier	Maas
Riviertraject:	Bedijkte Maas
Afvoer:	Gestuwd
Naam gebied:	Hemelrijkse Waard
Rkm:	196,8-200
Beheerder:	Natuurmonumenten
Maatregel(en):	Nevengeul (NTWE) en weerdverlaging (UVER)
Oppervlakte:	250 ha (incl. oude Maasarm 280 ha)
Jaar aanleg:	2014-2016
Korte beschrijving:	De Hemelrijkse Waard is gerealiseerd met als doel invulling te geven aan de KRW-opgave en voor hoogwaterbescherming met minimale verstoring van de bodemstructuur. Naast een 3 km lange oevergeul langs de Maas is een 2 kilometer lange extra stroomgeul vanaf de nevengeul langs de Maas naar de Teeffelse Wetering door de Hemelrijkse Waard aangelegd. Met de aangebrachte klepstuw wordt het water uitgelaten. Ter hoogte van de klepstuw onder de dijk door komt een andere watergang uit in het moerasdeel, waar met een stuwtje de waterstand geregeld kan worden, water vastgehouden of bij droogte water inlaten.
	
Overzicht oevergeul in de Hemelrijkse Waard (foto: B. Peters).	Effecten van WHdry scenario (incl. bodemdaling) op de inundatie frequentie. Op deze locatie langs de Maas is alleen bij de arealen 10 en 20 dagen geïnundeerd een verandering te zien, er treedt een beperkte verdrooging op.
Bronnen: Kurstjens & Peters, 2020; Rademakers, 2016	

6.9 Menukaart mitigerende maatregelen

Wat kunnen rivierbeheerders doen om het ecosysteem beter bestand te maken tegen de negatieve effecten van klimaatverandering? Dit speelt op verschillende schaalniveaus. Grootschalige maatregelen op stroomgebiedsniveau zetten de meeste zoden aan de dijk, omdat hiermee de basis voor een robuust watersysteem gelegd worden en bijvoorbeeld ook grondwatereffecten beïnvloed worden. Dit is de zogenaamde watertransitie die vele decennia in beslag zal nemen om dat het allerlei functies en stakeholders beïnvloedt. Tegelijk worden er al van dit soort maatregelen uitgevoerd, bijvoorbeeld langs de Limburgse zijbeken van de Maas, waarbij zelfs grensoverschrijdend wordt samengewerkt. Rivierkundige maatregelen, zoals het tegengaan van de rivierinsnijding, kunnen een grote bijdrage leveren aan de mitigatie van verdrogingseffecten in de uiterwaarden. Naast dit soort brongerichte maatregelen zijn er ook heel wat mitigerende maatregelen die op kleine schaal door rivierbeheerders ingezet kunnen worden en waar deels ook al ervaring mee is opgedaan. Veel van deze maatregelen zijn ook al in beeld vanuit andere functies, zoals de ontwikkeling van overstromingsvlaktes voor het realiseren van de KRW-doelen, of het vroeger/vaker maaien om verruiging tegen te gaan. Dit soort maatregelen hebben dus een dubbele functie en maken het riviersysteem ook klimaatrobuuster. In Tabel 6.1 zijn deze samengevat voor de twee onderscheiden schaalniveaus. In deze tabel zijn zowel beproefde maatregelen opgenomen als (nog) onbeproeefde maatregelen die uit de interviews en literatuur naar voren zijn gekomen.

Tabel 6.1: Groot- en kleinschalige maatregelen om effecten van klimaatverandering te mitigeren.

Table 6.1: Large- and small-scale measures to mitigate the effects of climate change.

Grootschalige maatregelen:	Omschrijving:
<i>Tegengaan opwarmen rivierwater en uiterwaardplassen</i>	1) Beperken koelwaterlozingen van energiecentrales en industrie 2) Faciliteren meer schaduw in uiterwaarden door boom- en struikopslag te laten staan of te ontwikkelen
<i>Tegengaan insnijden rivierbodem</i>	1) Stoppen met sedimentonttrekkingen 2) Herstellen zandtransport rivier door toestaan meer oevererosie (NVO, ontstenen) 3) Herstellen zandtransport rivier door zandsuppletie (of grind) - o.a. in kribvakken en zomerbed 4) Herbeschouwen vaarwegvereisten t.a.v. vaardieptes in droge periodes, diepgang schepen verminderen
<i>Tegengaan verdroging door water vasthouden in brongebieden</i>	1) Faciliteren van water vasthouden in bovenstroomse brongebieden (in landelijk en stedelijk gebied), samenwerking met waterschappen en buurlanden - watertransitie 2) Landbouw transitie passend bij ondergrond van gebieden i.p.v. gebieden aanpassen aan landbouwtype 3) Verminderen en efficiënter gebruik maken van water in tijden van droogtes
<i>Beperken stagnatie rivierwater door vermengen van de stromende periode in gestuwde riviertrajecten en Grensmaas</i>	1) Voldoende aanvoer van water bewerkstelligen (denk aan waterverbruik verminderen, waterverdeling etc) 2) Optimaliseren zomerbed Grensmaas (versmallen/verondiepen) 3) Optimaliseren drempels in Grensmaas om stuweffect bij lage afvoeren in de zomer te verminderen 4) Aanpassen stuwbeheer in gestuwde riviertrajecten om bij lagere waterstanden langer stromend water te houden
<i>Tegengaan verdroging uiterwaarden door herstel (natuurlijke) overstromingsvlaktes</i>	1) Dempen watergangen in overstromingsvlaktes, uittesten toepassing kleischermen in overstromingsvlaktes 2) Dijkverlegging om oude overstromingsvlaktes opnieuw aan te koppelen aan de rivier 3) Verlagen uiterwaarden - zo nodig verwijderen vermeste bodem 4) Integrale hydrologische analyse bij ontwerp nieuwe habitats met potentieel drainerend effect: voorkom drainage-werking van geulen en strangen op overstromingsvlaktes (speelt m.n. in zandige trajecten)
<i>Tegengaan verdroging geulen en strangen in de zomer door tot dalende rivierwaterstand</i>	1) en daarmee opslibbing en verzanding van de geul verminderen en langer in het voorjaar stromend water te houden. 2) Cyclisch beheren van geulen en strangen: periodiek verdiepen om opslibbing en verzanding op te heffen
<i>Benutten kweleffecten</i>	1) Beperk grondwateronttrekkingen 2) Analyseer potentieel drainerende werking van aanwezige wateren in kwelgebieden om lokale kweldruk (vanuit stuwwal - terrassen) optimaal te kunnen benutten. Zo nodig aanpassen.
<i>Afstemmen klimaatmaatregelen met bestaand beleid- en regelgeving</i>	1) Aanpassen van regelgeving om water in overstromingsvlaktes vroeger in het seizoen te mogen vasthouden (i.s.m. waterschappen) 2) Aanpassen van beleid om meer boom- en struikopslag in uiterwaarden toe te staan 3) Aanpassen van rivierkundige randvoorwaarden voor meer rivierinvloed in aangetakte geulen en strangen
<i>Beperken effecten zomerse piekbuien</i>	1) drainages verwijderen of verondiepen, struiken en bomen op de hellingflanken om langer water vast te houden. - Langsdammen: Achter een langsdam ontstaat een permanent aquatisch leefgebied met beschutting
<i>Voldoende stromend zuurstofrijk habitat</i>	1) tegen scheepvaartgolven, stroming en lagere temperatuur ten tijde van lage waterstanden (nevengeulen vallen droog en warmen op in droge periodes) 2) Stuw passerende nevengeulen : Van scheepvaart gescheiden geul rond een stuw met stromend en zuurstofrijk habitat ten tijde van lage waterstanden
Kleinschalige maatregelen:	
<i>Tegengaan opwarmen aquatische habitat in uiterwaarden</i>	1) Niet geheel verondiepen en eventueel aantakken van diepe plassen - behoud als thermorefugium 2) Faciliteren van beschaduwing langs oevers: oobos, riet, struik- en boomopslag
<i>Inrichten kunstmatige overstromingsvlaktes van bekade gebieden</i>	1) Water langer vasthouden in gebieden met kades: verlagen zomerkade, aanbrengen regelbare sluizen/stuwen in zomerkade
<i>Water kunstmatig langer vasthouden in uiterwaardlaagtes</i>	1) Beperken van drainage van laagtes laat in het voorjaar door aanbrengen drempels, schot- en spindelstuwen, klepduikers (in geulen, strangen, sloten)
<i>Verruiging ten gevolgen van verdroging beperken</i>	1) Optimalisatie peilbeheer uiterwaarden 2) Frequentier en/of vroeger maaibeheer van hooilanden om versnelde successie te mitigeren 3) Tijdelijk graasdruk verhogen (drukbegrazing) en/of vroeger start begrazing uiterwaarden in het seizoen (afhankelijk vegetatietype)
<i>Voorkomen van ophoping zwerfvuil in uiterwaarden door zomerhoogwater</i>	1) Verwijderen en afvoeren zwerfvuil in uiterwaarden na zomerhoogwater, plastic vangers, aanpak vervuillingsbronnen.
<i>Versterken kweleffecten</i>	1) Uitkrabben van verlande laagtes om kwel te benutten en vroege droogval te voorkomen. (NB: Niet te diep)
<i>Verdroging van ondiepe moerassen, plassen, geulen en strangen mitigeren</i>	1) Vasthouden water in laagtes, geulen en strangen door aanbrengen drempels, schot- en spindelstuwen, klepduikers (in geulen, strangen, sloten) 2) Aanbrengen van rivierhout in (meestromende) geulen en rivieroevers om vorming van stromingskuilen te faciliteren. Benut hiervoor ook natuurlijke boomopslag waar mogelijk. 3) Uitkrabben van verlande (moeras) laagtes om te vroege droogval te voorkomen 4) Cyclisch beheren van opgeslibde of verzande geulen en strangen
<i>Garanderen van hoogwatervrije terreinen tijdens hoogwaterpieken in winter en zomer</i>	1) Behouden van bestaande hoogwatervrije terreinen (oude steenfabrieken), herstellen of ophogen (natuurlijke) oeverwallen (die geen kwetsbare natuur bevatten)

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Effecten van klimaatverandering in het rivierengebied

Klimaatverandering is een complex verhaal waarbij allerlei drukfactoren tegelijk een rol spelen en er grote onzekerheidsmarges zijn. Om de effecten voor het rivierengebied te kunnen inschatten hebben we in deze studie gebruik gemaakt van enerzijds modelprognoses die we doorvertaald hebben naar te verwachten effecten op het ecosysteem en anderzijds van signalen die nu al in de praktijk waarneembaar zijn. Er is echter nog weinig detailonderzoek of monitoring van de ecologische effecten van klimaateffecten of mitigerende maatregelen. Onze conclusies zijn dan ook gebaseerd op een mix van resultaten van modelberekeningen, doorvertaling van bevindingen uit de literatuur, en huidige patronen en ervaringen uit de praktijk.

Hoewel klimaatverandering een langzaam proces is, zijn klimaateffecten nu al zichtbaar in het rivierengebied. Denk aan opwarming van het water, verdroging van uiterwaarden, droogval van nevenwateren, verschuiving van afvoerpatronen, zomerinundaties en toename van de verstuwingsgraad in de gestuwde riviervluchten. Verdroging van de uiterwaarden vormt een groot risico in het rivierengebied omdat veel kenmerkende riviernatuur op één of andere manier in relatie staat tot de waterstanden en afvoerpatronen van de rivier. Door klimaatverandering veranderen deze afvoerpatronen en de algemene tendens is dat de waterstanden in het groeiseizoen gemiddeld lager worden.

Een belangrijke constatering hierbij is dat hoogwaterperiodes veel minder vaak voorkomen in het vroege voorjaar. Voorbeeld is de afvoerpiek als gevolg van sneeuwschmelte (op de Rijn) die traditioneel in mei optradt maar nu vroeger in het voorjaar / late winter optreedt. De traditionele overstromingsplassen die zich na hoge waterstanden voorheen regelmatig tot diep in het voorjaar in uiterwaarden vormden, zijn nu vaak alweer verdwenen als het groeiseizoen op gang komt.

In de bovenloop van de Waal en de IJssel wordt het uitblijven van hoogwater in het voorjaar versterkt door insnijding van het zomerbed, door het verlaagde zomerbed is er in het (vroege) voorjaar een nóg hogere waterstand nodig om tot voorjaarsinundatie en de vorming van overstromingsvlaktes te komen. We zien dit effect nu al optreden, dit wordt bij het hier doorgerekende klimaatscenario (WHdry) in de nabije toekomst sterker.

Dit effect doet zich overigens vooral voor langs de bovenstroomse gelegen en vrij afstromende trajecten van de Rijn en de Maas (gedreven door de autonome daling van het zomerbed in dit deel van het stroomgebied). In benedenstroomse riviervluchten en in gestuwde trajecten is verdroging van uiterwaarden een minder groot risico, behalve als het gaat om kwelnatuur. Hoewel in deze studie niet verder onderzocht, is de verwachting dat ook grondwaterstromen door klimaatverandering onder druk komen te staan, waarbij het gebruik van grondwater waarschijnlijk een nog grotere rol speelt. In de webviewer is te zien welke gebieden langs Rijn en Maas natter en welke droger worden bij het doorgerekende klimaatscenario:

<https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=32d3e4e0ac964d79ac93312bb516cea5>.

Effecten op soorten en habitattypen

Uit de modelberekeningen blijkt dat langs de Rijntakken het areaal dat tussen 10-20 dagen per jaar overstroomt sterk afneemt. Het areaal dat nooit overstroomt neemt juist toe. Voor de Maas is er in het benedenstroomse deel van Maas (beneden Lith) sprake van netto

'vernatting' (toename arealen met hogere inundatieduur) terwijl in de Grensmaas en het Maasplassengebied juist sprake is van een afname van inundatiefrequenties. Langs de gestuwde trajecten zijn de verdrogingseffecten minder uitgesproken vanwege het vaste waterpeil. Hierdoor neemt de verstuwingsgraad wel toe (dus minder doorstroming).

Door de verdroging van de uiterwaarden (bij lage en gemiddelde afvoer) gaan met name de vochtige habitats in areaal en kwaliteit achteruit. Met name de natte zachthoutoibossen (met gele lis en bitterzoet) in het bovenstroomse deel van de Rijntakken zullen hierdoor verder verruigen; langs de Maas is dit effect overigens niet of nauwelijks te verwachten. Ook laaggelegen hooilanden (vossenstaarthooiland) worden hierdoor negatief beïnvloed. De best ontwikkelde vossenstaarthooilanden (met kievitsbloem, weidekervel of trosdravik) liggen echter benedenstrooms en/of in gereguleerde zomerpolders en worden dus veel minder beïnvloed.

Het gewijzigde overstromingsregime heeft tot gevolg dat er in theorie meer ruimte zou komen voor relatief weinig overstroomde habitattypen, zoals stroomdalgraslanden, glanshaverhooilanden, essen-iepenbossen en hardhoutoibossen. Kanttekening hierbij is dat het bodemtype in de analyse niet is meegenomen, waardoor er sprake kan zijn van een mismatch tussen bodemtype en inundatiefrequentie. De verwachting is dat er in de zone die minder dan 20 dagen inundeert vooral wat kleiigere gronden bijkomen en veel minder of zelfs helemaal geen zandige gronden. Dat zou betekenen dat het potentiële areaal glanshaverhooiland en essen-iepenbos toeneemt, maar het potentiële areaal stroomdalgrasland en hardhoutoibos niet of nauwelijks.

Langs de Maas zijn de effecten op bestaande habitattypen geringer dan langs de Rijn, niet alleen omdat de verdroging hier minder is (geen bodeminsnijding), maar ook omdat er minder Natura 2000 gebieden zijn (alleen Grensmaas, Oeffelter Meent en klein stukje Maasduinen). De zachthoutoibossen worden langs de Maas niet duidelijk beïnvloed door klimaatverandering in het doorgerekende scenario. Kanttekening hierbij is dat de effecten op grondwaterstanden niet zijn meegenomen, wat met name langs de zandige en grindige Maastrajecten een invloedrijke factor kan zijn. In de graslanden langs de Zandmaas zijn wel veranderingen zichtbaar: De relatief natte delen inunderen wat minder vaak en de relatief droge delen wat vaker. Hierdoor komt een groter deel van het habitattypen juist gunstiger te liggen omdat ze nu eigenlijk te droog liggen.

De effecten op soorten verschillen tussen en binnen soortgroepen: er zijn winners (bijv. rivierfonteinkruid) en losers (bijv. gele plomp). Ook bij de insecten zijn er soorten die profiteren of juist nadeel hebben van de opwarming als gevolg van klimaatverandering (dit effect zien we in alle ecosystemen terug). Het effect van klimaatverandering op toenemende droogte of juist zomerinundaties is overigens allebei negatief voor de meeste insectensoorten langs de rivier.

In het water zijn veel kenmerkende macrofaunasoorten (bijv. Ephemeroptera (haften), Plecoptera (steenvliegen) en Trichoptera (kokerjuffers)= EPT soorten) relatief gevoelig voor klimaateffecten als opwarming, hoge temperatuur en stagnatie van het oppervlaktewater. Exoten zijn hiervoor vaak toleranter en hebben dus een concurrentievoordeel.

Kenmerkende vispopulaties ondervinden nadeel als de voorjaarsinundaties van de uiterwaarden afnemen en de watertemperaturen toenemen, evenals de toename van de verstuwingsgraad. Dit effect van toenemende stagnatie geldt voor de gestuwde trajecten, maar ook voor de vrij afstromende riviertrajecten zoals de Grensmaas, de Waal en de IJssel. Deze zullen steeds minder vaak echt stromen in de zomerperiode en daarmee minder aantrekkelijk worden voor stroomminnende soorten. Met name in de benedenlopen van de rivieren zal de stroming gemiddeld steeds verder afnemen, door de lagere afvoeren in het groeiseizoen en de opstuwende werking van de geleidelijk stijgende zeespiegel. Droogval van nevenwateren is ook negatief voor de kenmerkende vissoorten die daar voorkomen, vooral

als bodems volledig indrogen. Net als bij macrofauna geldt dat veel kenmerkende riviervissen gevoelig zijn voor hoge temperatuur en lage zuurstofgehalten. Kwabaal is een voorbeeld van een soort die zeer gevoelig is voor de effecten van opwarming en die het in de toekomst steeds moeilijker zal krijgen langs de Nederlandse rivieren. Deze, en andere kenmerkende soorten staan al zwaar onder druk doordat de kwaliteit en connectiviteit van hun leefgebied de afgelopen eeuw sterk is afgenomen.

Ook van de amfibieën zijn verschillende soorten gevoelig voor klimaatverandering, vooral voor verdroging van hun leefgebieden en met name van voortplantingswateren. Zolang de voortplantingsperiode niet in gevaar komt lijkt het nog goed te gaan, omdat door droogval ook de predatorische vis uit de wateren verdwijnt. Naarmate het natte en moerassige areaal steeds verder afneemt en steeds vroeger droogvalt, zullen verschillende soorten in de knel kunnen komen. Dit wordt versterkt door de sterke versnippering van hun leefgebied. Verschillende populaties langs de rivier komen nu voor in gebieden die gevoeliger worden voor droogval als gevolg van klimaatverandering. Van de mondiale opwarming hebben ze minder last doordat ze door de opwarming simpelweg hun ontwikkelingsstadia sneller doorlopen, wat verder geen negatief effect heeft op de soort.

Veranderingen in de samenstelling van vogelpopulaties langs de rivieren volgen deels op de veranderingen als gevolg van klimaateffecten op vegetatie. Bij vogels kan de verschuiving van afvoerpatronen en vooral de afname van voorjaarsinundaties, voor moerassoorten bijvoorbeeld een toenemend knelpunt vormen (bijv. porseleinhoen). Vooral in het kwetsbare broedseizoen staat de beschikbaarheid voldoende natte zones voor de voedselvoorziening onder druk. Sommige warmteminnende of soorten van drogere gebieden kunnen mogelijk profiteren, met mogelijk nieuwkomers als bijeneter of kleine zilverreiger in het verschiet. Door mondiale veranderingen zal echter ook de aanwezigheid van wintergasten en trekvogels langs de rivier veranderen. Dit hoeft dan niet eens aan veranderingen in het rivierengebied te liggen.

In het algemeen komen door klimaatverandering meer nutriënten beschikbaar, waardoor de primaire productie in het water omhoog gaat. In combinatie met hogere temperaturen geeft dit een groter risico op algen- en kroosbloeien en minder kansen voor soortenrijke watervegetaties.

Voor terrestrische vegetaties zal de nutriëntenbeschikbaarheid naar verwachting niet significant veranderen door klimaatverandering. Voor deze vegetaties worden wel effecten verwacht van de gewijzigde overstromingsfrequentie. In het algemeen worden de hoge waterstanden (piekafvoeren) hoger en de lage en gemiddelde waterstanden (basisafvoer) lager. De rivierinsnijding van de Rijn maakt dat het effect op basisafvoer langs het bovenstroomse deel van de Rijn zeer groot is, terwijl dit in het benedenstroomse deel en langs de Maas relatief beperkt is. Het effect van piekafvoeren is in de benedenstroomse delen van de Rijn ook kleiner.

Een apart geval is het toenemende risico op zomerinundaties. Wat dit betekent hebben we in de zomer van 2021 meegemaakt. De verwachting is dat dit in de toekomst vaker gebeurt, maar dat het wel extreme incidenten blijven (gemiddeld eens per 400 jaar, Kreienkamp *et al.*, 2021). Voor dergelijke onvoorspelbare incidenten met onvoorspelbare omvang en duur is het moeilijk om uitspraken over de te verwachten effecten op riviernatuur te doen. Langs de Maas speelt dit naar verwachting meer dan langs de Rijn omdat deze rivier sneller reageert vanwege het nabij gelegen en kleinere stroomgebied. Duidelijk is wel dat voor de meeste soortgroepen toename van de frequentie van zomerinundaties negatief zou kunnen uitpakken. Met name op de drogere graslanden (glanshaverhooiland, stroomdalgrasland) en bossen is een negatief effect te verwachten van zomerinundaties.

De negatieve effecten van zowel droogte als zomerinundaties hangen samen met de huidige sterk door de mens beïnvloede vormgeving van de uiterwaarden, waarin weinig ruimte in de

breedte is, weinig variatie in het reliëf en weinig longitudinale en laterale ecologische verbindingen zijn. Dit maakt het rivierecosysteem kwetsbaarder voor tijdelijk ongunstige omstandigheden of ze nou klimaatgerelateerd zijn of niet.

Implicaties voor beheer

Voor beheerders in het riviereengebied kunnen de effecten van klimaatverandering voor een extra kostenpost zorgen als aanvullend of aangepast beheer nodig is (zoals vaker maaien) of als beheerinkomsten wegvallen (zie paragraaf 7.2). Daarnaast betekent klimaatverandering een extra onzekerheidsfactor, die enerzijds een grotere onvoorspelbaarheid met zich meebrengt (denk aan zomerhoogwaters), maar ook de bestaande drukfactoren verder uitvergroot (denk aan verdroging, opwarming en verrijking). In die zin blijft het voor veel natuurdoelen hard werken en vraagt het nog grotere flexibiliteit van de beheerders. Tegelijk raken steeds meer mensen doordrongen van de urgentie van het nemen van klimaatmaatregelen en zal er hopelijk de komende jaren meer aan brongerichte maatregelen gewerkt gaan worden op een hoger schaalniveau. Dit zou een belangrijke pijler vormen voor de gebiedsgerichte (beheer)maatregelen waar beheerders voor aan de lat staan.

7.2 Aanbevelingen voor onderzoek, beheer en klimaatmitigatie

De doorrekening van de klimaatscenario's in risico-kaarten kan voor beheerders nuttig zijn om voor de kwetsbare gebieden (zie Figuur 3.8) verder in te zoomen en een gerichte gebiedsanalyse uit te voeren, gericht op de lokale natuurdoelen. Bij die gebiedsgerichte uitwerking moeten dan alle standplaatsfactoren (bodemtype, chemie, etc.) en drukfactoren meegenomen worden alvorens maatregelen te treffen. De cumulatieve effecten van verschillende milieufactoren maken geen onderdeel uit van de huidige studie.

Niet alle spin-off van klimaatverandering is meegenomen in deze studie, die zich vooral richt op de directe ecologische effecten van de veranderingen in hydrologie en temperatuur. Effecten op andere standplaatsfactoren zoals bodem, chemie, voedselbeschikbaarheid in de bodem die kunnen leiden tot ecologische mismatch zijn beperkt meegenomen in deze studie. Er is bijvoorbeeld niet onderzocht of een verschuiving van inundatiearealen voor bepaalde habitattypen wel matcht met het geschikte bodemtype. Ook zijn voedselwebaspecten, zoals de timing van voedselbeschikbaarheid niet meegenomen. Ook menselijk gedrag is niet meegenomen. Warme zomers trekken bijvoorbeeld naar verwachting meer recreatie naar de rivieren, waardoor de rust voor bijvoorbeeld broedvogels af kan nemen. Watergebruik (bijv. voor beregning of koeling) neemt ook toe in drogere periodes, waardoor er water wordt onttrokken direct aan de rivier of water van de rivier richting het grondwater stroomt. Deze aspecten zouden in een integrale analyse wel meegenomen moeten worden. In de Deltascenario's van het KNMI worden de effecten van de autonome economische en bevolkingsontwikkeling op hoofdlijnen wel meegenomen.

Als aanbeveling voor mitigerende maatregelen verwijzen we naar Tabel 6.1. Primair zijn uiteraard brongerichte maatregelen buiten de rivier van groot belang, zoals het langer vasthouden van water in de intrekgebieden, het afkoppelen van regenwater van rioolstelsels, zuiniger omgaan met water, etc. Vervolgens hebben grootschalige maatregelen, zoals dijkverlegging of optimalisatie van het stuwregime de voorkeur, omdat deze maatregelen een grotere invloedssfeer hebben. Maatregelen tegen de insnijding van het zomerbed helpen ook om verdroging als gevolg van klimaatverandering te mitigeren. Ten slotte kunnen ook kleinschalige maatregelen, zoals aanpassen van de ontwatering in een uiterwaard en het daarmee langer vasthouden van water, een belangrijke bijdrage leveren, omdat met weinig kosten en inspanning lokaal ook een verbetering bereikt kan worden. Hierbij is samenwerking tussen de verschillende betrokken partijen van groot belang (waterschappen, terreinbeheerders, agrariërs, RWS, ...).

De maatregelen die nu in de Programmatische Aanpak Grote Wateren (zichtjaar 2050) worden voorzien zullen ook bijdragen aan het klimaatrobuuster maken van het rivierensysteem, doordat er grotere natuurlijke eenheden worden gerealiseerd en deze ook met elkaar verbonden worden. Dit maakt de soorten en habitats beter bestand tegen onvoorspelbare 'events'. Kanttekening is dat hiermee de habitats met een lange ontwikkeltijd nog niet automatisch beschermd zijn. Hiervoor kan juist langduriger stabiliteit in omstandigheden en beheer nodig zijn. Door bijvoorbeeld binnendijkse gebieden aan te koppelen neemt de ruimte in de uiterwaarden in laterale zin toe en ontstaat meer ruimte voor deze laagdynamische milieus.

In de klimaatscenario's van het KNMI wordt ook voorzien dat de zeespiegelstijging vanaf 2050 merkbaar wordt op rivieren. De vraag is wat dit betekent voor lange termijn maatregelen die nu voorbereid worden (PAGW). De effecten van zeespiegelstijging op de ecologische ontwikkeling in het benedenrivierengebied vragen om een gerichte studie.

Om meer gerichte kennis te krijgen over de effecten, gevolgen en mogelijke mitigerende maatregelen voor klimaatverandering zou een specifiek monitoringprogramma voor klimaateffecten op (rivier)natuur kunnen helpen. Zo zou er een draaiboek opgesteld kunnen worden voor ecologische monitoring tijdens en na een hoogwater, gericht op het vastleggen van wat de effecten zijn van een piekafvoer, zowel in de winter als de zomer. Ook voor extreem droge en warme situaties (zoals bijvoorbeeld in 2003) zou een monitoringsdraaiboek opgesteld kunnen worden, zodat ook tijdens de gebeurtenis al metingen gedaan kunnen worden. Ook is het van belang deze metingen langer dan één seizoen vol te houden, zodat de effecten op langere termijn duidelijk worden. Dit geldt ook van het monitoren van maatregelen die mogelijk klimaatmitigerend werken. Hierbij gaat het dan niet alleen om het volgen van de ecologische ontwikkeling, maar juist ook om het meten van klimaatgerelateerde parameters, zoals temperatuur, zuurstofgehalte en stroming op veel meer plekken dan nu gedaan wordt.

Naast bovengenoemd praktijkonderzoek, zijn ook nog specifieke modelstudies wenselijk, bijvoorbeeld naar de te verwachten effecten van klimaatverandering op kwel in de uiterwaarden of de effecten van zeespiegelstijging op riviernatuur.

De aansluiting met de problematiek in het benedenrivierengebied verdient ook aandacht. In het benedenrivierengebied speelt bodemdaling door sedimenttekort ook een belangrijke rol, zeker in relatie tot zeespiegelstijging (Nienhuis & van de Wal 2021). Het zou goed zijn te bekijken welke strategieën bovenstrooms ook kunnen helpen om de knelpunten benedenstrooms op te lossen. De aard van de benodigde mitigerende maatregelen is in elk geval deels vergelijkbaar, denk aan uitbreiding van inundatievlaktes uitbreiden en vegetatie of rivierhout als water- en sedimentvang inzetten (Cox *et al.* 2022).

De effecten die rivierbeheerders ervaren door klimaatverandering hebben ook gevolgen voor beheer en beheerkosten. Het zomerhoogwater van 2021 heeft bijvoorbeeld voor veel extra kosten gezorgd. Veel hooi afkomstig van glanshaverhooiland dat was ondergelopen moest bijvoorbeeld gestort worden. Deze stortkosten zijn niet begroot, want hooiland zorgt in het algemeen juist voor inkomsten van beheer. Ook zal bijvoorbeeld verdroogd rietland frequenter gemaaid moeten worden dan permanent nat rietland. De huidige normkosten in SNL zijn nog niet berekend op deze nieuwe effecten. Indien dit soort klimaateffecten frequenter zullen optreden, zal een aanpassing van de SNL-normkosten in overweging genomen moeten worden. Hiervoor is meer onderzoek nodig.

Een laatste belangrijke aanbeveling is om in het ontwerpproces van projecten en programma's klimaatverandering integraal mee te nemen bij het ontwerpen van maatregelen. Als hulpmiddel kan hierbij de webviewer gebruikt worden: <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=32d3e4e0ac964d79ac93312bb516cea5>. In deze webviewer zijn de resultaten van de berekende inundatiearealen in te

zien voor de Rijn en de Maas, zowel met als zonder bodemdaling. Dit kan door beheerders gebruikt worden om te verkennen waar de gebieden liggen die gevoelig zijn voor verdroging of juist vernatting. Vervolgens kan op basis hiervan met aanvullende gegevens meer in detail onderzocht worden wat de kwetsbare zones zijn en welke mitigerende maatregelen of beheerdoelen hierbij passen.

Ook zullen we anders tegen begroeiing in de uiterwaarden aan moeten kijken. Vegetatiestructuren dragen bij aan het vasthouden van water, water op maaiveld en hoge grondwaterstanden zijn belangrijke factoren voor 'temperatuurmanagement' (Woodland Trust, 2016). De complexe afweging hierin tussen natuurwaarden en waterveiligheid krijgt er dus een component 'klimaatbestendigheid' bij.

Overigens zijn de directe gevolgen van ons huidige landgebruik en het gebruik van de rivieren en water op dit moment groter dan de klimaateffecten. Daar verbetering in brengen is dan ook de beste mitigerende maatregel om klimaateffecten te beperken.

8 Referenties

- Aggenbach C.S.J., J. Grijpstra & M.H. Jalink, 2007. Indicatorsoorten voor verdroging, verzuring en eutrofiëring van plantengemeenschappen in uiterwaarden. Deel 10 uit de serie 'indicatorsoorten'. KIWA, VEWIN, Min. LNV en SBB, Driebergen.
- Antheunisse, A.M., R. Loeb, L.P.M. Lamers & J.T.A. Verhoeven, 2006. Regional differences in nutrient limitation in floodplains of selected European rivers: implications for rehabilitation of characteristic floodplain vegetation. *River research and applications* 22-9: 1039-1055.
- Arts, G., R. Verdonchot, G. Maas, H. Massop, F. Ottburg, E. Weeda, 2016. Herstel en ontwikkeling van laag- dynamische, aquatische systemen in het rivierengebied. OBN-rapport 2016/OBN205-RI.
- Bancroft, B., N. Baker, C. Searle, T. Garcia & A. Blaustein, 2008. Larval amphibians seek warm temperatures and do not avoid harmful UVB radiation. *Behavioral Ecology* 19: 879-886.
- Bauer, Z., M. Trnka, J. Baueroová, M. Mozný, P. Stepánek, L. Bartosová & Z. Zalud, 2010. Changing climate and the phenological response of great tit and collared flycatcher populations in floodplain forest ecosystems in Central Europe. *Int J Biometeorol* 54, 99–111.
- Blaustein, A.R. & B.A. Bancroft, 2007. Amphibian population declines: evolutionary considerations. *Bioscience*: 57: 437-444.
- Blöschl, G. J. Hall, J. Parajka, R. A. P. Perdigão, B. Merz, B. Arheimer, G. T. Aronica, A. Bilibashi, O. Bonacci, M. Borga, I. Canjevac, A. Castellarin, G. B. Chirico, P. Claps, K. Fiala, N. Frolova, L. Gorbachova, A. Gül, J. Hannaford, S. Harrigan, M. Kireeva, A. Kiss, T. R. Kjeldsen, S. Kohnová, J. J. Koskela, O. Ledvinka, N. Macdonald, M. Mavrova-Guirguinova, L. Mediero, R. Merz, P. Molnar, A. Montanari, C. Murphy, M. Osuch, V. Ovcharuk, I. Radevski, M. Rogger, J. L. Salinas, E. Sauquet, M. Sraj, J. Szolgay, A. Viglione, E. Volpi, D. Wilson, K. Zaimi and N. Zivkovic, 2017. Changing climate shifts timing of European floods. *Science* 357 (6351), 588-590. DOI: 10.1126/science.aan2506
- Boele A., J. van Bruggen, F. Hustings, A. van Kleunen, K. Koffijberg, J.W. Vergeer. & T. van der Meij, 2021. Broedvogels in Nederland in 2019. Sovon-rapport 2021/02. Sovon Vogelonderzoek Nederland, Nijmegen.
- Boeren, J., 2006. Opmars van de gouden sprinkhaan in Limburg. *Natuurhistorisch Maandblad* 95: 209-213.
- Bosman, W., J.J. van Gelder & H. Strijbosch, 1997. The effect of inundation on hibernating *Bufo bufo* and *Bufo calamita*. *Amphibia - Reptilia* 18: 339 -346.
- Both, C., M. van Asch, R.G. Bijlsma, A.B. van den Burg & M.E. Visser, 2009. Climate change and unequal phenological changes across four trophic levels constraints or adaptations. *Journal of Animal Ecology* 78:73-83.
- Braakhekke, W.G., F. Berendse, M. de Jong, A. van Kreveld, A. van Winden, 2014. Klimaatverandering en natuur. Een verkenning van risico's, kansen en aangrijpingspunten voor klimaatadaptatiebeleid.
- Bradley, P.W., M.D. Brawner, T.R. Raffel, J.R. Rohr, D.H. Olson & A.R. Blaustein, 2019. Shifts in temperature influence how *Batrachochytrium dendrobatidis* infects amphibian larvae. *PLoS ONE* 14: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222237>.
- Brock, T.C.M., Van der Velde, G. & Van de Steeg, H.M., 1987. The effects of extreme water-level fluctuations on the wetland vegetation of a nymphaeid-dominated oxbow lake in The Netherlands. *Archiv für Hydrobiologie - Ergebnisse der Limnologie* 27, 73-57.

- Browne, G., P. de Kwaadsteniet, G. Schmidt & J. van Kempen, 2016. Werken aan klimaatbestendige beken - Wat is het effect van beekbegeleidende beplanting op beektemperatuur? H2O Online 18 maart 2016.
- Bruno, D., O. Belmar, A. Maire, A. Morel, B. Dumont & T. Datry, 2019. Structural and functional responses of invertebrate communities to climate change and flow regulation in alpine catchments. *Global Change Biology* 25: 1612-1628.
- Bunn, S.E. & A.H. Arthington, 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30(4): 492-507.
- CBS, 2021. <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2021/30/steeds-meer-sprinkhanen-in-nederland>
- Climate Change post 2021. <https://www.climatechangepost.com/news/2021/10/3/intense-rainstorms-are-moving-more-slowly-causing/>
- Collas, F.P.L., Koopman, K.R., Hendriks, A.J., Van der Velde, G, Verbrugge, L.N.H., & Leuven, R.S.E.W., 2014. Effects of desiccation on native and non-native molluscs in rivers. *Freshwater Biology*, 59: 41-55.
- Collas, F.P.L., A.D. Buijse, A.J. Hendriks, G. Van der Velde & R.S.E.W. Leuven, 2018 Sensitivity of native and alien freshwater bivalve species in Europe to climate related environmental factors. *Ecosphere* 9(5) e02184.
- Collas, F.P.L., W.K. van Iersel, M.W. Straatsma, A. D. Buijse & R.S.E.W. Leuven, 2019. Sub-Daily Temperature Heterogeneity in a Side Channel and the Influence on Habitat Suitability of Freshwater Fish. *Remote Sens.* 2019, 11, 2367; doi:10.3390/rs11202367
- Collas, F.P.L., N.Y. Flores, R. Van Aalderen, F. Bosman, M.M. Schoor, L.N.H. Verbrugge, W. Romeijn, N. Van Kessel, B. Achterkamp, W. Liefveld, A.D. Buijse & R.S.E.W. Leuven, 2020. Rapportage natuurgegevens langsdammen waal 2016-2020. Verslagen Dierecologie en Fysiologie 2020-2, Radboud Universiteit, Nijmegen, Nederland, 138 pp.
- Compendium voor leefomgeving (CLO), 2020. <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0566-temperatuur-oppervlaktewater>.
- Cox, J.R., Mandy Paauw, Jaap H. Nienhuis, Frances E. Dunn, Eveline van der Deijl, Christopher Esposito, Marc Goichot, Jasper R.F.W. Leuven, Dirk S. van Maren, Hans Middelkoop, Safaa Naffaa, Munsur Rahman, Christian Schwarz, Eline Sieben, Annisa Triyanti, Brendan Yuill, 2022. A global synthesis of the effectiveness of sedimentation-enhancing strategies for river deltas and estuaries, *Global and Planetary Change*, 10.1016/j.gloplacha.2022.103796, (103796)
- Creemers, R.C.M., 1994. Voortplantingsplaatsen van amfibieën in uiterwaarden. Rapport werkgroep Dierecologie, KU Nijmegen / Ministerie van LNV.
- Creemers, R.C.M. & J.J.C. Van Delft, 2009. De amfibieën en reptielen van Nederland. Nederlandse fauna 9, RAVON.
- Crosa, G., E. Castelli, G. Gentili & P. Espa, 2010. Effects of suspended sediments from reservoir flushing on fish and macroinvertebrates in an alpine stream. *Aquat. Sci.* 72(1): 85-95. <https://doi.org/10.1007/s00027->
- Cupp, P., 1980. Thermal tolerance of five salientian amphibians during development and metamorphosis. *Herpetologica* 36: 234-244.
- De Roda Husman, A.M. & F.M. Schets, 2010. Climate change and recreational waterrelated infectious diseases, RIVM, Bilthoven.
- De Wit, M.J.M., B. van den Hurk, B. & P.M.M. Warmerdam, 2007. Impact of climate change on low-flows in the river Meuse. *Climatic Change* 82: 351-372. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9195-2>
- Hommel, P., J. Cornelis, L. de Keersmaecker & B. Vandevoorde, 2011. Hoofdstuk 16: Uiterwaarden en zoetwatergetijdengebied. In: Den Ouden, J., B. Muys, F. Mouren & K. Verheyen, 2011. Boscologie en bosbeheer. Tweede druk, Acco Leuven/Den Haag.
- Dorenbosch, M., M. Kooiman, S. Ploegaert, M. Vos & J. Kranenbarg, 2020. Visgemeenschappen in drie Nederlandse overstromingsvlakten. Rapport 2017.057, RAVON, Nijmegen.
- Dorenbosch, M & M. Schoor, 2021. Effect van water vasthouden op vissen in de overstromingsvlakte Buiten Ooij. *De Levende Natuur* 6.

- Doretto, A., T. Bo, F. Bona, M. Apostolo, D. Bonetto & S. Fenoglio, 2019. Effectiveness of artificial floods for benthic community recovery after sediment flushing from a dam. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191: 88. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7232-7>
- Elshout, P. M. F., L. M. Dionisio Pires, R. S. E. W. Leuven, S. E. Wendelaar Bonga, A. J. Hendriks, 2013. Low oxygen tolerance of different life stages of temperate freshwater fish species. *Journal of Fish Biology*, 83 (1): 190-206.
- Eisner, S., M. Flörke, A. Chamorro, P. Dagupati, C. Donnelly, J. Huang, Y. Hundecha, H. Koch, A. Kalugin, I. Krylenko, V. Mishra, M. Piniewski, L. Samaniego, O. Seidou, M. Wallner & V. Krysanova. 2016. An ensemble analysis of climate change impacts on streamflow seasonality across 11 large river basins. *Climatic Change* (2017) 141:401–417. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1844-5>
- Ertsen, A.C.D., R.A.E. Knoben, W.M. Liefveld & J. Olthof, 2000. Zuurstofhuishouding van de Grensmaas. Relaties met macro-evertebraten en vissen. Reports of the project 'Ecological Rehabilitation of the River Meuse' (with a summary in English and French).
- Espa, P., G. Crosa, G. Gentili, S. Quadroni & G. Petts, 2015. Downstream ecological impacts of controlled sediment flushing in an alpine valley river: a case study. *River Research and Applications* 31: 931– 942.
- Feijen, M. 2011. Beheerplan Blauwe Kamer, Grebbeberg en Laarsenberg 2011-2021. Utrechts Landschap, De Bilt.
- Foppen R., M. van Roomen, L. van den Bremer & R. Noordhuis, 2016. De ecologische haalbaarheid van de Natura 2000 instandhoudingsdoelen voor vogels. Sovon-rapport 2016/51. Sovon Vogelonderzoek Nederland, Nijmegen.
- Geerling, G., T. Buijse & L. van Kouwen, 2010. Ecologische potenties van peilvariatie in stuwpanden van de Maas. Rapport 1202598, Deltares.
- Gomez-Mestre I, S. Kulkarni & D.R. Buchholz, 2013. Mechanisms and consequences of developmental acceleration in tadpoles responding to pond drying. *PLoS ONE* 8(12): <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084266>
- Groen, K., 2017. Geven Rode Lijsten de juiste richting aan? Ontwikkelingen in enkele ecosystemen in het rivierengebied. Presentatie FLORON dag 2017.
- Hardenbicker, P., C. Viergutz, A. Becker, V. Kirchesch, E. Nilson & H. Fischer, 2017. Water temperature increases in the river Rhine in response to climate change. *Regional and Environmental Change* 17: 299–308.
- Hering, D., A. Schmidt-Kloiber, J. Murphy, S. Lücke, C. Zamora-Muñoz, M. Jesús López-Rodríguez, T. Huber & W. Graf, 2009. Potential impact of climate change on aquatic insects: A sensitivity analysis for European caddisflies (Trichoptera) based on distribution patterns and ecological preferences. *Aquat. Sci.* 71, 3–14.
- Hosen, J.D., K.S. Aho, A.P. Appling, E.C. Creech, J.H. Fair, R.O., Hall, E.D. Kyzivat, R.S., Lowenthal, S. Matt, J. Morrison, J.E. Saiers, J.B. Shanley, L.C. Weber, B. Yoon & P.A. Raymond, 2019. Enhancement of primary production during drought in a temperate watershed is greater in larger rivers than headwater streams. *Limnology and Oceanography* 64: 1458-1472.
- Hunink, J., J. Deisman, G. Prinsen, L. Bos - Burgering, N. Mulder & M. Visser, 2018 Vertaling van Deltascenario's 2017 naar modelinvoer voor het Nationaal Water Model. Deltares rapport 11202240-009-ZWS. Utrecht, oktober 2018.
- Huntley B., R.E. Green., Y.C. Collingham & S.G. Willis, 2007. A Climatic Atlas of European Breeding Birds. Durham University, The RSPB and Lynx Edicions, Barcelona.
- Hurkmans, R., W. Terink, R. Uijlenhoet, P. Torfs, D. Jacob and P. A. Troch, 2010. Changes in Streamflow Dynamics in the Rhine Basin under Three High-Resolution Regional Climate Scenarios. *Journal of Climate*, Vol 23 (3) pp: 679–699. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3066.1>
- Inberg, J.A., W.M. Liefveld, M. Dorenbosch, R.v.d. Haterd, D. Emond, G. Hoefsloot, L. Anema & G. Kurstjens, 2015. Kartering habitattypen en habitatsoorten Grensmaas. Situatie 2015. Bureau Waardenburg Rapportnr. 15- 244. Bureau Waardenburg, Culemborg.

- Jansen, A., J. Bouma, T. de Meij, U. Vegter & M. Wallis de Vries (red.), 2020. Droogte ingrijpend voor natuur in hoog Nederland. OBN Deskundigenteams Nat zandlandschap en Beekdalen. KNNV Publishing, Zeist. OBN/VBNE, Driebergen.
- Junk, W.J., P.B. Bayley & R.E. Sparks, 1989. The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems. In: Doge, D.P.(Ed.). Proc. Int. Large River Symp (Lars). Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 106: 110-127.
- Kašpar, V., L., Hederová, M. Maceka, J. Müllerová, J. Prošekab, P. Surový, J. Wild, M. Kopeckýac, 2021. Temperature buffering in temperate forests: Comparing microclimate models based on ground measurements with active and passive remote sensing. Remote Sensing of Environment. 263, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112522>
- Klaus, V.H., J. Sintermann, T. Kleinebecker & N. Hölzela, 2011. Sedimentation-induced eutrophication in large river floodplains – An obstacle to restoration? Biological Conservation, 144-1, Page: 451-458.
- Kleyer, M., R.M. Bekker, I.C. Knevel, J.P. Bakker, K. Thompson, M. Sonnenschein, P. Poschlod, J.M. Van Groenendael, L. Klimes, J. Klimesová, S. Klotz, G.M. Rusch, M. Hermy, D. Adriaens, G. Boedeltje, B. Bossuyt, A. Dannemann, P. Endels, L. Götzenberger, J.G. Hodgson, A-K. Jackel, I. Kühn, D. Kunzmann, W.A. Ozinga, C. Römermann, M. Stadler, J. Schlegelmilch, H.J. Steendam, O. Tackenberg, B. Wilmann, J.H.C. Cornelissen, O. Eriksson, E. Garnier & B. Peco, 2008. The LEDA Traitbase: A database of life-history traits of Northwest European flora. Journal of Ecology 96: 1266-1274.
- Klijn, F., M. Hegnauer, J. Beersma, F. Sperna Weiland, 2015. Samenvatting van onderzoek met GRADE naar implicaties van nieuwe klimaatprojecties voor rivierafvoeren. Deltares en KNMI. Deltares rapport nr: 1220042-004.
- Knaapen, J.P. & J.G.M. Rademakers, 1990. Rivierdynamiek en vegetatieontwikkeling. Staring centrum rapport 82, Wageningen.
- KNMI, 2015: KNMI'14 climate scenarios for the Netherlands. A guide for professionals in climate adaptation, KNMI, De Bilt, The Netherlands, 34 pp.
- KNMI, 2021: KNMI Klimaatsignaal'21: hoe het klimaat in Nederland snel verandert, KNMI, De Bilt, 72 pp.
- Kosten, S., 2011. Een frisse blik op warmer water. Over de invloed van klimaatverandering op de aquatische ecologie en hoe je de negatieve effecten kunt tegengaan. Rapport 2011-20, STOWA.
- Kreienkamp, F., S.Y. Philip, J.S. Tradowsky, S.F. Kew, P. Lorenz, J. Arrighi, A. Belleflamme, T. Bettmann, S. Caluwaerts, S.C. Chan, A. Ciavarella, L. De Cruz, H. De Vries, N. Demuth, A. Ferrone, E.M. Fischer, H.J. Fowler, K. Görgen, D. Heinrich, Y. Henrichs, G. Lenderink, F. Kaspar, E. Nilson, F.E.L. Otto, F. Ragone, S.I. Seneviratne, R.K. Singh, A. Skålevåg, P. Termonia, L. Thalheimer, M. Van Aalst, J. Van den Bergh, H. Van de Vyver, S. Vannitsem, G.J. Van Oldenborgh, B. Van Schaeybroeck, R. Vautard, D. Vonk & N. Wanders, 2021. Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. World weather attribution.
- Kurstjens, G., B. Peters & K. van Looy, 2010. De flora van het Maasdal. Ontwikkelingen van bijzondere soorten sinds de start van natuurontwikkeling vanaf 1994. Deelrapport 7. Kurstjens ecologisch adviesbureau, Beek-Ubbergen; Bureau Drift, Berg en Dal en INBO, Brussel.
- Kurstjens G., G. van Geest, B. Peters B. & T. Wijers, 2014. Ondiepe overstromingsvlakte als missing link. De Levende Natuur 115: 129-133.
- Kurstjens, G. & B. Peters, 2017: Maas in Beeld Grensmaas – Locatie Borgharen; Gebiedsrapportage 2016.
- Kurstjens, G. & B. Peters, 2020. Maas in Beeld; Hemelrijkse Waard gebiedsrapportage 2019.
- Kurstjens, G., M. Nijssen, A. van Winden, M. Dorenbosch, H. Moller Pillot, C. van Turnhout & P. Veldt, 2020. Natte overstromingsvlakten in het rivierengebied. Ecologisch functioneren en ontwikkelkansen, rapport 2020/OBN237-RI. VBNE, Driebergen.
- Kwadijk J., N.W. Arnell, C. Mudersbach, M. de Weerd, A. Kroon & M. Quante, 2016. Recent Change—River Flow. In: Quante M., Colijn F. (eds) North Sea Region Climate Change

- Assessment. Regional Climate Studies. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39745-0_4
- Lammertsma, D.R., A.T. Kuiters & J.H. Faber, 2001. Ongewervelde fauna van uiterwaarden; een literatuurstudie naar effecten van inundatie en begrazingsbeheer. Alterra-rapport 187.
- Lehikoinen A., R.P.B. Foppen, H. Heldbjerg, A. Lindström, W. van Manen W., S. Piirainen, C.A.M. van Turnhout & S.H.M. Butchart, 2016. Large-scale climatic drivers of regional winter bird population trends. *Diversity Distrib.* 22: 1163–1173.
- Lenderink, G. & J. Beersma, 2015. The KNMI'14 WH,dry scenario for the Rhine and Meuse basins. KNMI Scientific Report WR 2015-02.
- Leuven, R.S.E.W., A.J. Hendriks, M.A.J. Huijbregts, H.J.R. Lenders, J. Matthews & G. Van der Velde, 2011. Differences in sensitivity of native and exotic fish species to changes in river temperature. *Current Zoology* 57: 852-862.
- Liefveld, W.M. & P. Jesse, 2006. Minimale afvoer van de Grensmaas. Inschatting van ecologische effecten met RHASIM. RIZA-rapport nr. 2006-015, ISBN: 9036957397.
- Liefveld, W.M. & F. Schulze, 2005. A river habitat simulation model to quantify ecological effects of low discharges on the River Meuse (the Netherlands, Belgium). *Large Rivers Vol. IS, No.1-4, Arch. Hydrobiol. Suppl.*155/1-4, p. 465-481.
- Liefveld, W.M., F. van Hemmen, H-J. Barneveld & L. Lokin: Meerwaarde Waal-Maas connectie. Verankerd in het verleden, bestendig voor de toekomst, 2018. Rapportnr. 18-331. Bureau Waardenburg, Culemborg. Pp. 88.
- Loeb, R., E. van Daalen, L.P.M. Lamers & J.G.M. Roelofs, 2007. How soil characteristics and water quality influence the biogeochemical response to flooding in riverine wetlands. *Biogeochemistry* 85: 289–302.
- Loeb, R., L.P.M. Lamers & J.G.M. Roelofs, 2008. Effects of winter versus summer flooding and subsequent desiccation on soil chemistry in a riverine hay meadow. *Geoderma* 145 (1–2): 84-90.
- Loeb, R., L. Kuijpers, R.C.J.H. Peters, L.P.M. Lamers & J.G.M. Roelofs, 2009. Nutrient limitation along eutrophic rivers? Roles of N, P and K input in a species-rich floodplain hay meadow. *Applied vegetation Science* 12-3: 362-375.
- Loeve, R., P. Droogers & J. Veraart, 2006. Klimaatverandering en waterkwaliteit, Wetterskip Fryslan, Leeuwarden.
- Majdi, N., J. Uthoff, W. Traunspurger, P. Laffaille & A. Maire, 2020. Effect of water warming on the structure of biofilm-dwelling communities. *Ecological Indicators* 117 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106622>
- Makaske, B. & G. Maas, 2013. Klimaatverandering en riviernatuur in de periode 2015-2050; Klimaatverandering en riviernatuur in de periode 2015-2050; Een verkenning van effecten en adaptatiemogelijkheden. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra-rapport 2484. 56 blz.; 25 fig.; 11 tab.; 39 ref.
- Ministerie van LNV, 2008. Profiel Habitatype H6120 Kalkminnend grasland op dorre zandbodem (Stroomdalgraslanden). versie 1 sept 2008.
- Moller Pillot, H.K.M., 2003. Hoe waterdieren zich handhaven in een dynamische wereld. 10 jaar onderzoek in de Roodloop, een bovenloopje van de Reusel in Noord-Brabant. Stichting het Noordbrabants Landschap, Haaren.
- Moss, B., S. Kosten, M. Meerhoff, R.W. Battarbee, E. Jeppesen, N. Mazzeo, K. Havens, G. Lacerot, Z. Liu, L. de Meester, H. Paerl & M. Scheffer, 2011. Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland waters* (1:2), 101-105.
- Murdoch, A., C. Mantyka-Pringle & S. Sharma, 2020. The interactive effects of climate change and land use on boreal stream fish communities. *Science of The Total Environment* 700 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134518>
- Nagl, A. & R. Hofer, 1997. Effects of ultraviolet radiation on early larval stages of the Alpine newt, *Triturus alpestris*, under natural and laboratory conditions. *Oecologia* 110: 514–519.
- Nienhuis, J.H., van de Wal, R.S.W., 2021. Projections of global delta land loss from Sea-level rise in the 21st century. *Geophys. Res. Lett.* 48 (14) <https://doi.org/10.1029/2021GL093368> e2021GL093368.

- Noordhuis, R., G. van Geest, M. Maarse, S. Vergouwen & A. Boon, 2019. Klimaatscan. Deltares rapport: 11203733-000-ZWS-0006.
- Noordhuis, R., L. van der Heijden & a. de Jong, 2021. Effecten van temperatuuroptename op de grote wateren. Een literatuurstudie met data-overzicht. Rapport 11205270-005, Deltares.
- Oldham, R. S., J. Keeble, M. J. S. Swan & M. Jeffcote, 2000. Evaluating the suitability of habitat for the great crested newt (*Triturus cristatus*). Herpetological Journal 10: 143-155.
- Oromí, N., O. Marquis, C. Miaud & D. Sanuy, 2008. Influence of ambient ultraviolet radiation on *Bufo calamita* egg development in a semiarid zone (Catalonia, Spain). Journal of environmental biology: 29: 135-137.
- Peters, B.W.E., E. Kater & G.W. Geerling, 2006. Cyclisch beheer in uiterwaarden: Natuur en veiligheid in de praktijk. Centrum voor Water en Samenleving, Radboud Universiteit, Nijmegen.
- Peters, B., G. Kurstjens & B. Beekers, 2011. Rijn in Beeld; natuurontwikkeling langs de grote rivieren. Deel 3 De IJssel. Pp. 40.
- Pflug, S., B. R.Voortman, J.H.C. Cornelissen & J.-P. M. Witte, 2021. The effect of plant size and branch traits on rainfall interception of 10 temperate tree species. Ecohydrology, e2349. <https://doi.org/10.1002/eco.2349> PFLUG ET AL. 17 of 17
- Rademakers, J., 2016. Planbeschrijving Hemelrijkse Waard, As-built, oktober 2016. Documentnummer Rijkswaterstaat ZN: RWSZN-2016-00306.
- Reeze, B., A. van Winden, J. Postma, R. Pot, J. Hop & W. Liefveld, 2017. Watersysteemrapportage Rijntakken 1990-2015. Ontwikkelingen waterkwaliteit en ecologie. Bart Reeze Water & Ecologie, Harderwijk.
- Reeze, B., W. Liefveld, J. Postma, H. Barneveld, N. van Kessel, H. van der Jagt, T. Smit, H. Coops, D. Tjabbes - Van der Gaag, 2020. Watersysteemrapportage Maas. Rapport Anteagroupp / RWS.
- RIWA, 2016. De kwaliteit van het Maaswater in 2015: jaarrapport 2015 de Maas.
- Rothier, S. & K. Sykora, 2016. Zandafzetting, standplaats, beheer en botanische kwaliteit van Stroomdalgrasland. Rapportnr.2016/OBN-200-RI.
- Runhaar, J., B.R. Raterman & W.J. Zaadnoordijk, 2014. Inundatieregime kievitsbloemhooilanden langs het Zwarte water. KWR-rapport 2014.105, i.o.v. Provincie Overijssel.
- Runhaar, H. & S. Hennekens, 2014. Waterlood: 'Hydrologische Randvoorwaarden Natuur' versie 3. STOWA, KWR en STOWA.
- RVO (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland) 2017. Natuurverkenning Grote Rivieren. Veerkrachtig Ecosysteem voor de Grote Rivieren. In samenwerking met Wageningen Environmental Research (Alterra).
- Schaminée, J.H.J., A.H.F. Stortelder & E.J. Weeda, 1996. De Vegetatie van Nederland deel 3. Plantengemeenschappen van graslanden, zomen en droge heiden. Opulus Press, Uppsala / Leiden.
- Schneider, C., M. Florke, M., G. Geerling, H. Duell, M. Grygoruk & T. Okruszko, 2011. The future of European floodplain a changing climate. Journal of Water and Climate Change 2: 106-122.
- Sierdsema, H., J. van Diermen, B. Aarts, L. Bremer & A. van Kleunen, 2008. Factsheets van broedvogels in de Natura 2000-gebieden van Gelderland. SOVON-Onderzoeksrapport 2008/14.
- Sival, F.P., P.C. Jansen, B.S.J. Nijhof & A.H. Heidema 2002. Overstroming en vegetatie: Literatuurstudie over de effecten van overstroming op voedselrijkdom en zuurgraad. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 335. 66 blz. 5 fig.; 2 tab.; 1 foto; 115 ref.
- Sovon, 2018. Vogelatlas van Nederland. Broedvogels, winter vogels en 40 jaar verandering. Kosmos Uitgevers, Utrecht/Antwerpen.
- Sparrius, L.B, G.G. van den Top & C.A.M van Swaay, 2018. An approach to calculate a species temperature index for flora based on open data. Gorteria 40: 073-078.

- Spitzen, A., 2019. De chytrideschimmel *Batrachochytrium dendrobatidis* in Nederland. Een overzicht van tien jaar onderzoek. RAVON 75: 64-68.
- Staatsbosbeheer, 2016. De natuur heeft de tijd. Eenmalig magazine bij feestelijke afronding Amerongse Bovenpolder.
- Stichting het Utrechts Landschap, 2011. Beheerplan 2011-2021; Amerongse Bovenpolder en Amerongse Bos.
- Stichting het Utrechts Landschap, 2019. Kwaliteitstoets Amerongse Bovenpolder Oost.
- Studinski, J.M., K.J. Hartman & J.M. Niles, 2012. The effects of riparian forest disturbance on stream temperature, sedimentation, and morphology. *Hydrobiologia* 686, 107–117.
- Termaat, T., A.J. van Strien, R.H.A. van Grunsven, G. De Knijf, U. Bjelke, K. Burbach, K.J. Conze, P. Goffart, D. Hepper, V.J. Kalkman, G. Motte, M.D. Prins, F. Prunier, D. Sparrow, G.G. van den Top, C. Vanappelghem, M.I. Winterholler & M.F. Wallis De Vries, 2019. Distribution trends of European dragonflies under climate change. *Divers Distrib.* 2019; 25: 936– 950. <https://doi.org/10.1111/ddi.12913>
- Tolkamp, H. & D. Drukker, 2020. Wintersteenvliegen door zacht weer nu ook echt in de winter. *Natuurberichten Nature Today*, beschikbaar op: <https://www.naturetoday.com/intl/nl/nature-reports/message/?msg=25828>
- Utrechts Landschap, 2019, Natuurkwaliteitstoets Amerongse Bovenpolder, Concept 09-12-2019.
- Van Boekel W., R. Blaauw, J. de Bruin, R. Oosterhuis & B. Zoer, 2017. Natuurgebied de Onlanden, vijf jaar na de vloed. *De Levende Natuur* 118: 6-13.
- Van der Sluis, T., B. Pedroli, I. Woltjer, E. van Elburg & G. Maas, 2020. *Uitwerking PAGW Natuuropgave Hotspots Grote Rivieren; Eindrapport*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3031. 134 blz.; 38 fig.; 46 tab.; 61 ref.
- Van de Haterd, R.J.W, R.G.A. Fraaije & H.A. van der Jagt, 2020. Klimaatverandering en waterkwaliteit bij waterschap Hollandse Delta – een bureaustudie naar de effecten in het beheersgebied. Rapportnr. 20-256. Bureau Waardenburg, Culemborg.
- Van der Aa, N.G.F.M., 2009. Antenne Drinkwater 2008. Informatie en ontwikkelingen, RIVM, Bilthoven.
- Van Deursen, W., A. van Winden, & W. Braakhekke, 2013. Mogelijkheden voor bergen? Bergen van mogelijkheden! Rapport Bureau Strooming.
- Van Dobben, H., R. Bobbink, D. Bal & A. van Hinsberg, 2012. Overzicht van kritische depositiewaarden voor stikstof, toegepast op habitattypen en leefgebieden van Natura 2000. *Alterra rapport 2397*, WUR, Wageningen.
- Van Doornik, W., J. Den Daas, M. Pfaff-Wagenaar, M., M. Dorenbosch, W.M. Liefveld & B. Grutters, 2019. Stuwbeheer Nederrijn – Lek. Optimalisatiestudie vanuit de KRW-functie.
- Van Eck, W.H., H.M. van de Steeg, C.W. Blom & H. de Kroon, 2004. Is tolerance to summer flooding correlated with distribution patterns in river floodplains? A comparative study of 20 terrestrial grassland species. *Oikos* 107: 393-405.
- Van Geest, G., 2005. Macrophyte succession in floodplain lakes: spatio-temporal patterns in relation to river hydrology, lake morphology and management. Thesis
- Van Geest, G., W. Altena & O. de Keizer, 2019. Natuureffectmodule voor de grote rivieren. Eerste analyse van de effecten van lage afvoeren op natuur in Maas, Waal, Neder-Rijn/Lek en IJssel. Rapport 11203734-010 Deltares/Rijkswaterstaat, Lelystad.
- Van Geest, G., 2020. Rivieren en klimaat – PAGW. Effecten van lage rivierpeilen op vochttoestand van uiterwaarden langs de Rijn en Maas – 2e herziene versie. Deltares rapport: 11203733-005-ZWS-0002.
- Van Grunsven, R.H.A., W.H. van der Putten, T.M. Bezemer, W.L.M. Tamis, F. Berendse & E.M. Veenendaal, 2007. Reduced plant–soil feedback of plant species expanding their range as compared to natives. *Journal of Ecology* 95(5): 1050-1057.
- Van Grunsven, R.H.A., W.H. van der Putten, T.M. Bezemer, F. Berendse & E.M. Veenendaal, 2009. Plant–soil interactions in the expansion and native range of a poleward shifting plant species. *Global change biology* 16(1): 380-385.
- Van Iersel, W., 2020. A bird's-eye view on river floodplains. Mapping and monitoring land cover with remote sensing. PhD thesis, Utrecht Studies in Earth Sciences, Utrecht University.

- Van Kessel, N., M. Dorenbosch, J. Kranenbarg, G. van der Velde & R.S.E.W. Leuven, 2016. Invasive Ponto-Caspian gobies rapidly reduce the abundance of protected native bullhead. *Aquatic Invasions* 11: 179-188.
- Van Kleunen A., H. Sierdsema & C. Kampichler, 2021. Herstelplan leefgebied Porseleinhoen en Watersnip in Natura 2000-gebied Rijntakken. Sovon-rapport in voorbereiding.
- Van Swaay, C., C. van Turnhout, L. Sparrius, L., R. van Grunsven, J. van Deijk, A. van Strien & S. Doornbos, 2018. Hoe onze flora en fauna veranderen door klimaatverandering. *De Levende Natuur* 119: 256-259.
- Van Swaay, C.A.M., G.I. Bos-Groenendijk, R. Van Grunsven, J.R. Van Deijk, A. Stip, H.H. De Vries, J.M. Kok, K. Huskens, K. Veling, J. Van 't Bosch & M.J.M. Poot, 2021. Vlinders, libellen en hommels geteld. Jaarverslag 2020. Rapport VS2021.002, De Vlinderstichting, Wageningen.
- Van Vliet, M. & G. Zwolsman, 2007. Klimaatverandering en waterkwaliteit van de Maas. *H2O* (9) 29-33.
- Van Vliet, M.T.H., W.H.P. Franssen, I.R. Yearsley, F. Ludwig, I. Haddeland, D.P. Lettenmaier & P. Kabat, 2013a. Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change* 23: 450-464.
- Van Vliet, M.T.H., F. Ludwig & P. Kabat, 2013b. Global streamflow and thermal habitats of freshwater fishes under climate change. *Climatic Change* 121: 739-754.
- Van Wezel, A.P., F. van den Hurk, R.M.A. Sjerps, E.M. Meijers & E.W.M. Roex, 2018. Impact of industrial wastewater treatment plants on Dutch surface waters and drinking water sources. KWR 2018.006.
- Van Winden, A., W. Overmars & W. Braakhekke, 2003. Natuurlijke waterberging in de middelgebergten in het stroomgebied van Maas en Rijn. Bergen bij de bron. Minder wateroverlast bij hoog water Meer water in droge tijden.
- Van Looy, K., W.M. Liefveld, G. Kurstjens & J. Hugtenburg, 2019. Ruimte voor de grote rivieren en ecologische herstelprogramma's. Hoe staat het er twintig jaar later voor? *Landschap* 2019/2 pp. 79-87.
- Velthuis, M., 2018. Elements of carbon cycling. Primary producers in aquatic systems under global change. PhD thesis. Utrecht University, Utrecht.
- Verberk, W. C., Siepel, H., & Esselink, H., 2008. Life-history strategies in freshwater macroinvertebrates. *Freshwater Biology*, 53: 1722-1738.
- Verbrugge, L.N.H., A.M. Schipper, M.A.J. Huijbregts, G. Van der Velde & R.S.E.W. Leuven, 2012. Sensitivity of native and non-native mollusc species to changing river water temperature and salinity. *Biological Invasions* 14: 1187-1199.
- Verdonschot, R., B. Brugmans, I. Barten & M. Scheepens, 2017. De relatie tussen beschaduwning en de groei van waterplanten in twee beken in Noord-Brabant. *H2O-Online* 28 augustus 2017.
- Verstijnen, Y., F. Smolders, P. Westendorp, L. de Senerpont Domis, S. Teurlincx, W. Lekkerkerk, G. van Geest, M. Groen, M. Dorenbosch, T. Kroon & P. van Els, 2022. Diepe uiterwaardplassen: verondiepen of niet? Visie vanuit ecologisch perspectief. Rapportnummer 2022/OBN252-RI, VBNE, Driebergen.
- Verzandvoort, S. & P. Kuikman, 2009. Klimaatverandering, klimaatadaptatie en bodem: maakbaarheid, planvorming en realiteitsdenken. ISBN: 978-94-90070-11-3
- Von Bülow, B & A. Kupfer, 2019. Monitoring population dynamics and survival of Northern Crested Newts (*Triturus cristatus*) for 19 years at a pond in Central Europe. *Salamandra* 55: 97 -102.
- Vriese, F.T., J. Hop, B. Reeze, M. de la Haye, N. van Kessel, M. Claus & A. van Winden, 2021. Stromend habitat en connectiviteit in de Maas. Rapport nr: 20200920/rap01.
- Visser, M.E., M. Lindner, P. Gienapp, M.C. Long & S. Jenouvrier, 2021. Recent natural variability in global warming weakened phenological mismatch and selection on seasonal timing in great tits (*Parus major*). *Proceedings of the Royal Society B*, (288) 1963.
- Wallis de Vries, M., 2016. Vlinders en klimaatverandering. *Vlinders* 1: 4-7.
- Wolf, R.J.A.M., A.H.F. Stortelder & R.W. de Waal, 2014. Ooibossen. KNNV-uitgeverij, Utrecht.

- Wolff, E. & M.T.H. van Vliet, 2021. Impact of the 2018 drought on pharmaceutical concentrations and general water quality of the Rhine and Meuse rivers. *Science of the Total Environment* 778: 146182.
- Wolters, H., 2002. Onderzoek Ecologie Rivierengebied – Hydrologie. Werkdocument RIZA-Rijkswaterstaat.
- Wolters, H.A., G.J. van den Born, E. Dammers, S. Reinhard, 2018, Deltascenario's voor de 21e eeuw, actualisering 2017, Deltares, Utrecht.
- Woodland trust, 2016. Keeping Rivers Cool: A Guidance Manual. Creating riparian shade for climate change adaptation.
- Ylla Arbós, C., A. Blom, E. Viparelli, M. Reneerkens, R.M. Frings & R.M.J. Schielen, 2021. River response to anthropogenic modification: Channel steepening and gravel front fading in an incising river. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091338.
<https://doi.org/10.1029/2020GL091338>

Websites:

<https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2021/30/steeds-meer-sprinkhanen-in-nederland>

<https://www.climatechangepost.com/news/2021/10/3/intense-rainstorms-are-moving-more-slowly-causing>

<https://www.clo.nl/indicatoren/nl0566-temperatuur-oppervlaktewater>

<https://www.waterpeilen.nl/berichten/hogwaterbericht-rijn-en-maas-4>

<https://dijkenvoorbiodiversiteit.flowsproductions.nl/>

<https://www.klimaatbuffers.nl/>

<https://www.h2owaternetwerk.nl/h2o-actueel/in-zuid-limburg-meer-natuurlijke-ruimte-voor-water-nodig>

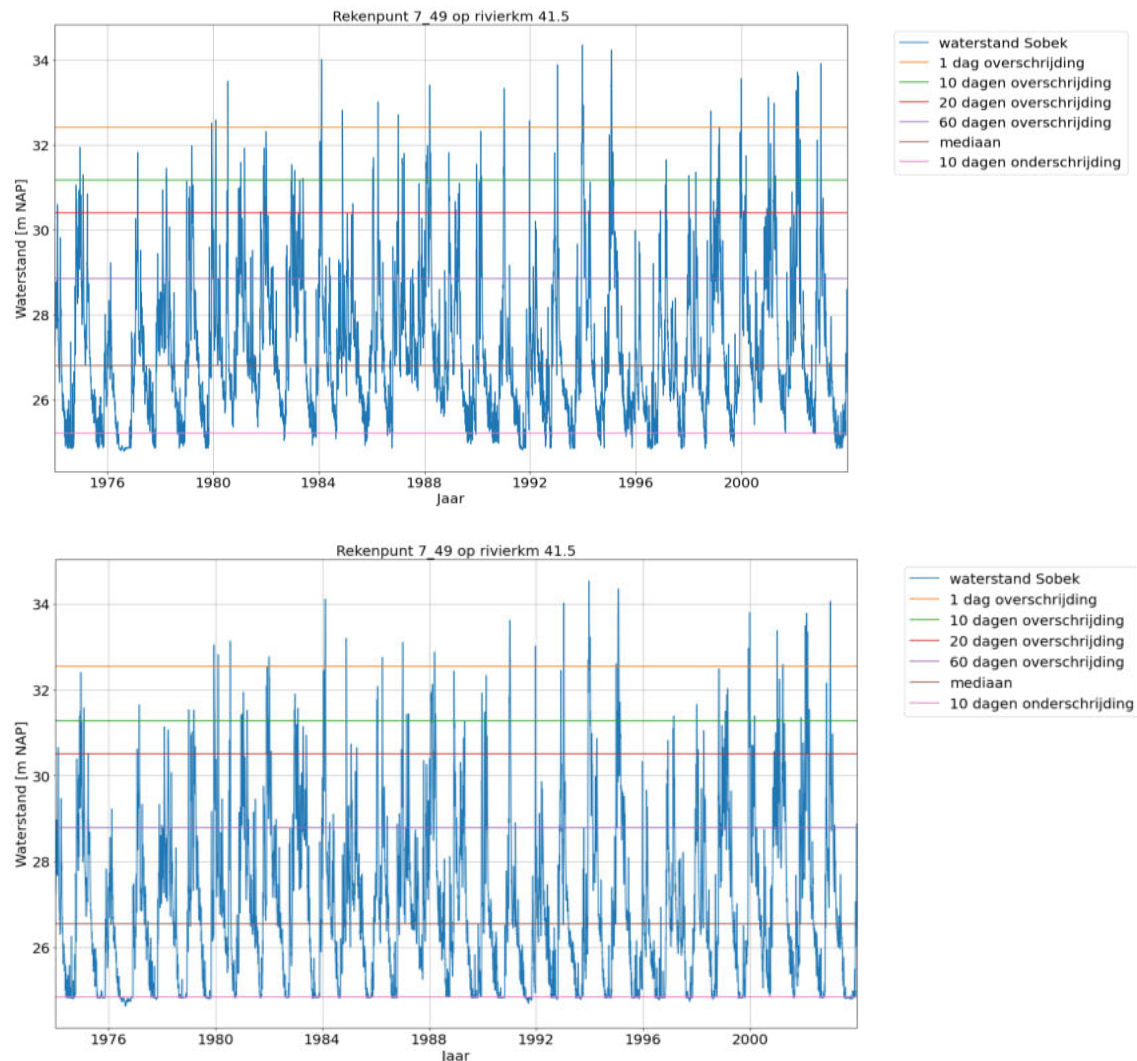
<https://www.klimaat-effectatlas.nl/nl/droogtegevoeligheid-natuur/>

<https://klimaatadaptatienederland.nl/thema-sector/natuur/>

<https://iplo.nl/thema/water/beheer-watersysteem/droogte-verdroging/>

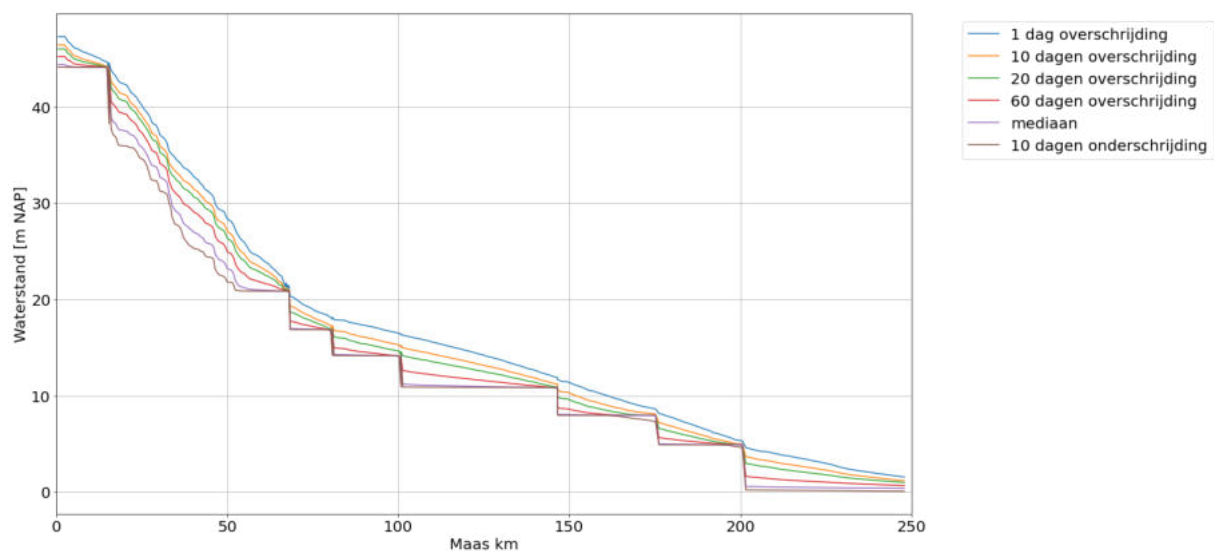
Bijlage 1: Voorbeeld uitwerking gebruikte overschrijdingsklassen en waterstandsprofielen

Onderstaande figuur laat zien hoe deze zes waarden zijn bepaald voor een locatie in de Maas (bij rivier-km 41,5) voor de referentiesituatie en voor klimaatscenario WHDry. Deze analyse is uitgevoerd voor alle locaties op de rivier-as van de Rijntakken en de Maas.



SOBEK-tijdreeksen van 30-jaar voor de referentiesituatie (boven) en voor klimaatscenario WHDry (onder).

SOBEK-time series over 30 years in the reference situation (above) and the climate scenario WH dry (below).



Waterstandsprofielen op de Maas voor de referentiesituatie.

Water level profiles for the river Meuse in the reference situation.

Bijlage 2: Effect van bodemdaling

Voor de bodemveranderingen zijn we uitgegaan van 'scenario A' uit de QS Bodem (Witteveen en Bos en HKV, 2020). Dit is het scenario van de totale bodemverandering van 2020 tot 2050 (30 jaar) waarbij niet actief wordt ingegrepen op de rivierbodemonwikkelingen. Deze bodemverandering werkt direct door op de laagwater- en mediane waterstanden, omdat al het water zich dan in de hoofdgeul van de rivier bevindt. Bij hoogwater gaat een belangrijk deel van de stroming door de uiterwaarden en is voor het effect van rivierbodemonverandering op waterstanden een correctie nodig.

Wij gebruiken voor deze correctie een vuistregelmethode gebaseerd op de methodiek zoals toegepast in de QS Bodem:

1. Voor de hoogwaters van 60 dagen/jaar, 20 dagen/jaar, 10 dagen/jaar en 1 dag/jaar bepalen wij representatieve afvoeren (zie Tabel I.1).
2. Vervolgens bepalen wij bij de representatieve afvoeren het effect van de bodemverandering op de waterstanden. Per riviertraject nemen wij hiervoor als uitgangspunt een representatief dwarsprofiel, zie het voorbeeld voor de Midden-Waal in Figuur I-1. Voor het representatieve dwarsprofiel berekenen wij de relatie tussen afvoer en waterstanden (de "QH-relatie").
3. Tot slot bepalen wij gebruikmakend van de QH-relaties het effect van bodemveranderingen op de waterstanden bij de vier representatieve afvoeren. Deze resultaten staan in *Tabel I.2*.

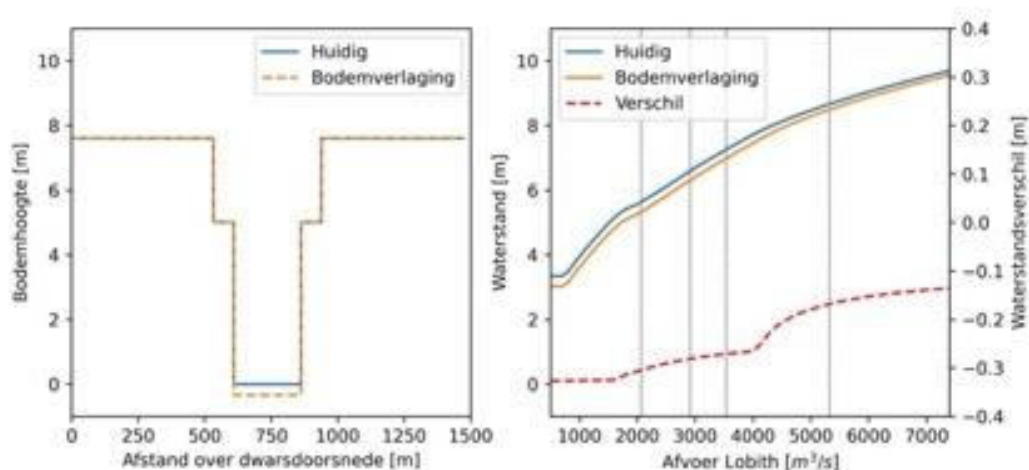
In de vuistregel-methode gelden de volgende aannames:

- We gaan uit van een evenwichtsdiepte in het dwarsprofiel;
- De afvoerfrequentie voor de Maas is bepaald op basis van afvoer bij Megen;
- De afvoerverdeling in de Rijntakken is op basis van Reeze *et al.* (2017);
- De Boven-Merwede heeft dezelfde geometrie als de Beneden-Waal;
- De geometrie van de Sallandse IJssel is geïnterpoleerd tussen Midden- en Beneden-IJssel;
- Geometrie van Midden- en Beneden-Nederrijn zijn hetzelfde.

Tabel I.1: Representatieve afvoerniveau's per rivier (in m³/s) bij de beschouwde hoogwaterstanden.

Table I.1: Representative discharge categories per river (in m³/s) in reviewed peak water levels.

Hoogwater	Bovenrijn	Pan. kanaal	Waal	IJssel	Nedrijn -Lek	Maas
1 d/jr	7996	2671	5326	1143	1527	1433
10 d/jr	5266	1731	3535	743	988	1003
20 d/jr	4347	1431	2916	611	820	834
60 d/jr	3024	960	2064	423	536	513



Figuur I.1: Links: Representatief dwarsprofiel voor de Midden-Waal met en zonder 33 cm bodemverlaging. Rechts: waterstand als functie van de afvoer met en zonder bodemverlaging. De vier verticale gestippelde lijnen markeren de afvoercondities bij hoogwaters van 60, 20, 10 en 1 dag/jaar.

Figure I.1: Left: Representative cross-section of the river Midden Waal with and without 33 cm subsidence of the riverbed. Right: water level as a function of the discharge with and without subsidence of the riverbed. The four vertical dotted lines mark the discharge conditions at peak highwaters of 60, 20, 10 and 1 day/year.

De effecten van bodemveranderingen op de waterstanden bij de vier representatieve afvoeren van de verschillende riviertrajecten zijn weergegeven in Tabel I.2.

Tabel I.2: Overzicht van het effect van bodemveranderingen op waterstanden in verschillende riviertrajecten. De 'impact bij LW' (laagwater) is afkomstig uit de QS Bodem (Gegevens uit IRM Quickscan Bodem en K. Sloff "Feiten op een rij QS Bodem"). De waarden in de rechter vier kolommen zijn bepaald met de vuistregelmethode uit Figuur I/1. De rode getallen zijn niet meegenomen in het effect op de waterstanden omdat die trajecten gestuwd zijn of omdat daar het zeeniveau de waterstanden bepaald.

Table I.2: Overview of the effect of riverbed changes on the waterlevels of the river stretches in the river Meuse and Rhine. The 'impact bij LW' (impact by low water) comes from QS bottom (data from 'IRM Quickscan Bodem' and K. Sloff 'Feiten op een rij QS Bodem'). The values in the righthand four columns are derived from figure I.1. The red coloured numbers are not accounted for in the effect on water levels, because these river stretches are impounded or the water levels are under the influence of the sea level of the Northsea.

Traject	Rivier km	Impact bij LW (cm)	dh [cm] bij 60 d/jr	dh [cm] bij 20 d/jr	dh [cm] bij 10 d/jr	dh [cm] bij 1 d/jr
Bovenmaas	2,5-15,4	0	0	0	0	0
Grensmaas	15,4-56	-60	-59	-59	-59	-58
Plassenmaas	56-87	-24	-23	-23	-20	-3
Peelhorstmaas	87-121	-21	-20	-20	-20	-20
Venloslenk	121-165,9	-18	-18	-17	-17	-8
Benedenmaas	165,9-200,8	-9	-9	-9	-9	-2
Getijdenmaas	200,8-227	15	15	15	15	14
Boven-Rijn	857,7 – 867,5	0	0	0	0	0
Boven-Waal/Waalbochten	867,5 – 887,0	-57	-55	-43	-32	-24

Midden-Waal	887,0 – 917,5	-33	-28	-22	-17	-13
Beneden-Waal	917,5 – 953,0	3	3	3	2	2
Boven-Merwede	953,0 – 962,5	3	3	3	2	2
Pan. Kanaal	867,5 – 878,5	-33	-32	-30	-23	-12
Boven-IJssel	878,5 – 911,5	-12	-12	-11	-8	-4
Midden-IJssel	911,5 – 945,0	-12	-12	-11	-11	-4
Sallandse IJssel	945,0 – 980,7	-9	-9	-9	-9	-4
Beneden-IJssel	980,7 – 1005,0	0	0	0	0	0
Boven NR	878,5 – 891,5	-3	-3	-2	-1	-1
Midden NR	891,5 – 922,3	9	9	9	8	4
Beneden NR	922,3 – 946,9	9	9	9	8	4
Lek	946,9 – 971,4	9	9	9	9	9

In Figuur 3.5 met de waterstandprofielen voor de referentiesituatie voor de Maas is ook te zien dat de aanwezigheid van stuwen ervoor zorgt dat op sommige riviertrajecten de laagwater- en mediane waterstanden vastliggen. In die gevallen spelen bodemveranderingen geen rol. Op de Maas is alleen de Grensmaas bij lage waterstanden *niet* gestuwd en daar heeft de bodemverandering dus bij alle waterstanden een effect. Op de overige trajecten op de Maas werken de bodemeffecten alleen door in de vier hoogwater-profielen van 60, 20, 10 en 1 dag/jaar. De Getijdenmaas en de Lek zijn ook niet gestuwd maar bij mediane en lage afvoeren is daar het zeeniveau bepalend voor de waterstanden. Dus ook hier werken bodemveranderingen alleen door bij hoogwater-situaties. De Rijntakken zijn alleen gestuwd in de Nederrijn. Bij laagwater en bij de mediane waterstand hebben daar de bodemveranderingen dus geen effect. Verder is in de Getijdenmaas en op de Lek bij mediane en lage afvoeren het zeeniveau bepalend voor de waterstanden. Dus ook hier werken bodemveranderingen alleen door bij hoogwater-situaties. Op alle overige riviertrajecten in de Rijntakken werken de bodemeffecten door bij alle waterstanden.

Bijlage 3a: Vragen enquête en interviews

Enquêtes:

Welkom bij onze enquête 'Klimaat effecten in het rivierengebied'

Beste lezer(es),

In opdracht van BIJ12 voeren wij (Bureau Waardenburg in samenwerking HKV, RAVON (kernteam), SOVON, FLORON, Deltares, KWR en de Radboud Universiteit) de OBN studie 'Klimaat effecten in het rivierengebied' uit. De hoofdvragen in dit onderzoek zijn:

1. Wat zijn de te verwachten effecten van klimaatverandering op kenmerkende riviernatuur langs Maas en Rijn?
2. Welke beheer- en inrichtingsmaatregelen zijn het meest kansrijk voor het behouden en versterken van kenmerkende (mogelijk nieuwe) riviernatuur in een veranderd klimaat?

In deze studie heeft het beheerdersperspectief een centrale rol. Naast het ontsluiten van kennis uit recente Nederlandse en internationale onderzoeken willen we deze kennis toepasbaar maken in concrete instrumenten voor rivier- en terreinbeheerders. Daarvoor willen we weten welke praktische klimaat gerelateerde problemen nu al in het veld zichtbaar zijn. Ook willen we graag weten welke ervaringen er zijn met mitigerende maatregelen. Door klimaatverandering komen de doelen voor sommige soorten of habitats mogelijk onder druk te staan. Daarom willen we ook weten wat jullie visie is om hiermee om te gaan: meebewegen of mitigerende maatregelen nemen?

Daarom willen we je via deze enquête bevragen over wat de ervaringen in het veld nu al zijn en ook wat de beste manier is om de kennis te ontsluiten. We gebruiken de antwoorden om onze studie zo goed mogelijk te laten aansluiten bij de beheerpraktijk. Naast beheerders raadplegen we ook mensen die veel in het rivierengebied werken.

Het invullen van de enquête neemt ongeveer 15 minuten in beslag en de uiterlijke invuldatum is vrijdag 14 mei. Wij hopen dat je hieraan mee wilt werken, en willen je alvast bedanken voor het invullen.

Vriendelijke groeten,

Michelle de la Haye (Bureau Waardenburg)
Martijn Dorenbosch (RAVON)
Freek Huthoff (HKV lijn in water)

Vragen Enquête:

Klimaat effecten in het rivierengebied

Vraag 1. Wat is je naam? (niet verplicht)

Vraag 2. In welke regio werk je? Landelijk, ZN, NN, ON, MN, ZD, WNN, WZN

Vraag 3. Wat is je functie?/ Welk type werk doe je?

Vraag 4. Hoe lang ben je werkzaam in deze functie?

Vraag 5. In welk(e) gebied(en) voer je deze werkzaamheden uit? En hoe lang voer je daar al werkzaamheden uit?

Vraag 6. Ben je al tegen klimaat gerelateerde problemen aangelopen in gebieden die je beheert? Ja/Nee

Vraag 7. Om welke gebieden gaat het?

Gebied 1	Gebied 2	Gebied 3	Gebied 4	Gebied 5	Gebied 6
----------	----------	----------	----------	----------	----------

Vraag 8. Wat zijn de problemen waar je tegen aan gelopen bent per gebied?

Gebied 1	Gebied 2	Gebied 3	Gebied 4	Gebied 5	Gebied 6
----------	----------	----------	----------	----------	----------

Vraag 9. Welke maatregelen zijn er genomen per gebied?

Gebied 1	Gebied 2	Gebied 3	Gebied 4	Gebied 5	Gebied 6
----------	----------	----------	----------	----------	----------

Vraag 10. Zijn die maatregelen gemonitord en wat waren de resultaten?

Gebied 1	Gebied 2	Gebied 3	Gebied 4	Gebied 5	Gebied 6
----------	----------	----------	----------	----------	----------

Vraag 11. Welke van de maatregelen waren succesvol?

Gebied 1	Gebied 2	Gebied 3	Gebied 4	Gebied 5	Gebied 6
----------	----------	----------	----------	----------	----------

Vraag 12. Waarom denk je dat ze succesvol waren?

Gebied 1	Gebied 2	Gebied 3	Gebied 4	Gebied 5	Gebied 6
----------	----------	----------	----------	----------	----------

Vraag 13. Welke van de maatregelen waren niet succesvol?

Gebied 1	Gebied 2	Gebied 3	Gebied 4	Gebied 5	Gebied 6
----------	----------	----------	----------	----------	----------

Vraag 14. Waarom denk je dat ze niet succesvol waren?

Gebied 1	Gebied 2	Gebied 3	Gebied 4	Gebied 5	Gebied 6
----------	----------	----------	----------	----------	----------

Vraag 15. Wat zou een alternatief zijn voor de genomen maatregelen?

Gebied 1	Gebied 2	Gebied 3	Gebied 4	Gebied 5	Gebied 6
----------	----------	----------	----------	----------	----------

Vraag 16. Zijn er rapporten/ is er data beschikbaar hierover?

Gebied 1	Gebied 2	Gebied 3	Gebied 4	Gebied 5	Gebied 6
----------	----------	----------	----------	----------	----------

Vraag 17. Zijn die rapporten/ is die data openbaar en kun je die met ons delen?

Gebied 1	Gebied 2	Gebied 3	Gebied 4	Gebied 5	Gebied 6
----------	----------	----------	----------	----------	----------

Vraag 18. Wat is je visie op de volgende stelling?: "Effecten van klimaatveranderingen zijn te mitigeren en de huidige streefbeelden voor soorten en habitats kunnen met het juiste beheer behaald worden." Ja/Nee/Weet ik niet/ geen mening

Vraag 19. Licht je keuze bij vraag 18 toe.

Vraag 20. Wat is je visie op de volgende stelling?: "De effecten van klimaatverandering zijn zo ingrijpend dat we onze streefbeelden moeten bijstellen." Ja/Nee/Weet ik niet/ geen mening

Vraag 21. Licht je keuze bij vraag 20 toe.

Vraag 22. Welke doelen staan het meest onder druk? Liefst specifiek maken voor gebieden en kort toelichten.

Vraag 23. Vink aan welke producten je denkt te lezen of te gebruiken in de dagelijkse praktijk.

Product	Doelgroep	Bruikbaarheid	Leestijd
Achtergrond-rapportage	Beleidsmakers (PAGW), beheerders die de details willen weten, collega-onderzoekers.	Transparante en navolgbare onderbouwing van werkwijze en resultaten met literatuurverwijzingen, conclusies en aanbevelingen. Bouwsteen voor vervolgonderzoek.	3 uur
Risicokaart online	Terrein- en waterbeheerders & beleidsmakers rivierengebied	Online ontsluiting van de risico-kaarten waarin de gevoeligheid van gebieden en habitats voor de verschillende effecten van klimaatverandering zijn aangegeven.	15 min
Digitale beslisboom (interactieve PDF)	Terrein- en waterbeheerders rivierengebied	Geeft heel gericht inzicht in de keuzemogelijkheden voor beheerders om klimaatproblematiek aan te pakken in hun betreffende gebied.	15 min
Nieuwsbericht in NatureToday + interactieve Infographic	Brede doelgroep Nederlandse natuurprofessionals en geïnteresseerden	Beknopt in beeld brengen van de resultaten van het onderzoek. Link naar achterliggende informatie.	1 min
Korte video	Beheerders, overige betrokkenen beheer en inrichting rivierengebied, breder publiek met interesse rivierengebied	Laagdrempelig in beeld brengen van de problematiek, knelpunten en kansen, met beelden uit de praktijk en beheerders aan het woord. Bewustwording kweken en nieuwsgierigheid prikkelen om de rest van de informatie te bekijken.	2 min
Artikel vakblad	Terrein- en waterbeheerders & beleidsmakers Nederland, (klimaat)onderzoekers	Compleet maar beknopt overzicht van werkwijze en resultaten met literatuurverwijzingen, conclusies en aanbevelingen. Peer reviewed.	30 min

Vraag 24. Waarom denk je de genoemde producten wel/ niet te lezen of gebruiken?

Achtergrondrapport:

Risicokaart online:

Digitale beslisboom (interactieve PDF):

Nieuwsbericht in NatureToday:

Korte video:

Artikel vakblad:

Vraag 25. Heb je suggesties voor andere producten?

Vraag 26. Mogen we je benaderen voor een interview naar aanleiding van de enquête?

Ja/Nee

Vraag 27. Graag ontvangen we onderstaande gegevens zodat we een afspraak kunnen maken voor een interview. Graag hieronder invullen.

Naam:	Bedrijf:	Adres:	Plaats:
Postcode:	E-mailadres:	Telefoonnummer:	

Vraag 28. Overige opmerkingen

Interviews:

De interviews zijn we begonnen met het geven van een korte inleiding met uitleg over het doel van de studie en een weergave van de eerste resultaten. Daarna zijn we het interview begonnen waarbij we de onderstaande vragen als leidraad gebruikt, rekening houdend met de organisatie waarvoor iemand werkte of de gegeven antwoorden op eerdere vragen. Dit betekent dat niet iedereen alle vragen beantwoord heeft.

Veld ervaringen

1. Welke effecten zie je in jullie gebieden die te maken hebben met klimaatverandering?
2. Welke effecten worden geaccepteerd en waar probeer je iets tegen te doen?
3. Zie(n) je/jullie ook positieve effecten?
4. Welke rivierhabitats komen het meest in de knel?
5. Welke habitats hebben voordeel?
6. Wat kun je doen met beheer en inrichting?

Oplossingen (deze vragen weglaten als er geen problemen zijn)

1. Welke maatregelen hebben jullie al met succes genomen?
2. Op welke effecten van klimaatverandering waren deze maatregelen gericht?
3. Waarom was de maatregel wel/niet succesvol?
4. Heb je er info over die we kunnen gebruiken?

Toekomst

1. Als we vasthouden aan streefbeelden, hoe zien jullie dat voor je?
2. Als we niet vasthouden aan streefbeelden, hoe zien jullie dat voor je?
3. Welke maatregelen zouden nog meer kansrijk kunnen zijn?
4. Op welke manier wordt er met klimaatverandering omgegaan binnen jullie organisatie? Bestaat er bijvoorbeeld een club mensen die zich hierover buigt? Hoe wordt dat teruggekoppeld naar jullie?

Producten

1. Aan welk soort product uit deze studie zou(den) jullie/je het meeste behoefte hebben? Wat zou je gebruiken?

Bijlage 3b: Uitwerking enquête

Deelnemers voor de enquête zijn gezocht onder beheerders, beleidsmakers en ecologen werkzaam bij de volgende organisaties: Staatsbosbeheer, Rijkswaterstaat, Ark natuurontwikkeling, Natuurmonumenten, Stichting het Zuid-Hollands Landschap, Stichting het Limburgs Landschap, Stichting het Utrechts Landschap, Deltares, Advies Bureaus en Sportvisserij Nederland. De namen hiervoor zijn aangeleverd door het OBN DT Rivierenlandschap. De enquête was bedoeld als extra voorbereiding op de interviews, zodat de juiste vragen gesteld zouden worden en de juiste personen geïnterviewd zouden worden. Ook wilden we hiermee de eindproducten beter afstemmen op hun behoeften.

In totaal is de enquête aan 34 beheerders gestuurd. Hiervan hebben er 19 gereageerd (56%). Niet alle respondenten hebben alle vragen beantwoord, zodat de respons op de meeste vragen meestal lager dan 19 is.

De enquête kan beschouwd worden als anekdotische informatie vanuit de beheerpraktijk. Samen met de interviews geven de enquêtes inzicht in wat er leeft onder deze groep beheerders met betrekking tot klimaateffecten langs rivieren, waar ze tegen aan lopen en mogelijke oplossingen die ze zien. NB: de enquête is afgenomen vóór de zomerinundaties van 2021. Hierdoor was met dit specifieke klimaateffect op dat moment nog weinig ervaring bij deze groep rivierbeheerders.

De acht interviews zijn gehouden met mensen afkomstig uit de volgende organisaties: Staatsbosbeheer, Rijkswaterstaat, Stichting Ark, Natuurmonumenten, Stichting het Limburgs Landschap, Adviesbureau en Sportvisserij Nederland. De informatie uit de interviews was bedoeld om kennis uit de beheerpraktijk, die mogelijk nog niet gedocumenteerd is te verzamelen en de producten beter af te stemmen op de behoefte van de beheerders. Overkoepelend doel van de studie is immers om beheerders, plannenmakers en beleidsmakers instrumenten en kennisonderbouwing mee te geven voor het opstellen van beheerplannen, inrichtingsprojecten en beleidsprogramma's.

Klimaateffecten in beheerde terreinen

De respons op de vraag of beheerders al met klimaateffecten te maken hebben gehad in de door hun beheerde gebieden en welke maatregelen ze daartegen genomen is opgenomen in tabel II.1. Dit betekent niet dat dit beproefde, bewezen maatregelen zijn, want de meeste zijn nog onvoldoende gemonitord om daar uitspraken over te doen.

Tabel II.1: Beheerders respons op de vraag met welke klimaateffecten zij al tegengekomen zijn in hun gebieden en de maatregelen die ze daartegen genomen hebben.

Table II.1: Nature managers response on the question which effect of climate change they have encountered in the areas they manage and what measures they took to mitigate these effects.

klimateffecten	Gebieden	Maatregelen
Droogte (watertekort)	Langs de gehele zuidelijke Maas/ Maasuitwaarden tussen Waalwijk en Ravenstein/Geuldal	Geen/geen/in het Geuldal zijn bomen en struiken geplant voor beschaduwing, herstel hellingbossen en helling-akkers, verwijdering drainages uit weilanden tegen snelle afvoer water. Waterberging bij een bronbeek (5000 m ²).
Lage afvoer (wegvallen stroming)	Grensmaas	geen
Opwarming (hoge watertemperatuur)	Grote rivieren/ uiterwaardplassen/geulen	geen/geen/geen
Compartimentering	Stromende wateren (geulen)	geen
Waterkwaliteit en vissterfte	Maasuitwaarden tussen Waalwijk en Ravenstein	Publiek waarschuwen voor blauwalgen en dode vis afvoeren
Verrijking algemeen	Moerputten & Bossche Broek (moerassig gebied met veel sloten en kwelwater (grondwater dat aan de oppervlakte komt)	Waterhuishouding op orde brengen, peilverhoging buffergebied en water langer vasthouden; extra (vroeg) maaien
Verrijking stroomdalgrasland en glanshaverhooilanden	Oeffeltermoent	bebandings- en ombankplekken bekalken; proefplekken harken en bekalken; potentieel Glanshaverhooiland extra K-gift (2x per jaar) en vroeg maaien
Extreme buien zomer en lente	Gulpdal	Struiken en bomen geplant op de hellingflanken, drainages verwijderd, laagtes gegraven en bronbeek verondiept, helling grasland aangekocht om te ontwikkelen tot structuurrijk/struweel grasland.
Langdurige en vroegtijdige droogval	Uiterwaarden Gelderse Poort/Uiterwaarden Waal ten westen van Nijmegen/Rijnstrangen	Water vasthouden Oude Waal/ geen/geen
Exoten toename	hoofdstroom rijntakken	geen
Frequenter hoogwater: toename zwerfafval	Zoetwatergetijden IJsselmonde	Opruimen, hoge beheerkosten
Frequenter hoogwater: versnelde erosie en afkalving oevers	Zoetwatergetijden IJsselmonde	Oever/dijkherstel hogere kosten beheer

Verder werd opgemerkt dat het kappen van laaggelegen bos voor hoogwaterbescherming langs de zuidelijk Maas en Grensmaas averechts werkt tegen de verdrogingsproblematiek.

Stellingen m.b.t. het al dan behalen/aanpassen natuurstreefbeelden

We hebben de beheerders twee stellingen voorgelegd en hun mening hierover, de respons is hieronder per stelling weergegeven:

1. *Effecten van klimaatveranderingen zijn te mitigeren en de huidige streefbeelden voor soorten en habitats kunnen met het juiste beheer behaald worden.*

Van de 13 respondenten op deze vraag zijn drie het eens met de eerste stelling, negen oneens en één heeft geen mening. Degenen die het eens zijn met deze stelling geven wel aan dat het niet gemakkelijk zal zijn en dat grootscheepse ingrepen nodig zijn en het wel eens veel geld kan gaan kosten. Eén is van mening dat: 'om de effecten van klimaatverandering op te vangen je robuuste, spontane natuur nodig hebt waarbinnen soorten zich kunnen her-rangschikken, verspreiden en migreren'. Het is hiervoor belangrijk om grond aan te kopen, ook in de regionale watersystemen, en natuurgebieden op met elkaar verbinden, en veel natuurlijker te beheren. Hiermee en met de waterhuishouding herstellen kan men veel problemen tegelijk oplossen: erosieproblemen, watertekort, droogteschade, wateroverlast en kwijnende natuur.

Uit de toelichting van degenen die het oneens zijn met deze stelling komen de volgende zaken naar voren:

- Watertekort is zo'n groot internationaal probleem. Als er eenmaal te weinig water is, kun je daar nog weinig mee;
- Als men vasthoudt aan de bestaande streefbeelden en natuurdoeltypen moet erg tegen de natuur beheerd worden. 'Dat kost enorm veel geld en levert niet veel op';
- Slechts heel lokaal zijn klimaateffecten te mitigeren, de toename van exoten door de toenemende water- en luchttemperatuur is slechts deels te mitigeren door een natuurlijkere inrichting;
- Effecten van meer en langere periodes in de zomer met erg lage Maasafvoeren en grondwaterstanden hebben effect op de nog aan te leggen KRW-maatregelen met name de minimaal aan te houden waterdiepte en refugia; dus rekening houden met bodemhoogtes om droogval te voorkomen;
- Natuur, zeker in het rivierengebied is niet eenvoudig stuurbaar. Waterstanden zijn daarin toch behoorlijk bepalend. Deze zouden leidend mogen zijn in de typen ecosystemen en bijpassende soorten die in het gebied gaan voorkomen;
- Als de klimaatverandering in het huidige tempo doorgaat, is dit een onmogelijke opgave, los van dat er zeker soorten en habitats gaan verdwijnen.
- Natte moerassen langs dynamische rivieren krijgen het moeilijker. Dit is slechts deels een klimaateffect. Insnijding rivierbodem is veel belangrijker.

2. *De effecten van klimaatverandering zijn zo ingrijpend dat we onze streefbeelden moeten bijstellen.*

Van de 12 respondenten zijn 8 het eens met de stelling en 4 zijn het oneens. Degenen die het oneens zijn met deze stelling geven aan dat een robuust natuurlijk systeem klimaateffecten wel kan opvangen, de ooibossen staan onder druk, dit komt niet rechtstreeks door klimaat, maar door de HWB-maatregelen van RWS, nog te vroeg om streefbeelden bij te stellen en voor de uiterwaarden langs de gestuwde riviertrajecten op dit moment nog niet, als overstromingen etc. heftiger worden dan zul je andere vegetatietypen krijgen, dan wel doelen bijstellen.

Uit de toelichting van degenen die het eens zijn met deze stelling komen de volgende zaken naar voren:

- Streefbeeld moet je durven los te laten. De natuur moet je veel ruimte geven, en de natuurlijke processen hun werk laten doen, dat draagt bij aan veerkrachtige natuur;
- Bijstellen is wel de gemakkelijkste uitweg, eigenlijk te gemakkelijk;
- Overall de streefbeelden halen is niet mogelijk, maar door te zoneren en de meest kansrijke locaties op orde te houden en deze met elkaar te verbinden behoud en

ontwikkel je een ecologische structuur die nodig is en zorgt voor het behalen van de doelen;

- Klimaatzones schuiven op, dus het is zeker de vraag of relatief koudwatersoorten als kwabaal (en zalm) realistisch blijven als streefbeeld;
- Vooral voldoende waterdiepte in nieuw te realiseren geulen aanleggen tegen droogval;
- Streefbeelden zijn vaak nogal statisch. Natuur is dat niet. Het is daarom altijd verstandig om streefbeelden regelmatig tegen het licht te houden, ook hier;
- De klimaateffecten blijken veel groter dan gedacht en vinden in de tijd sneller plaats. Met name in de hydrologie (kweldruk en kwaliteit) en verrijking vanuit de bodem en de lucht zijn niet meer in de originele staat te herstellen;

Voorkeur voor kennisontsluiting van dit onderzoek

We hebben beheerders gevraagd welke producten ze denken te lezen of in hun dagelijkse praktijk te gebruiken.

Een artikel in een vaktijdschrift scoorde het hoogste, op de tweede plaats een achtergrondrapportage, als derde een nieuwsbericht op bijvoorbeeld Nature Today, als vierde risicokaart online en op een gedeelde vijfde plaats een digitale beslisboom (interactieve pdf) en korte video.

Uit de toelichting van de respondenten komen de volgende zaken naar voren, de positieve vooraan en de meer kritische achteraan:

- Artikel vakblad: informatief, kort en binnen handbereik met diepgang, kennisverbreding/op de hoogte blijven, korte samenvatting achtergrondrapportage en praktijkgericht, wordt vaker gelezen in organisatie, korter dan achtergrondrapportage en uitgebreider/informatiever dan Nature Today, te veel info en vaak geen tijd voor;
- Achtergrondrapportage: onderbouwing hoe tot bepaalde inzichten is gekomen, complete kennis, diepgang, kennisverbreding/op de hoogte blijven, te veel informatie en vaak geen tijd voor;
- Nieuwsbericht Nature Today: leuk en makkelijk, snel informatie vergaren, praktijkgericht, kan reden zijn om achtergrondrapportage te lezen, voor de actualiteit en te specialistisch;
- Risicokaart online: Kan handig zijn, maar meer passend bij een artikel in een vakblad met de duiding erbij, afstemming van eigen beheer, wel twijfels over mogelijkheid ruimtelijke differentiatie tussen gebieden, scheiding gebieden met risico's en snel overzicht;
- Digitale beslisboom: wat meer toegankelijke kennis; ook om anderen op te wijzen, kan handig zijn, wijst op mogelijke keuzes, is voor beleidsmakers en niet nodig;
- Korte video: makkelijk, illustratief, snel inzicht, praktijkvoorbeelden spreken vaak meer aan, vaak te algemeen van aard en vluchtig blijft niet hangen.

Conclusies en bevindingen op basis van de enquêtes

- Extra onderwerpen die voor beheerders relevant zijn: zwerfvuil, erosie van Natura 2000-gebieden;
- Water vasthouden in de brongebieden;
- Artikel vakblad + rapportage belangrijkste producten – ter bespreking of selectie nodig is.

Bijlage 4: Invloed WHdry scenario op vogels

Belangrijkste veranderingen verdroging-vernatting	
IJssel	Vernatting boven Zwolle, waaronder, Scherenwelle en Vreugderijkenwaard, vooral verdroging <u>tussen</u> Zwolle en Arnhem buiten natuurgebieden, maar wel <u>Duursche Waarden</u>
Gelderse Poort	Veel verdroging in noordelijk deel
Neder-Rijn - Lek	Veel verdroging, o.a. Uiterwaarden Wageningen, deel Blauwe Kamer, <u>Amerongse Bovenpolder</u> , <u>vernatting</u> Steenwaard verdroging delen <u>Everdingse Waard</u>
Waal	Veel verdroging ook in de natuurgebieden daar, alleen <u>Munnikkenland vernat</u>
Maas, Zuidelijk <u>Maasdal</u>	Vooraf verdroging ook in natuurgebieden waaronder Geulle aan de Maas
Roermond-Biesbosch	Weinig verandering tussen Roermond en Oss, veel vernatting ten westen van Oss, <u>vooral</u> buiten natuurgebieden, wel bij Heerenwaarden

Groep:	Effect van verdroging	Aanwijsoort N2000 Rijntakken (broed)	Verwachte effecten van de inundatieveranderingen per deelgebied										Populatie trends (data SOVON):			
			IJssel	Gelderse Poort	Neder-Rijn - Lek	Waal	Maas		Roermond-Biesbosch	Trend Rijntakken 1999-2019	Trend Maas 2008-2019	Aantal paren 2019				
							Zuidelijk	Maasdal					Rijntakken 1999-2019	Maas 2008-2019		
ganzen, eenden, zwanen	negatief		0	-	-	-	-	+								
akkervogels	positief		0	+	+	+	+	+								
weidevogels	negatief		0	-	-	-	-	+								
moerasvogels	negatief		0	-	-	-	-	+								
moerasruigtevogels	positief		0	+	+	+	+	+								
struweel vogels	positief		0	+	+	+	+	+								
bosvogels nat oolbos	negatief		0	-	-	-	-	+								
bosvogels droog oolbos	positief		0	+	+	+	+	-								
Soorten:																
Aalscholver	negatief	x	0	-	-	-	-	-		++	++				88	
Baardman	negatief		-	-	-	-	-	+		+	+				0	
Blauwborst	negatief	x	+	-	-	-	-	+		0	0				11	
Blauwe Reiger	negatief		+	-	-	-	-	+		+	+				1	
Bruine Kiekendief	negatief		-	-	-	-	-	+		0	0		0		0	
Buidelmees	onbekend		-	-	-	-	-	0		0	0		0		300*	
Cetti's Zanger	positief		0	+	+	+	+	0		~	~		~		0	
Dodaars	negatief	x	+	-	-	-	-	+		~	~		~		800*	
Grote Karekiet	negatief	x	0	-	-	-	-	-		-	-		-		2	
IJsvogel	negatief		-	-	-	-	-	+		+	+		+		4	
Kleine Plevier	negatief		+	-	-	-	-	+		-	-		-		0	
Kluut	negatief		-	-	-	-	-	+		-	-		-		0	
Kwartelkoning	negatief	x	+	-	-	-	-	+		-	-		-		3	
Lepelaar	negatief			-	-	-	-	+		~	~		~		1	
Oeverzwaluw	negatief	x	0	-	-	-	-	+		++	++		+		7	
Ooievaar	negatief		0	-	-	-	-	+		+	+		+		9**	
Paapje	negatief							+		~	~		~		0	
Pontische Meeuw	negatief							+		~	~		~		2	
Porseleinhoen	negatief	x	0	-	-	-	-	+		~	~		~		50	
Purperreiger	negatief							+		~	~		~		81	
Roerdomp	negatief							+		~	~		~		19	
Watersnip	negatief	x	0	-	-	-	-	+		+	+		+		80*	
Woudaapje	negatief	x	+	0	-	-	-	+		~	~		~		75*	
Zwarte Stern	negatief	x	+	-	-	-	-	+		~	~		~		0	
															1	
															0	

ontwikkeling+beheer natuurkwaliteit

o+bn

Het Kennisnetwerk Ontwikkeling Beheer Natuurkwaliteit:

- is een onafhankelijk en innovatief platform waarin beheer, beleid en wetenschap op het gebied van natuurherstel en -beheer samenwerken;
- ontwikkelt en verspreidt kennis met als doel het structureel herstel en beheer van natuurkwaliteit.

**Kennisnetwerk OBN wordt gecoördineerd door de VBNE en gefinancierd door
het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en BIJ12**

Vereniging van bos- en natuurterreineigenaren (VBNE)

Princenhof Park 7
3972 NG Driebergen
0343-745250
info@vbne.nl

Alle publicaties en
producten van het
OBN Kennisnetwerk
zijn te vinden op
www.natuurkennis.nl