

Herijking klimaatrisico's - Waterkwaliteit



Herijking klimaatrisico's - Waterkwaliteit

Auteur(s)

Sam Boerlijst

Martha Dellar

Herijking klimaatrisico's - Waterkwaliteit

Opdrachtgever	Planbureau voor de Leefomgeving
Contactpersoon	Jelle van Minnen
Trefwoorden	Ecologie, Klimaatadaptatie, klimaatverandering, klimaatrisico's, Natuur

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	24-03-2026
Projectnummer	11212760-004
Document ID	11212760-004-ZWS-0001
Pagina's	99
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)		
	Sam Boerlijst Martha Dellar	

Samenvatting

Onze natuur staat zwaar onder druk door allerlei oorzaken, waarvan veel direct te maken hebben met hoe wij mensen leven en werken. Denk aan chemische-, maar ook licht- en geluidvervuiling, of aan verstoring van leefgebieden door onze manier van bouwen, varen, landbouw voeren en het gebruik van water. Door deze verschillende drukfactoren, en vooral hun onderlinge wisselwerking, nemen de risico's voor waternatuur door klimaatverandering naar verwachting verder toe, vooral als we niet tijdig en op systeemniveau ingrijpen.

Deze druk vermindert de veerkracht van leefgebieden. Die veerkracht hangt samen met vier belangrijke basisvoorwaarden:

1. connectiviteit (hoe goed gebieden met elkaar verbonden zijn),
 2. diversiteit (variatie in soorten en leefomstandigheden),
 3. dynamiek (natuurlijke veranderingen, zoals zoutgradiënten, stroming of getijden), en
 4. waterkwaliteit (de samenstelling van het water in termen van chemische- en voedingsstoffen).
- Door klimaatverandering ontstaan verschillende bedreigingen: opwarming, meer natte periodes, droogte en stijgende zeespiegel (inclusief extremere weersomstandigheden).

Deze bedreigingen veroorzaken verschillende risico's voor de waterkwaliteit, zoals toename van de watertemperatuur met daaraan gekoppelde algenbloei en lage zuurstofconcentraties; verdrogingseffecten en daaruit volgende droogval, veranderende stroomsnelheden, langere verblijftijden in de zomer en hogere kans op stratificatie in de meren en tenslotte de toenemende invloed van zoutindringing in zoete systemen.

Door deze veranderingen ontstaan er secundaire risico's door verschuivingen in seizoenspatronen en veranderingen in de waterbalans. Zo verandert de verspreiding van soorten, treden er mismatches in prooi-predatorrelaties op en kunnen uitheemse soorten (exoten) meer ruimte krijgen. Deze veranderingen hebben gevolgen voor de biodiversiteit en de samenstelling van planten- en diergemeenschappen in onze wateren.

Dit document vat de impacts van de meest relevante klimaatdrukfactoren voor waterkwaliteit samen. Deze zijn vervolgens overwogen door prognoses uit de KNMI '23 scenario's, DP'18 en waar mogelijk DP'24 te vergelijken met toleranties en voorkeuren voor KRW-doelsoorten. Hiermee zijn twee adaptatiestrategieën binnen twee contextscenario's overwogen, om zo inzicht te geven in handelingsperspectief.

De belangrijkste bevindingen van dit rapport zijn:

- Klimaatdruk neemt in alle scenario's toe.
- Keuzes binnen andere domeinen in bijvoorbeeld connectiviteit en dynamiek hebben grootschalige impact op waterkwaliteit. Omgekeerd kan waterkwaliteit bijdragen aan weerbaarheid tegen wateroverlast. Een gezonder ecosysteem kan bijvoorbeeld meer water vasthouden en vertraagt de afvoer.
- Technische maatregelen beperken lokale effecten, maar structurele veerkracht vraagt om ruimtelijke transformatie.

De belangrijkste aanbevelingen zijn:

- Combineer korte-termijn technische ingrepen met lange-termijn ruimtelijke strategieën.
- Transformatieve maatregelen bieden de grootste kans op duurzaam behoud van ecologische gemeenschappen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Achtergrond en context	9
1.2	Doel en aanpak	9
1.3	Scope	12
1.4	Leeswijzer	13
2	Duiding van waterkwaliteitsrisico's in Nederland: typen risico's en risico indicatoren	14
2.1	Druk op de aquatische natuur	14
2.2	Verschillende drukfactoren en karakteristieken	15
2.3	Risico-indicatoren	15
2.4	Informatiebronnen	16
2.5	Link met sectoren:	16
2.6	Adaptatiemaatregelen	16
2.6.1	Interacties tussen maatregelen	16
2.6.2	Het belang van een systeembenadering	17
2.6.3	Maatregelen gericht op bescherming tegen temperatuur toename	17
2.6.4	Maatregelen gericht op verdroging van (stilstaande) wateren	18
2.6.5	Maatregelen gericht op verblijftijd van stromende wateren	18
2.6.6	Maatregelen gericht op verzilting	19
3	Risico's voor waterkwaliteit in de huidige situatie	20
3.1	Gevaar	20
3.1.1	Temperatuur	20
3.1.1.1	Waargenomen klimaatgebeurtenissen	20
3.1.1.2	Extreme situaties	21
3.1.1.3	Trends watertemperatuur	22
3.1.1.4	Trends zuurstofconcentratie	22
3.1.1.5	Trends algen en productie	24
3.1.1.6	Blootstelling	24
3.1.1.7	Gevoeligheid	24
3.1.2	Droogte	24
3.1.2.1	Waargenomen klimaatgebeurtenissen	26
3.1.2.2	Extreme situaties	31
3.1.2.3	Blootstelling	31
3.1.2.4	Gevoeligheid	32
3.1.2.5	Impact	34
3.2	Gevolgen	34
3.2.1	Temperatuur	35
3.2.2	Kwetsbare groepen en hun plek in het ecosysteem	37
3.2.2.1	Temperatuur	37
3.2.2.2	Verdroging	40

3.2.2.3	Overige parameters	46
3.2.2.4	Verziltting	46
3.2.2.5	Interacties	49
3.3	Conclusies en aanbevelingen	51
3.3.1	Conclusie	51
3.3.2	Kennisleemtes en discussie	52
4	Risico's waterkwaliteit	54
4.1	Introductie	54
4.2	Klimaatdreiging:	56
4.2.1	Temperatuur	56
4.2.1.1	Klimaatdreiging(en) contextscenario 'beperkt risicoverhogend'	58
4.2.1.2	Klimaatdreiging(en) contextscenario 'sterk risicoverhogend'	58
4.2.2	Debiet	59
4.2.2.1	Klimaatdreiging(en) contextscenario 'beperkt risicoverhogend'	61
4.2.2.2	Klimaatdreiging(en) contextscenario 'sterk risicoverhogend'	61
4.2.3	Droogval	61
4.2.3.1	Klimaatdreiging(en) contextscenario 'beperkt risicoverhogend'	63
4.2.3.2	Klimaatdreiging(en) contextscenario 'sterk risicoverhogend'	63
4.3	Secundaire effecten	64
4.3.1	Secundaire effecten contextscenario 'beperkt risicoverhogend'	64
4.3.2	Secundaire effecten contextscenario 'sterk risicoverhogend'	64
4.4	Adaptatiemaatregelen	64
4.4.1	Adaptatiemaatregelen adaptatiescenario 'Intensiveren'	64
4.4.2	Adaptatiemaatregelen adaptatiescenario 'Transformeren'	65
4.5	Blootstelling	66
4.5.1	Blootstelling bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'	67
4.5.1.1	Nationaal	67
4.5.1.2	Noord-Nederland	67
4.5.1.3	Hoge Zandgronden Oost en Zuid	67
4.5.1.4	Rivierengebied	67
4.5.1.5	West-Nederland	68
4.5.1.6	Zuidwestelijke Delta	68
4.5.2	Blootstelling bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'	68
4.5.2.1	Nationaal	68
4.5.2.2	Noord-Nederland	68
4.5.2.3	Hoge Zandgronden Oost en Zuid	69
4.5.2.4	Rivierengebied	69
4.5.2.5	West-Nederland	69
4.5.2.6	Zuidwestelijke Delta	69
4.5.3	Blootstelling bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'	69
4.5.3.1	Nationaal	69
4.5.3.2	Noord-Nederland	70
4.5.3.3	Hoge Zandgronden Oost en Zuid	70
4.5.3.4	Rivierengebied	70
4.5.3.5	West-Nederland	71
4.5.3.6	Zuidwestelijke Delta	71

4.5.4	Blootstelling bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'	71
4.5.4.1	Nationaal	71
4.5.4.2	Noord-Nederland	72
4.5.4.3	Hoge Zandgronden Oost en Zuid	72
4.5.4.4	Rivierengebied	72
4.5.4.5	West-Nederland	72
4.5.4.6	Zuidwestelijke Delta	72
4.6	Gevoeligheid:	72
4.6.1	Gevoeligheid bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'	73
4.6.2	Gevoeligheid bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'	73
4.6.3	Gevoeligheid bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'	73
4.6.4	Gevoeligheid bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'	73
4.7	Impact	73
4.7.1	Impact bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'	74
4.7.2	Impact bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'	74
4.7.3	Impact bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'	74
4.7.4	Impact bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'	74
4.8	Eind impact mens en cultuur	74
4.8.1	Eind impact mens en cultuur bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'	75
4.8.2	Eind impact mens en cultuur bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'	76
4.8.3	Eind impact mens en cultuur bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'	76
4.8.4	Eind impact mens en cultuur bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'	77
4.9	Eind impact natuur en milieu	77
4.9.1	Eind impact natuur en milieu bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'	77
4.9.2	Eind impact natuur en milieu bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'	77
4.9.3	Eind impact natuur en milieu bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'	78
4.9.4	Eind impact natuur en milieu bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'	78
4.10	Eind impact economie	78
4.11	Waarschijnlijkheid	78
4.12	Kwaliteitswaarborging	78
4.12.1	Transparantie, aggregatie en afbakening	78
4.12.2	Kennishiaten	78
4.12.3	Onzekerheid en betrouwbaarheid	79
4.12.4	Expertbeoordeling	79
Referenties		80

5	Appendices	86
5.1	Appendix A Aanvullende functionele eigenschappen macrofyten	86
5.2	Appendix B Gemiddelde zomertemperatuur oppervlaktewater Rijkswateren	87
5.3	Appendix C Gemiddelde zomertemperatuur oppervlaktewater Regionale wateren	89
5.4	Appendix D Gemiddeld zomer debiet oppervlaktewater Rijkswateren	93
5.5	Appendix E Gemiddeld zomer debiet oppervlaktewater Regionale wateren	95

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en context

In Nederland is continu aandacht nodig voor waterkwaliteit. Door klimaatverandering, landgebruik en watermanagement voor bijvoorbeeld bevaarbaarheid zullen naar verwachting de klimaatrisico's voor de aquatische natuur toenemen, zeker wanneer er geen adaptatiestrategieën worden ingezet. Om geïnformeerde keuzes te kunnen maken en om toekomstige spijt te minimaliseren, is het cruciaal om inzicht te hebben in huidige en toekomstige risico's voor waterkwaliteit. Ook inzicht in effecten van maatregelen en keuzes op dit risico is hierbij belangrijk.

Naast risico's voor waterkwaliteit zijn er ook andere klimaatrisico's die mogelijk veranderen en liggen er vragen van specifieke sectoren zoals mobiliteit, energie, drinkwater, land- en tuinbouw, en industrie over het effect van klimaatrisico's en adaptatiestrategieën op de kwaliteit van de aquatische natuur.

In 2020 besloot het Directeuren Overleg Nationale Klimaatadaptatiestrategie (DO-NAS) om een beleidsondersteunend kennisprogramma voor het nationale klimaatadaptatiebeleid in het leven te roepen. Dit traject bestaat uit een aantal stappen. De 1e stap richt zich op het beschrijven en verkennen van de huidige respectievelijk, toekomstige klimaatrisico's in Nederland. De tweede stap betreft het monitoren en evalueren van het adaptatiebeleid. De derde stap levert ten slotte een lange termijn ontwerp voor een effectief monitoring- en evaluatiesysteem voor de periode na 2026.

Dit project gaat over het tweede deel van stap 1: het verkennen van toekomstige klimaatrisico's (het eerste deel van stap 1 werd eind 2023/begin 2024 afgerond). Deze verkenning wordt in 2024 en 2025 uitgevoerd en wordt eind 2025/begin 2026 gepubliceerd. De invulling van de klimaatrisico's op/voor de verschillende thema's/sectoren wordt ingebracht door verschillende partners. Deze rapportage betreft de invulling voor het thema waterkwaliteit. Hoewel de interactie met de klimaatrisico's uit andere domeinen geen expliciet onderdeel is van deze rapportage, worden de raakvlakken met zoetwaterbeschikbaarheid voor natuur, zoals bij peilverandering, kort belicht.

1.2 Doel en aanpak

Doel

Doel van deze studie is het geven van inzicht van de klimaatrisico's voor de aquatische natuur in Nederland in de toekomst, en het in beeld brengen van eventuele kennisvragen daarbij als onderdeel van het verkennen van huidige en toekomstige klimaatrisico's in Nederland.

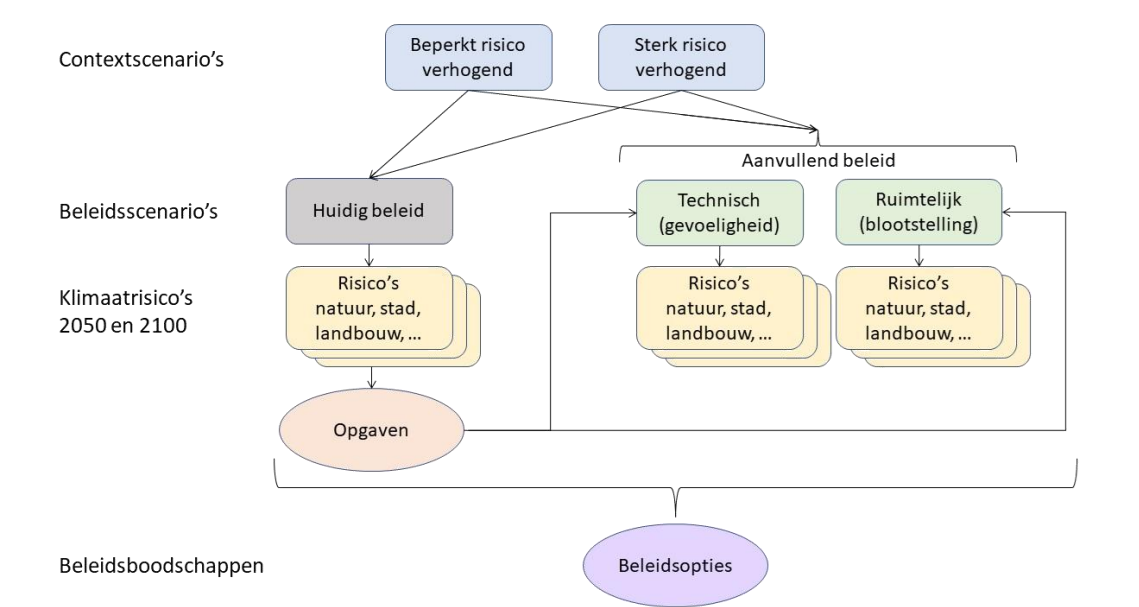
Aanpak

Om te komen tot inzicht in de huidige en toekomstige risico's voor waterkwaliteit zijn de volgende vragen geadresseerd:

1. Welke typen klimaatrisico's voor de aquatische natuur zijn er en met welke indicatoren kunnen deze gerepresenteerd worden?
2. Hoe kunnen effecten van de contextscenario's en adaptatiestrategieën op risico's voor de aquatische natuur bepaald worden?
3. Welk beleid en welke maatregelen passen in de voorgestelde adaptatiestrategieën?
4. Wat zijn effecten van de context- en beleidsstrategieën voor de jaren 2050 en 2100?

Om de eerste twee vragen te beantwoorden zijn de verschillende typen klimaateffecten op de aquatische natuur beschreven in hoofdstuk 2 en daarbij zijn ook risico-indicatoren benoemd. Ook worden hier databronnen met betrekking tot deze indicatoren besproken en wordt op hoofdlijnen aangegeven hoe en met welke gegevens effecten van strategieën kunnen worden bepaald. Vervolgens wordt het huidige risico beschreven gebruikmakend van de risico-indicatoren.

Vraag 3 en 4 worden geadresseerd door de consequenties van drie beleidsscenario's¹ en twee contextscenario's² te beschrijven voor de aquatische natuur en de bijbehorende klimaatrisico's in beeld te brengen (zie figuur 1.1 en tabel 1.1). De risico's worden bekeken voor het zichtjaar 2050 en voor 2100.



Figuur 1.1 Schematische weergave van aanpak binnen het project 'Monitoring klimaatadaptatie' (Bron: Rijken, 2024)

Tabel 1.1: De bekeken contextscenario's en beleidsscenario's

		Contextscenario's ²	
		Beperkt risicoverhogend	Sterk risicoverhogend
		Gunstige maatschappelijke ontwikkelingen en beperkte klimaatverandering	Grote economische groei en snelle klimaatverandering
Beleids-scenario's ¹	Business as usual	Voortzetting huidig beleid	
	Transformeren	Sterk ruimtelijk gerichte strategie, water en bodem in hoge mate sturend, aansluiting bij lopende transitie	
	Intensiveren	Verder gaan met huidig landgebruik. Strategie met meer technische maatregelen voor aanpak van klimaatverandering en beperkte ruimtelijke consequentie	

¹ Een beleidsscenario beschrijft een strategie met daarin keuzes met betrekking tot ontwikkelingen die veranderd kunnen worden door beleidsmakers en overheden wanneer deze zich richten op het beperken van klimaatrisico's.
² Een contextscenario beschrijft een autonoom verloop met ontwikkelingen die buiten de invloedssfeer liggen van de beleidsmakers en overheden. De hierin beschreven ontwikkelingen zijn niet gericht op het beperken van klimaatrisico's.

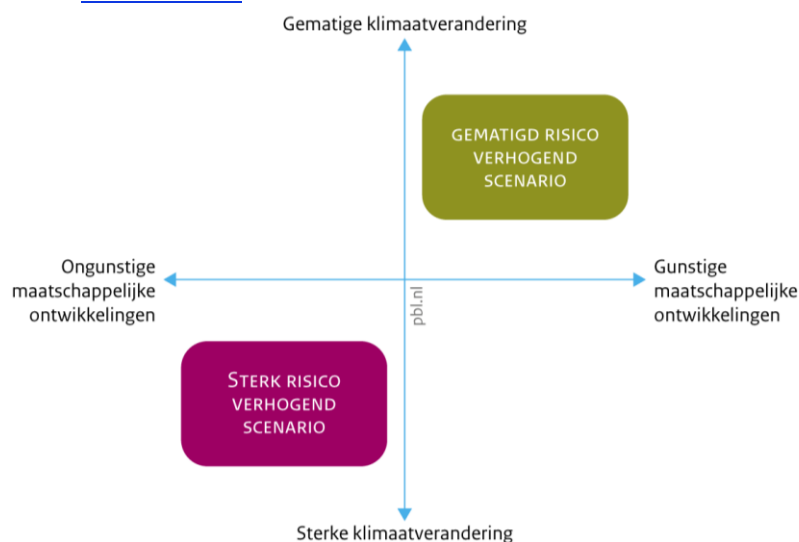
Contextscenario's

De twee contextscenario's geven een bandbreedte van mogelijke ontwikkelingen zowel qua klimaat als socio-economie. Deze contextscenario's zijn gebaseerd op:

- De nieuwe KNMI-klimaatscenario's (oktober 2023);
- De nieuwe WLO-scenario's (in de loop van 2024) met ontwikkelingen over o.a. demografie, economie, ruimtegebruik (WLO = Welvaart en leefomgeving, zie <https://www.wlo2015.nl/> voor de eerdere WLO-scenario's uit 2015);
- De Deltascenario's 2018, geüpdatet met KNMI-klimaatscenario's, voor een doorvertaling van de KNMI-klimaatscenario's naar o.a. secundaire klimaateffecten op het watersysteem
- Voor zover mogelijk: de nieuwe Deltascenario's (voorjaar 2024).

Van de deltasenario's zijn de twee uitersten gekozen: het gematigd (Ruim) en respectievelijk, sterk (Stoom) risico verhogende scenario (zie Figuur 2.6.1.1). Voor deze scenario's zijn de risico's in beeld gebracht voor het zichtjaar 2050 en 2100.

De gegevens met betrekking tot deze scenario's zijn afkomstig van het KNMI en de Deltascenario's (Deltares, 2024). Voor maatschappelijke, ruimtelijke en demografische ontwikkelingen zijn geen kwantitatieve gegevens opgenomen voor 2100, wel voor 2050. Daarom is in deze analyse voor 2100 gebruik gemaakt van de KNMI'23 scenario's voor klimaatverandering, en voor de andere ontwikkelingen is een trend aangenomen zoals beschreven in [hoofdstuk 3.2](#).



Bron: PBL

Figuur 2.6.1.1 De twee contextscenario's die samen de bandbreedte opspannen qua klimaatrisico.

Beleidsscenario's

Om de beleidsruimte van klimaatadaptatie te kunnen verkennen worden drie beleidsscenario's bekeken:

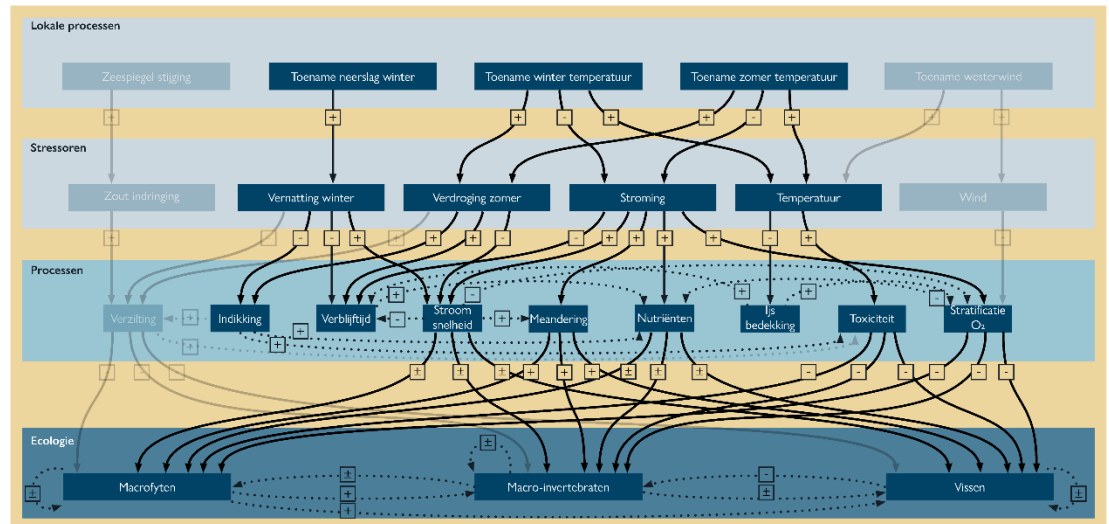
- *Business as usual*: Deze dient als een soort referentie welke de noodzaak voor strategieën voor klimaatadaptatie aangeeft. In deze strategie wordt het huidige beleid voortgezet.
- *Transformeren*: sterke nadruk op een meer systemisch aanpak met ruimtelijke veranderingen, met meer belang voor het zoeken naar synergie en afstemming tussen sectoren in ruimte en tijd.
- *Intensiveren*: nadruk op de huidige ruimtelijke strategie, activiteiten en omstandigheden met focus op technologische innovaties daar waar dit economisch rendabel is.

Risico-parameters

Voor de beleids- en contextscenario's wordt het effect op de ecologie (zie Figuur 2.6.1.2) bepaald op de verschillende aspecten die bijdragen aan het risico, namelijk:

- Klimaatdreiging of hier: gevaar voor de kwaliteit van de aquatische natuur;
- Blootstelling en kwetsbaarheid, hier: samengenomen als potentiële gevolgen van het functioneren van de aquatische natuur.

Ook wordt het gecombineerde effect op de risico's voor aquatische natuur beschreven. De indicatoren die hierbij gebruikt worden, zijn beschreven in hoofdstuk 2.



Figuur 2.6.1.2 Gebruikte lijn bij het analyseren van de effecten van drivers uit de contextscenario's op toekomstige risico's voor de aquatische natuur: bepalen van effecten, en gevolgen (als functie van blootstelling en kwetsbaarheid) op drie ecologische hoofdgroepen (Bron: KAKATOE).

Gebruik van bestaande kennis en aansluiting bij andere trajecten

Er wordt bij deze risicobeschrijving zoveel mogelijk gebruik gemaakt van bestaande kennis en aangesloten bij andere projecten of documenten. De resultaten worden gedeeld met de projectpartners die zich richten op een bepaalde sector die deze mogelijk als startpunt kunnen gebruiken voor hun meer diepgaande analyse voor die sector waarin zij meerdere klimaatrisico's beschouwen (bijvoorbeeld terrestrische natuur).

Resultaat

Uit de risicoanalyse volgen niet alleen conclusies met betrekking tot de klimaatrisico's en veranderingen daarin voor verschillende scenario's maar ook conclusies met betrekking tot kennisleemtes en aanbevelingen. Deze zijn beschreven in hoofdstuk 6.

1.3 Scope

Dit rapport bevat de kwalitatieve beschrijving van de verschillende drukfactoren, de huidige status en hoe dit doorwerkt op de ecologie en daarmee waterkwaliteit. Ook wordt voor iedere drukfactor op basis van relatieve toleranties beschreven welke functionele groepen bijzonder gevoelig zijn en wat dit betekent voor het ecologisch functioneren onder toenemende druk. Binnen de drukfactor temperatuur wordt kort verkend in welke mate de contextscenario's de verschillende doelsoorten beïnvloeden voor de Rijn, Maas en Waal. Deze verkenning is voor temperatuur en verdroging vervolgens ruimtelijk uitgewerkt voor de verschillende hoofdwaterregio's. Door te beoordelen onder welke functionele groepen de doelsoorten vallen die binnen de verschillende

scenario's onder druk staan, wordt een brug geslagen via verwachte impact naar de beleidsscenario's.

1.4 Leeswijzer

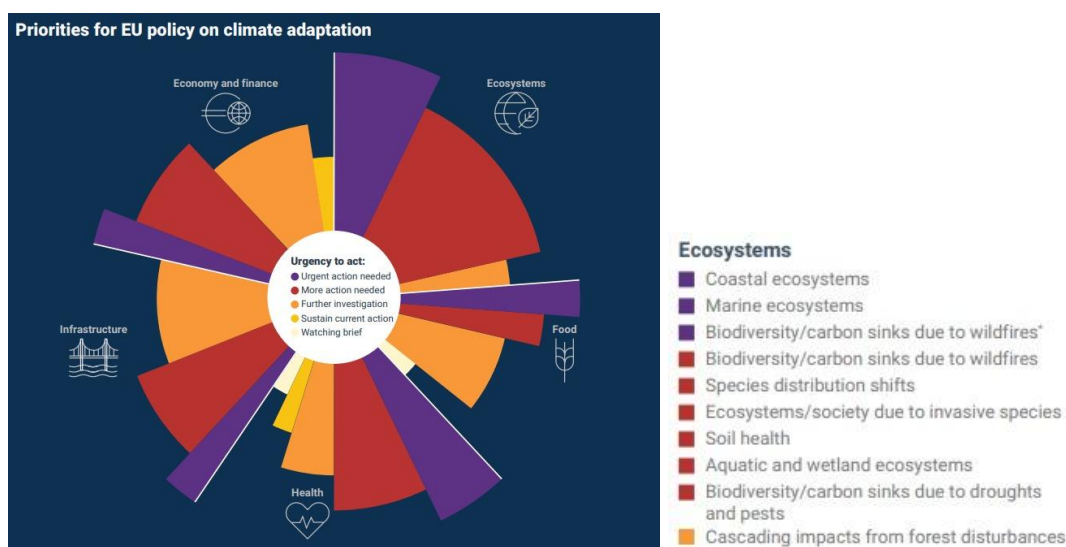
In hoofdstuk 2 wordt eerst een overzicht gegeven de verschillende typen effecten op waterkwaliteit en de indicatoren waarmee het risico geduid kan worden. In hoofdstuk 3 wordt het risico voor de huidige situatie toegelicht. In hoofdstuk 4 wordt de invulling voor de strategie "business as usual" voor waterkwaliteit gespecificeerd en vervolgens worden de effecten van deze strategie voor de twee toekomstscenario's besproken. Hieruit worden conclusies getrokken. In hoofdstuk 5 en 6 wordt hetzelfde gedaan voor de twee beleidsstrategieën en tenslotte worden in hoofdstuk 7 conclusies en aanbevelingen gegeven.

2 Duiding van waterkwaliteitsrisico's in Nederland: typen risico's en risico indicatoren

2.1 Druk op de aquatische natuur

Onze natuur staat enorm onder druk door een scala aan factoren, waarvan een groot deel door mensen wordt veroorzaakt. Zo belasten wij de natuur met vervuiling van licht, geluid en toxische stoffen, en zorgen wij voor ruimtelijke verstoring door ons land- en watergebruik. Deze druk tast de veerkracht van leefgebieden aan, die volgens de Seven Principles of Resilience (Biggs et al., 2015) en de daarop gebaseerde uitwerking door STOWA (2016) kan worden begrepen in termen van vier essentiële habitatrandvoorwaarden: verbinding (connectiviteit), variatie en overvloedigheid aan leefgebieden (diversiteit), gradiënten en variatie in omstandigheden (dynamiek) en goede chemische omstandigheden (waterkwaliteit). Hydrologische werken, zoals de deltawerken, verminderen tasten deze vier pijlers van habitatkwaliteit in de omringende systemen aan als gevolg van het waarborgen van de waterveiligheid. Vervuiling door micro- en nanodeeltjes, waaronder zware metalen, plastics en chemische stoffen als PFAS verergeren de situatie verder. Ook via indirecte weg leggen wij druk op de natuur. Klimaatverandering brengt stijgende temperaturen, een stijgende zeespiegel en veranderende neerslagpatronen met zich mee, met meer frequente en hevigere extremen. Deze indirecte invloed reikt verder dan onze directe omgeving, waardoor niet alleen de vervuiler problemen ondervindt. Gecombineerd met het feit dat deze processen vertraagd en langdurig effect hebben, maakt de situatie al snel complex.

De veranderingen zijn echter al merkbaar in het klimaat, onze voedselvoorziening en in onze leefomgeving. Zo heeft de mensheid wereldwijd al 75% van het oppervlak aan land en 66% aan zee beïnvloed (Vaughan & Herweijer, 2020) en mede daarmee een vermindering in dichtheden van wilde dieren met 69% en van wilde planten met 50% teweeggebracht (Living Planet Report | WWF, 2022). Deze achteruitgang is het grootst voor zoetwaterdieren, welke wereldwijd met 83% af zijn genomen (Living Planet Report | WWF, 2022). Het gevolg is dat een miljoen plant en diersoorten nu worden bedreigd met uitsterven (IPBES, 2019). De snelheid waarmee organismen uitsterven is dan ook tientallen tot honderden malen hoger dan het gemiddelde de afgelopen 10 miljoen jaar (IPBES, 2019). Er is dan ook meer actie nodig voor elk aspect van klimaatrisico's voor aquatische ecosystemen (Figuur 2.6.1.1).



Figuur 2.6.1.1 Hoofdzakelijke klimaatrisico's voor Europa en de urgentie om hierop te handelen (Bron: EEA, 2024).

Dit is niet alleen op wereldwijde schaal het geval. Nederland loopt namelijk vrijwel voorop in de achteruitgang in biodiversiteit (CBS et al., 2016). Zo was de gemiddelde populatieomvang van onze inheemse landsoorten in 2010 nog maar 15% ten opzichte van een ongestoorde situatie; dit is een halvering sinds 1950 en staat in sterk contrast met de 70% wereldwijd (CBS et al., 2016). En ook meer recent blijkt deze daling door te zetten voor waterplanten (van Geest et al., 2025) en vis en bodemdieren (Van der Loos L.M. & Gmelig Meyling, 2019) respectievelijk in de afgelopen 20 en 30 jaar. Deze effecten beperken zich niet tot Nederlands grondgebied. Onze voetafdruk beïnvloedde tegen 2021 namelijk 18 miljoen hectare aan landoppervlak (CBS, 2024, oppervlakte Nederland ruim 4 miljoen ha), waarvan grofweg de helft buiten Europa (CLO 2020). Kortom, zonder dringende en effectieve maatregelen dreigt de schade onherstelbaar te worden. Het behoud en herstel van biodiversiteit is daarom niet alleen een ecologische noodzaak, maar essentieel voor het menselijk welzijn.

2.2 Verschillende drukfactoren en karakteristieken

Vanuit de klimaatdreigingen opwarming, vernatting, verdroging, en zeespiegelstijging (inc., weersextremen) ontstaan op het thema waterkwaliteit met name risico's voor natuur en milieu.

Drie van de meest relevante, actuele risico's met betrekking tot waterkwaliteit zijn:

- Toename van de watertemperatuur met daaraan gekoppelde toename van algenbloei en lage zuurstofconcentraties;
- Verdrogingseffecten en daaruit volgende droogval van vennen, veranderende rivierdebieten, langere verblijftijden in de zomer en hogere kans op stratificatie in de meren;
- Toenemende invloed van zoutindringing in zoete systemen.

Aanvullend hierop, drie belangrijke risico's voor ecologie zijn:

- Veranderingen seizoensverloop en mismatching prooi-predator relaties, andere seizoensdynamiek door afname ijsbedekking, veranderingen windinvloed en seizoensgebonden verschuivingen in de waterbalans;
- Verschuiving arealen doelsoorten en toenemende rol van exoten, afname diversiteit;
- Extremen als hittegolven en uitdroging.

Voor het thema waterkwaliteit is prioriteit gegeven aan de risico's in relatie tot:

- temperatuurtoename ([Hoofdstuk 3.1.1](#)) en
- de risico's in relatie tot verdroging ([Hoofdstuk 3.1.2](#)).

Bij de vertaling van klimaatdreigingen naar risico's is aandacht besteed aan geografische aspecten en frequenties waarmee dreigingen zich voordoen in relatie tot blootstelling, gevoeligheid en adaptiviteit van de verschillende watersystemen.

2.3 Risico-indicatoren

Om het risico voor waterkwaliteit toe te lichten worden klimaatdreiging, gevoeligheid, blootstelling, impact beschreven.

Gevaar berust hoofdzakelijk op de abiotische en daaruit volgende hydrologische veranderingen in temperatuur, verblijftijden, droogval en stroomsnelheden. De combinatie van veranderingen die relevant is hangt af van het watertype (verblijftijd in stilstaande wateren en stroomsnelheid in stromende wateren). De impacts zijn daarom beoordeeld per KRW watertype.

De impact worden beschreven als de potentiële veranderingen in ecologische gemeenschapssamenstelling. Als uitgangspunt worden de KRW-soortenlijsten voor macrofyten, evertebraten en vissen gebruikt. Om het risico te duiden zijn de volgende indicatoren gebruikt:

- Verandering per soortgroep: laag, medium (afhankelijk van gemeenschap samenstelling) en hoog risico (onafhankelijk van gemeenschap samenstelling) op basis van grenswaarden uit literatuur.
- Percentueel verlies per soortgroep: fractie (%) van KRW soorten die uitgaand van tolerantiedata niet kunnen voortbestaan onder de nieuwe klimaatdruk
- Relatieve gevoeligheid (o.b.v. tolerantiedata) per functionele groep op basis van mobiliteit, plek in de waterkolom en voeding.

Via deze weg kan er een indicatie gegeven worden voor de soortgroepen waar veranderingen worden verwacht, de verwachte mate van impact binnen de gehele soortgroep en de potentiële veranderingen in de gemeenschap samenstelling.

2.4 Informatiebronnen

Voor het opstellen van de factsheets wordt geput uit recent werk i.s.m. RWS en uit lopende projecten i.s.m. de WUR. In samenwerking met RWS (KAKATOE/ Klimaat en Ecologie Grote Wateren) zijn deze risico's per hoofdwatersysteem (Waddenzee, IJsselmeergebied, Delta en Rivieren) verkend in de update van de Klimaatscan (Noordhuis et al., 2019). De basis hiervoor waren de KNMI'23 scenario's en een analyse van data van KNMI, RWS en andere beheerders m.b.t. van actuele trends in waterkwaliteit en aquatische ecologie. Specifiek over temperatuuroptename is door Deltares voor RWS een literatuurstudie en data-analyse uitgevoerd (Noordhuis et al., 2021).

Verdrogingsrisico's voor aquatische natuur binnen de KRW-watertypen zijn bepaald binnen het Deltaprogramma zoetwater voor de plant-, ongewervelden- en visgemeenschappen. Als basis hiervoor dienen de Deltascenario's, welke zijn doorgerekend door Deltares met SOBEK en de LHM en LSM-modellen. Aanvullend wordt hydrologische analyse van de Deltascenario's van Hydrologic in opdracht van RWS gebruikt voor het risico van droogval voor de kleine wateren. Doorvertaling naar de ecologische impact via toleranties van KRW-doelsoorten voor ecologische drukfactoren wordt gedaan op basis van de achterliggende data van KRW-verkenner en AqMaD. Deze zijn vervolgens beoordeeld op basis van functionele groepen verkregen uit de database van FreshwaterEcology. Door de beperkte bruikbaarheid van de achterliggende basisprognose voor de Delta Programma Zoet Water en Hydrologic rapportage wordt deze doorvertaling met name op basis van relatieve verschillen in tolerantie beoordeeld.

2.5 Link met sectoren:

In deze rapportage staan risico's voor waterkwaliteit centraal. Hierbij wordt gefocust op veranderingen in aquatische gemeenschappen. Er wordt verder niet ingegaan op het functioneren van terrestrische natuur. Ook wordt de impact op het halen van de KRW en VHR doelen niet geëvalueerd. Deze doorvertaling wordt gedaan binnen de verslaglegging en factsheets voor terrestrische natuur.

2.6 Adaptatiemaatregelen

2.6.1 Interacties tussen maatregelen

Verschillende maatregelen kunnen synergetische of antagonistische interacties met elkaar hebben. Zo kan beschaduwning als een adaptatie tegen temperatuurverhoging, ook instraling verlagen en daarmee ook verdamping en dus verdroging tegengaan. Daarentegen kan herstel van connectiviteit voor het verlagen van verblijftijden ook weer zorgen voor verdere verspreiding van zout water. Ook het aanpassen van huidig beleid kan een (interacterende) beleidsoptie zijn. Zo worden bomen aan de oevers van rivieren nu vaak verwijderd om beperkingen in stroming te

voorkomen, maar dit zorgt voor meer bezonning, waardoor dit negatieve effecten op temperatuur kan hebben.

2.6.2 Het belang van een systeembenadering

Of een klimaatrisico in de praktijk ook daadwerkelijk problemen veroorzaakt, is onder andere afhankelijk van de locatie. Zo kan het intrekken van verzilt water voor zoutgradiënten in estuaria zorgen, wat nu een ondervertegenwoordigd type habitat is. Ook kan een langzaam stromende nevengeul naast een snelstromende rivier voor lokale verhoging van diversiteit zorgen, omdat een mozaïek aan habitats meer diverse gemeenschapssamenstellingen kan dragen. Of dit op regionale schaal tot wenselijke effecten leidt is afhankelijk van de grootte en relatieve vertegenwoordiging van het gebied. Zo kunnen kleinschalige, lokale veranderingen leiden tot versnippering. Grootschalige veranderingen, zoals verschuiving van de zoet-zoutgrens, kunnen daarentegen leiden tot een meer monotoon landschap waarbij zoetwater habitats (lokaal) verdwijnen.

De (combinatie van) maatregelen die gewenst of juist ongewenst zijn op een locatie hangt dus sterk af van de locatie en directe omgeving. Een systeembenadering is, zeker in stromende wateren, daarom essentieel. Om deze reden is een afwegingskader voor de onderstaande maatregelen gewenst.

2.6.3 Maatregelen gericht op bescherming tegen temperatuur toename

Tabel 2.6.1 Overzicht van adaptatiemaatregelen vastgelegd in het huidige beleid voor temperatuurstijgingen

Beleid	Adaptatiemaatregel	Relevantie	Bron	Verantwoordelijkheid
Herstel connectiviteit*	Herstellen van de verbinding met aangrenzende gebieden	Bufferende werking omgeving	PAGW**	Rijk & waterschappen
Herstel getijdewerking*	Menging via getijdewerking vermindert de effecten van stratificatie temperatuur	Verminderen dieptegradiënt temperatuur	PAGW**	Rijk & waterschappen
Verminderen verblijftijd*	Doorspoeling vermindert de effecten van stratificatie en opwarming	Uitwisseling opwarming en verminderen dieptegradiënt temperatuur	ICBR**	Rijk & waterschappen
Verminderen warmtelozingen	Vermindering van warmtevervuiling beperkt een van de bronnen van de opwarming van de wateren	Verminderen opwarming	PAGW**, ICBR**, lozingsvoorschriften (Bal)	Rijk & waterschappen
Beschaduwing	Tegengaan weghalen bomen	Voorkomen bezonning/instraling	Deltares***	Rijk & waterschappen

2.6.4 Maatregelen gericht op verdroging van (stilstaande) wateren

Tabel 2.6.2 Maatregelen vastgelegd in huidig beleid tegen verdroging

Beleid	Adaptatiemaatregel	Relevantie	Bron	Verantwoordelijkheid
Peilopzet	Verhogen grondwaterpeilen met bijvoorbeeld Onderwaterdrainage	Vergroten watervoorziening, voorkomen droogval	STOWA**, DPZW**, Kamerbrief water en bodem sturend, KRW	Rijk & waterschappen
Verhogen sponswerking	Ontwikkeling bodemstructuur voor verhoging waterberging capaciteit	Vasthouden water	STOWA**, DPZW**, KRW	Rijk & waterschappen
Aanpassing vorm waterlichaam	Verbreiden en verondiepen watergang	Verminderen uitstroom	IPLO**, DPZW**, KRW	Rijk & waterschappen
Waterberging	Aanleg/ontwikkeling waterberging gebied	Vasthouden water	IPLO**, DPZW*	Rijk & waterschappen
Aanpassing vorm waterlichaam	Voorkomen afgraven sliblaag waardoor verhoogde terugstroom naar kwel is	Vasthouden water	Deltares***	
Aanpassing vorm waterlichaam	Voorkomen verstoring disconnectiviteit met grondwater door verandering vorm waterlichaam	Tegengaan verandering kwelstroom	Deltares***	

* Sommige interventies bestrijden niet de oorzaak, maar het effect van het klimaatrisico. Deze maatregelen hebben daardoor alleen impact op kleine schaal. Zo kan het verhogen van menging van water stratificatie tegengaan, maar zonder verdere ingrepen is dit een tijdelijke en zeer lokale oplossing. Bijvoorbeeld, de temperatuur aan het wateroppervlak zal verminderen bij verhoogde connectiviteit, maar daarmee stijgt de temperatuur onder in de waterkolom. Het risico bij dit soort ingrepen is dat vooral verdere metingen in de waterlichamen lager uit kunnen vallen, zonder dat de natuur er verder bij gebaat is. Dit kan zowel het geval zijn bij directe abiotische metingen, als beheer gebaseerd op een selectie van doelsoorten.

** Deze bron is geen onderdeel van een maatregelenpakket beschreven in wetgeving. De maatregel is beschreven in factsheets of lopend onderzoek van het genoemde instituut.

*** Deze maatregel is gebaseerd op het niet uitvoeren van huidig beleid. De maatregel is al mogelijk, maar wordt nog niet bewust overwogen, merken wij uit lopende projecten. Om deze reden is er geen directe externe bron.

2.6.5 Maatregelen gericht op verblijftijd van stromende wateren

Tabel 2.6.3 Maatregelen vastgelegd in huidig beleid tegen verhoogde verblijftijden

Beleid	Adaptatiemaatregel	Relevantie	Bron	Verantwoordelijkheid
Doorspoelen	Gebruik (rivier)water voor het verhogen van de doorstroom	Verlaging verblijftijd	Deltares**	Rijk & waterschappen
Herstel connectiviteit	Herstellen van de verbinding met aangrenzende gebieden	Bufferende werking omgeving	PAGW**	Rijk & waterschappen
Herstel getijdewerking	Menging via getijdewerking vermindert de effecten van zuurstof stratificatie	Verminderen dieptegradiënt zuurstof	PAGW**	Rijk & waterschappen

De maatregelen tegen verdroging mitigeren ook de verhogingen in verblijftijd (Tabel 2.6.2)

2.6.6 Maatregelen gericht op verzilting

Tabel 2.6.4 Maatregelen vastgelegd in huidig beleid tegen verzilting

Beleid	Adaptatiemaatregel	Relevantie	Bron	Verantwoordelijkheid
Sluisbeheer	Controleren van debieten vanuit zoetwater	Verleggen zoutgrens	Handreiking verzilting, STOWA**	Rijk & waterschappen
Sluisbeheer	Eb-lekkende sluizen	Verminderen instroom zout bij sluismonding	Handreiking verzilting, STOWA**	Rijk & waterschappen
Aanpassing vorm waterlichaam	Aanleg van trapjeslijn (Nieuwe waterweg) als bodem rivierlijn	Verminderen instroom zout water in riviermonding	Handreiking verzilting, STOWA**	Rijk & waterschappen
Bellen- en /of waterscherm	Injecteren geperste lucht of water voor sluizen (Terneuzen, krammersluis, IJmuiden)	Tegenhouden menging zoet en zout water bij sluisopening	Handreiking verzilting, Deltares**, STOWA**	Rijk & waterschappen
Zoet-zout scheidingssysteem	Vervanging van water in de sluisolk	Tegenhouden menging zoet en zout water bij sluisopening	Handreiking verzilting, STOWA**	Rijk & waterschappen
Spuibeheer	Selectieve onttrekking zoute onderlaag bij spuien	Uitpompen zout water	Handreiking verzilting, STOWA**	Rijk & waterschappen
Zoetwaterbuffers	Opslag van water voor het zoetspoelen van verzilte wateren.	Uitspoelen verzilt water	Handreiking verzilting, STOWA**, water en bodem sturend	Rijk & waterschappen

* Sommige interventies bestrijden niet de oorzaak, maar het effect van het klimaatrisico. Deze maatregelen hebben daardoor alleen impact op kleine schaal. Zo kan het verhogen van menging van water stratificatie tegengaan, maar zonder verdere ingrepen is dit een tijdelijke en zeer lokale oplossing. Bijvoorbeeld, de temperatuur aan het wateroppervlak zal verminderen bij verhoogde connectiviteit, maar daarmee stijgt de temperatuur onder in de waterkolom. Het risico bij dit soort ingrepen is dat vooral verdere metingen in de waterlichamen lager uit kunnen vallen, zonder dat de natuur er verder bij gebaat is. Dit kan zowel het geval zijn bij directe abiotische metingen, als beheer gebaseerd op een selectie van doelsoorten.

** Deze bron is geen onderdeel van een maatregelenpakket beschreven in wetgeving. De maatregel is beschreven in factsheets of lopend onderzoek van het genoemde instituut.

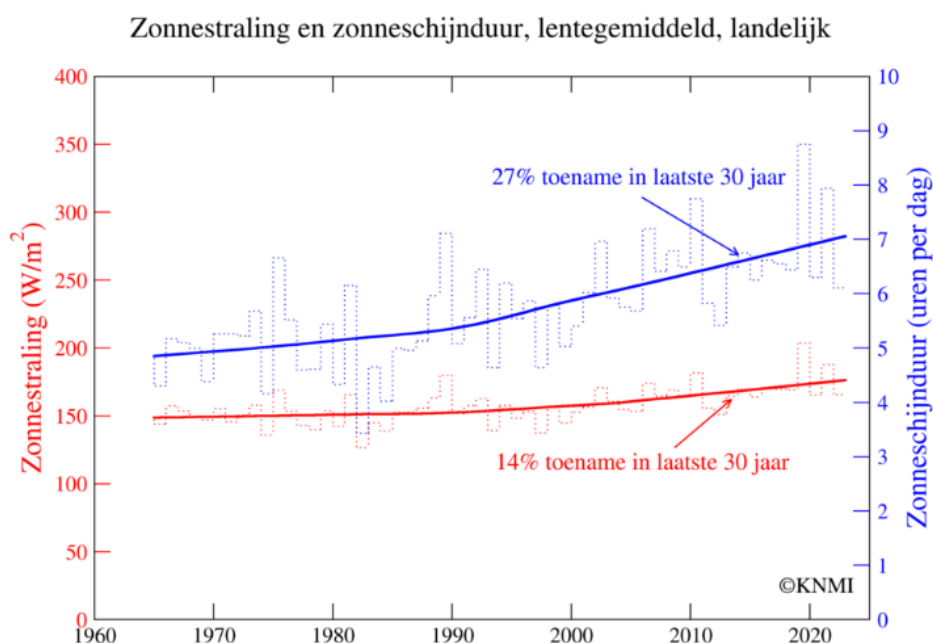
3 Risico's voor waterkwaliteit in de huidige situatie

3.1 Gevaar

3.1.1 Temperatuur

Het water wordt warmer, het groeiseizoen wordt langer, algengroei neemt toe, zuurstofverbruik neemt toe en oplosbaarheid van zuurstof neemt af. Door combinatie met andere klimaateffecten zoals hittestress in zeer ondiep water en stratificatie in dieper water, treden sterfte incidenten van m.n. vis en schelpdieren vaker op.

De luchttemperatuur is in Nederland toegenomen door middel van drie mechanismen; 1) de wereldwijde opwarming, 2) veranderingen in luchtstroming (toename van westenwind in de winter) en 3) toename van straling door verbetering van de luchtkwaliteit en afname van mist (Figuur 3.1.1.1). De opwarming is door deze combinatie van factoren in Nederland tot nu toe twee keer zo sterk geweest vergeleken met het gemiddelde op wereldschaal.



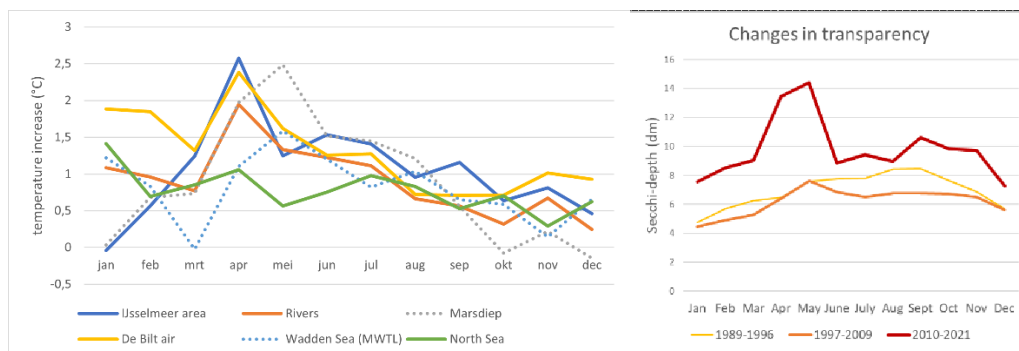
Figuur 3.1.1.1 Lentegemiddelde zonnestraling (rood) en zonneshijnduur (blauw) sinds 1965, landelijk gemiddeld. Dikke lijnen geven de trend weer. ©KNMI.

3.1.1.1 Waargenomen klimaatgebeurtenissen

Door de seizoensaspecten van de laatste twee mechanismen is de temperatuuroptoe en de daaruit volgende verlenging van het groeiseizoen tot nu toe in het voorjaar het sterkst geweest. Met name de relatief sterke toename van straling in maart en april ging gepaard een toename van meer dan 2°C in zowel de lucht als het water.

In de Noordzee warmen de kustwateren sterker op, waarbij het accent later in het seizoen valt dan in de binnenwateren. Doordat de wateren warmte vasthouden daalt de minimum luchttemperatuur in het najaar langzamer dan de maximum luchttemperatuur.

Omdat water vooral door middel van instraling opwarmt, zijn veranderingen in helderheid eveneens relevant voor de opwarming van de wateren (Figuur 3.1.1.2). In een deel van de grote wateren (rivieren, IJsselmeergebied) is de helderheid toegenomen door afname van de overmatige voedselrijkdom (eutrofiëring) en in de zoete wateren ook door toename van waterplanten, die resuspensie van sediment beperken, en door filterende mosselen (invasie Quagga-mossel vanaf 2006). Ook het effect van deze verandering is vaak het sterkst geweest in het voorjaar. In combinatie met het feit dat de dag-nacht ritmiek en de dag-op-dag fluctuaties in de lucht in het water op wat grotere diepte sterk worden gedempt, betekent dit dat de vervroeging van het voorjaar in wat dieper water meer uitgesproken is, d.w.z. met minder fluctuaties verloopt. Zo wordt op 1,5 meter diepte in de meren het criterium dat het KNMI gebruikt voor het aanbreken van het voorjaar (moment waarop de etmaalgemiddelde luchttemperatuur niet meer onder de 5°C komt) in het water enkele weken eerder overschreden.



Figuur 3.1.1.2 Links: temperatuuroptename in 2000-2022 t.o.v. 1961-1990, gemiddelden van diverse locaties binnen de aangegeven regio's. Rechts: veranderingen in de seizoenverdeling van het gemiddelde doorzicht in een aantal grote Rijkswateren (IJsselmeergebied, rivieren)

Geografische verschillen

De opwarming van Nederland is relatief sterk in het zuidoosten, waardoor steeds grotere temperatuurverschillen ontstaan tussen NW en ZO Nederland. In het water ontstaan geografische verschillen vooral door verschillen in de combinatie met andere factoren, zoals de veranderingen in helderheid (rivieren, IJsselmeergebied) en in het effect van warmtelozingen (rivieren).

In de Waddenzee en open deltawateren Ooster- en Westerschelde is ook sprake van seizoenverlenging, maar dit water warmt iets langzamer op dan de meren. In de Noordzee is geen sprake van relatief sterke toename in het voorjaar. Hier heeft de sterkste toename in december en januari plaatsgevonden, in sterkte toenemend tot ongeveer 2°C toename in januari aan de kust.

3.1.1.2 Extreme situaties

Extreme gebeurtenissen met effect op temperatuur, zuurstof en primaire productie (vooral de productie van planktonische algen als basis voor het voedselweb) hebben vooral betrekking op hitte en droogte.

Zuurstofbeschikbaarheid bereikt tijdens hittegolven een dieptepunt, door de verlaagde oplosbaarheid gecombineerd met lokale effecten van stratificatie. Stratificatie treedt in de zomer op als de bovenste laag van diepere wateren sneller opwarmt dan de diepere lagen. Door de verschillen in dichtheid is er geen uitwisseling meer tussen de warme bovenlaag en koude onderlaag. Afbraak van organisch materiaal kan de zuurstofgehalten in de diepere lagen verminderen. Sterfte incidenten van vis of schelpdieren kunnen vooral optreden als gestratificeerd water, in geval van zuurstoftekort in de onderlaag, weer gemengd wordt.

In zeer ondiep water (Wadplaten) kan sterfte ontstaan door directe hittestress van organismen in de intergetijdezone zoals tweekleppigen als kokkels (o.a. 2018).

In de rivieren kan droogte en hitte (verdamping) leiden tot zeer lage afvoer, waardoor voor rivieren ongebruikelijk sterke algenbloei kan optreden, met name in gestuwde rivierpanden. Dit is bijv. gebeurd in het voorjaar van 2011 en in de zomer van 2018 in de Rijn, maar ook in de Maas.

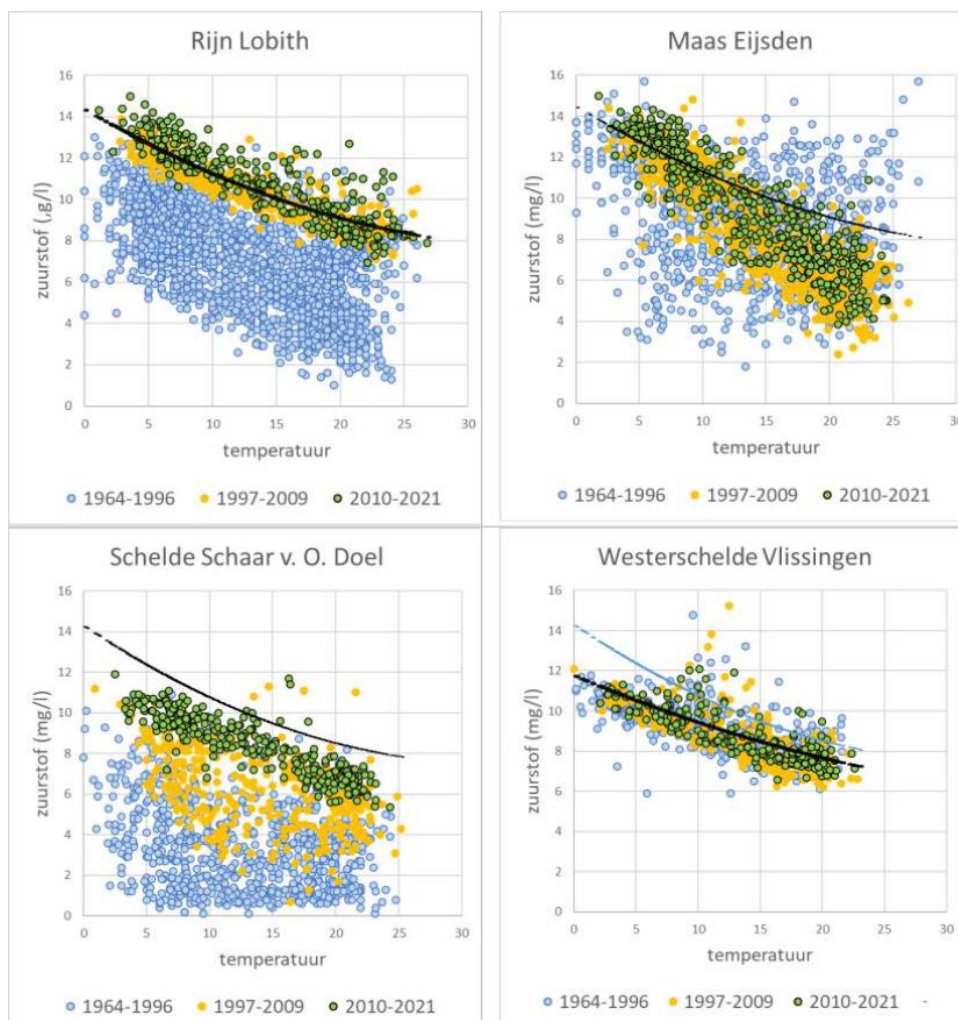
3.1.1.3 Trends watertemperatuur

Langere tijdreeksen van watertemperatuur in de grote wateren geven sinds ongeveer 1980 een toename aan die het sterkst is in april en mei en dan kan oplopen tot ongeveer 2°C, vergelijkbaar met de luchttemperatuur in De Bilt. In de loop van het zomerhalfjaar neemt het verschil af tot ongeveer 0,5-1°C. In de winter is de toename in het water geringer dan op het land, omdat toename onder het vriespunt niet meetelt, de korte dagen in combinatie met de bufferende werking en omdat de instraling relatief laag is door de lage zonnestand. De toename van de luchttemperatuur manifesteert zich echter wel in afname van ijsbedekking. In de rivieren was de toename tot voor kort sterker door combinatie met toenemende opwarming door koelwaterlozingen.

3.1.1.4 Trends zuurstofconcentratie

Omdat de grootste toename van de watertemperatuur in april en mei valt, als het water nog relatief koud is, is de afname van de oplosbaarheid van zuurstof nog minder schadelijk (omdat de concentraties in relatief koud water in het voorjaar absoluut gezien toch nog hoog genoeg zijn). Een daadwerkelijke afname in concentratie is vaak niet zichtbaar dan wel moeilijk te interpreteren vanuit de meetreeksen, omdat die wordt gecompenseerd door toename door verbeteringen van de chemische waterkwaliteit (rivieren) of versterkt door afname van de voedselrijkdom (oververzadiging door algenbloei in meren).

Afname van zuurstof in relatie tot stratificatie in de grote meren wordt niet geregistreerd, omdat de metingen meestal alleen in de bovenlaag plaatsvinden. De relatie tussen temperatuur en zuurstof in die bovenlaag komt wel in beeld als de zuurstofverzadiging wordt uitgezet tegen de temperatuur in opeenvolgende perioden. De figuur hieronder geeft deze relatie aan voor de drie rivieren, in drie opeenvolgende perioden (Figuur 3.1.1.3).



Figuur 3.1.1.3 Relatie tussen watertemperatuur en zuurstofconcentraties in de rivieren in drie opeenvolgende perioden. De zwarte lijn is de concentratie bij 100% verzadiging. Deze ligt lager in zout water (Vlissingen). In de Schelde bij de Belgische grens (Schaar van Ouden Doel) is het water in werkelijkheid ook licht brak. (Gegevens RWS-MWTL).

Tijdens hittegolven in de zomer kan de watertemperatuur tegenwoordig oplopen tot (meer dan) 25°C, waarbij de oplosbaarheid van zuurstof in zoet water afneemt tot 8 mg/l. In combinatie met afbraak van organisch materiaal en/of stratificatie kan dit in toenemende mate problemen zoals sterfte incidenten en algenbloei veroorzaken. In de rivieren lag de zuurstofconcentratie in het verleden veel lager dan de waarde bij 100% verzadiging, als gevolg van verhoogde zuurstofconsumptie door chemische en organische verontreiniging. In de Rijn is dat niet meer het geval, daar daalt de zuurstofconcentratie alleen nog door toename van de temperatuur. In de Maas is de situatie in de winter wel verbeterd, maar in de zomer niet. Hier is de afvoer in de zomer zo laag (en dalende door klimaatverandering) dat verontreiniging minder wordt verdund (en mogelijk zuurstofarme kwel een rol speelt). In de Schelde is de verbetering van recentere datum en is het niveau van temperatuurverzadiging nog niet bereikt. Daarbij speelt echter ook het relatief hoge zoutgehalte (ook bij het meetpunt aan de Belgische grens) een rol, omdat de oplosbaarheid van zuurstof in zout water lager is.

3.1.1.5 Trends algen en productie

Afbraak van organisch materiaal kan toenemen door de hogere temperaturen op zich, maar ook door toename van de algenproductie (die overdag juist oververzadiging met zuurstof veroorzaakt). In meren met afnemende voedselrijkdom wordt dit effect in de meetreeksen gecompenseerd of overschaduwd. In de rivieren is echter in combinatie met lage afvoer een toename van incidenten met algenbloei zichtbaar.

Doordat de sterkste opwarming in het voorjaar heeft plaatsgevonden heeft de verlenging van het groeiseizoen vooral geresulteerd in vervroeging van het voorjaar. Ook het seizoen waarin algenbloei kan optreden breekt dus inmiddels enkele weken eerder aan. Dit is echter lastig te zien in de beschikbare data omdat de meetfrequentie daarvoor te laag is. Interactie met anders gestuurde veranderingen zoals aanpak van overmatige voedselrijkdom (eutrofiering) maakt detectie van dit soort veranderingen in de wateren nog lastiger.

3.1.1.6 Blootstelling

De blootstelling betreft in de eerste plaats de aquatische flora en fauna, met verschillen in blootstelling tussen bijv. waterplanten, ongewervelden zoals schelpdieren en vis, onder meer door verschillen in (aan- of afwezigheid van) mobiliteit en habitatkeuze. Ruimtelijke verschillen in blootstelling hebben te maken met eigenschappen van de verschillende watersystemen, zoals diepte (intergetijdengebieden versus diepere wateren met of zonder kans op stratificatie, zout of zoet). Blootstelling verschilt ook per gemeenschap in timing, omdat bijv. sommige soorten gevoeliger zijn voor vervroeging van het voorjaar, andere voor hoge temperaturen of kans op zuurstoftekort in de zomer. De blootstelling neemt verder toe als sprake is van combinatie met andere drukfactoren, zoals extra temperatuuroptocht door koelwaterlozing (rivieren), extra zuurstoftekort door eutrofiering (afbraak organisch stof; vertraagde afgifte warmte door troebelheid) of door chemische verontreiniging (chemisch zuurstofverbruik; rivieren) en in combinatie met ander klimaatfactoren zoals verandering van neerslag- en verdampingspatronen, via rivierafvoer en (in de zomer toenemende) verblijftijd. Gemeenschappen of soorten met belangrijke activiteiten in het vroege voorjaar (vispaai, bloei van planten etc.) zijn relatief sterk blootgesteld aan vervroeging van het voorjaar door opwarming. De wateren waarin het risico speelt hebben enerzijds een natuurfunctie (KRW, N2000), anderzijds functies voor visserij, drinkwaterwinning en recreatie (zwemwater).

3.1.1.7 Gevoeligheid

De gevoeligheid van gemeenschappen onder flora en fauna verschilt sterk met de habitatkeuze en de eigenschappen van de betreffende wateren. Schelpdieren in zeer ondiep water (intergetijdengebied Waddenzee) hebben direct te maken met toenemende temperatuurstress (sterfte incidenten tijdens hittegolven), waarbij ook de temperatuurmaxima overdag ongedempt worden doorgegeven (m.n. soorten in de toplaag van het sediment, zoals kokkels, zijn dan gevoelig, nog meer als laag water in de warmste uren van de dag valt). In diepere wateren waar de kans op stratificatie toeneemt kan door zuurstoftekort sterfte van bodemfauna onder de spronglaag optreden, van vis als het water mengt aan het eind van een stratificatie periode. Specifieke soorten of gemeenschappen reageren op vervroeging van het voorjaar door opwarming. Als prooi en predator verschillend reageren (bijv. op sleutels in verschillende delen van het seizoen of op daglengte versus temperatuur) kan “mismatching” ontstaan in timing, waardoor voedseltekorten optreden.

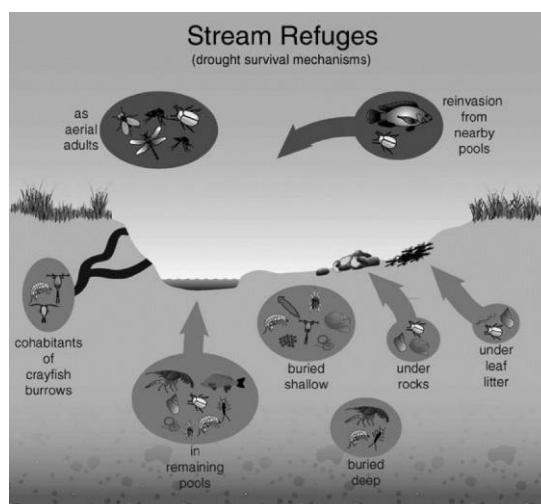
3.1.2 Droogte

In geval van meteorologische droogte zullen stroomsnelheden afnemen, verblijftijden toenemen, en kunnen waterlichamen in de hogere delen van het stroomgebied van rivieren geïsoleerd raken. Hierbij kan het contact met de oevervegetatie verminderen. Ook kan er fragmentatie optreden waarbij contact met de omringende wateren (deels) verloren gaat. Verdroging is een complex proces door het veelvoud van de onderliggende en interacterende fysische, klimatologische en

chemische invloeden. In deze rapportage wordt verdrogingsimpact beoordeeld aan de hand van veranderingen in volume, contact met de bodem en daadwerkelijke droogval. Hiervoor worden respectievelijk de volgende indicatoren gebruikt: peil, gemiddeld hoogste grondwaterstand en droogval.

Veranderingen in verdroging zullen een verschuiving in ruimtelijke verdeling van ecotopen teweegbrengen en daarmee potentieel een verschuiving in (ruimtelijke) verdeling van biotische functionele groepen (Boix et al., 2010; Death et al., 2009). Deze verschuiving vindt hoofdzakelijk plaats in respons tot hydrologische en ruimtelijke veranderingen gevolgd door klimatologische effecten (Boix et al., 2010).

Mozaïekvorming als gevolg van droogte door verandering in ruimtelijke habitatverdeling kan – in geval van stabiliteit van de nieuwe condities – leiden tot nieuwe deel-soortgemeenschappen (Figuur 3.1.2.1), met name onder de macro-evertebraten (Boix et al., 2010), waar selectie plaats lijkt te vinden op basis van schuilplekken welke verschillen tussen voedselgildes (Death et al., 2009). Wanneer de condities in onvoorspelbaarheid toenemen, zullen de veranderingen vooral in verliezen resulteren. Achteruitgang van laterale connectiviteit zal zorgen voor het terugtrekken van de oever en daarmee een verhoogde interactie tussen de aquatische en terrestrische voedselwebben aan de oever.

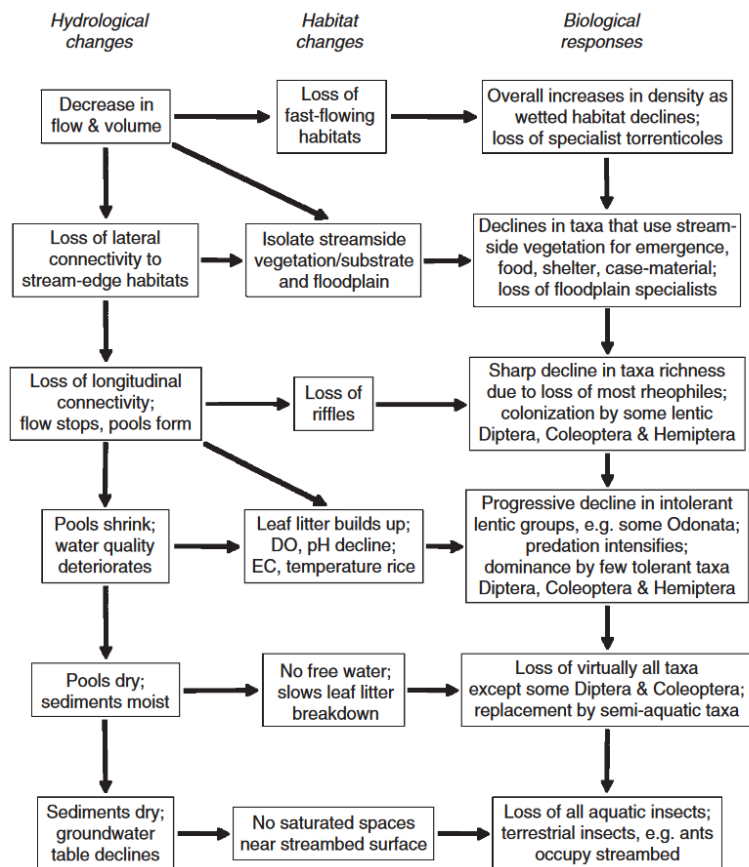


Figuur 3.1.2.1 Ruimtelijke verdeling diergroepen als gevolg van overlevingsmechanismen gerelateerd aan droogte (Lake, 2011).

De vermindering in stroming in snelstromende wateren kan ervoor zorgen dat selectiedruk afneemt, doordat waterplanten zich makkelijker kunnen vasthechten in de bodem. De omstandigheden worden daarmee gunstiger voor indifferente soorten. Hierbij zal er dus een meer diverse gemeenschap kunnen ontstaan. In middel tot langzaam stromend water veroorzaakt een vermindering in stroming echter een verlaagde toevoer van organisch materiaal en minder aangroei met periphyton. Grazers en filtervoeders zullen daardoor achteruitgaan en schrapers zullen relatief belangrijker worden (Lake 2003). Epifytische algen kunnen in combinatie met de toename van fijn organisch materiaal macrofyten verstikken, met name soorten die minder ver aan het oppervlak komen (Wright 2002). Dit effect is versterkt voor wateren met kunstmatige inrichting (via o.a. maaibeheer) waar macrofyt diversiteit al lager is (Franklin 2008). Er zal hier dan ook een verschuiving plaats vinden naar soorten representatief voor verminderde stroming en slibrijke wateren (Wright 2002). Dit wordt gevolgd door een verschuiving in macro-evertebraten van een herbivoor naar een detrivoor gedomineerd systeem (Riis 2017). Door de toenemende depositie van fijn materiaal op het sediment kunnen organismen aan het oppervlak van de bodem verstikken. Eendagsvliegen, steenvliegen en kokerjuffers worden dan overgenomen door

dansmuggen (Hille 2014). Er vindt dus een verschuiving plaats in de richting van gemeenschappen van stilstaand water, parallel aan bijv. toename van algenproductie door hogere temperatuur en lagere debieten.

Voorafgaand aan de verschuiving in gemeenschapssamenstelling kunnen metamorfoses vervroegd plaatsvinden als gevolg van de verhoogde temperatuur voorafgaand aan de droogte (Lancaster & Briers, 2008). De individuen kunnen daardoor kleiner blijven en een verhoogde gevoeligheid hebben voor andere drukfactoren. Insect groepen die met name gevoelig zijn voor droogte zijn steenvliegen (Plecoptera), haften (Ephemeroptera) en libellen (Odonata). Vliegen en muggen (Diptera) en haften (Ephemeroptera) in de bentische en hyporheïsche (het gesatureerde deel van de bodem waar grondwater en oppervlaktewater mengen) zone zijn enigszins bestand tegen droogte (Stubbington et al., 2009), maar niet tegen de bijkomende slibdepositie. Kevers (Coleoptera), wantsen (Hemiptera) en tweevleugeligen (Diptera) in oppervlaktewater, welke lucht kunnen ademen, zijn het minst vatbaar voor verdroging (Bond et al., 2008; Lancaster & Briers, 2008). In de latere stadia van verdroging zal de gemeenschap dan ook gedomineerd worden door vliegen, muggen, kevers en wantsen (Figuur 3.1.2.2).



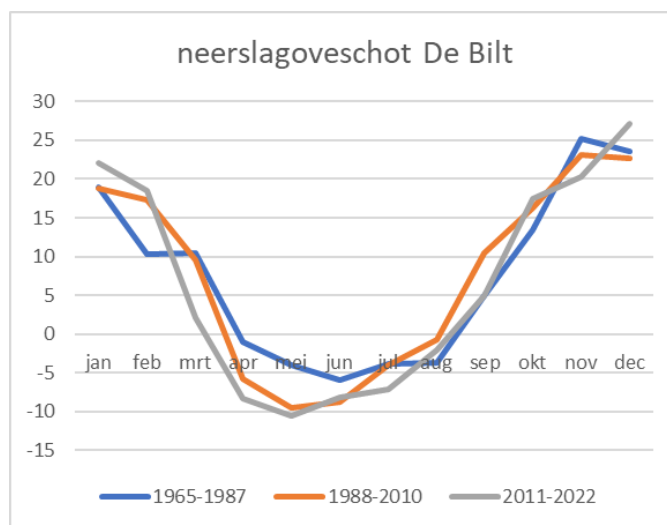
Figuur 3.1.2.2 Veranderingen in habitat en ecologische respons tijdens stapsgewijze verdroging. DO = opgeloste zuurstof; EC = conductiviteit (Bron: Lancaster et al., 2008).

3.1.2.1 Waargenomen klimaatgebeurtenissen

Het wordt natter in de winter door toename van neerslag, droger in de zomer door (enige) afname van neerslag en vooral door toename van verdamping door hogere temperaturen, minder wolken en meer straling.

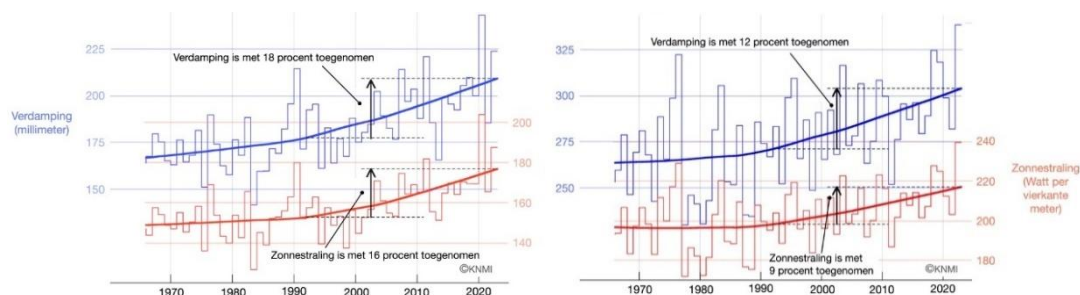
De waterbalans verandert door veranderingen in neerslagpatronen en verdamping. Beide zijn de afgelopen eeuw toegenomen, met grotere overschotten in de winter en grotere tekorten in de zomer (KNMI, 2021). Naar verwachting zal neerslag waarschijnlijk in de zomer verder afnemen

(KNMI '23). Verdamping is het hele jaar toegenomen, straling ook, maar het sterkst in het vroege voorjaar. In deze periode heeft zich dus in toenemende mate een neerslagtekort in het groeiseizoen opgebouwd (Figuur 3.1.2.3). Verdrogingseffecten volgen uit een tekort aan aanvoer van water tijdens de zomer. Hoofdzakelijk gebeurt dit door het neerslagtekort, wat zowel direct voor verminderde aanvoer zorgt, als indirect als gevolg van dalende grondwaterstanden en kwelfluxen.

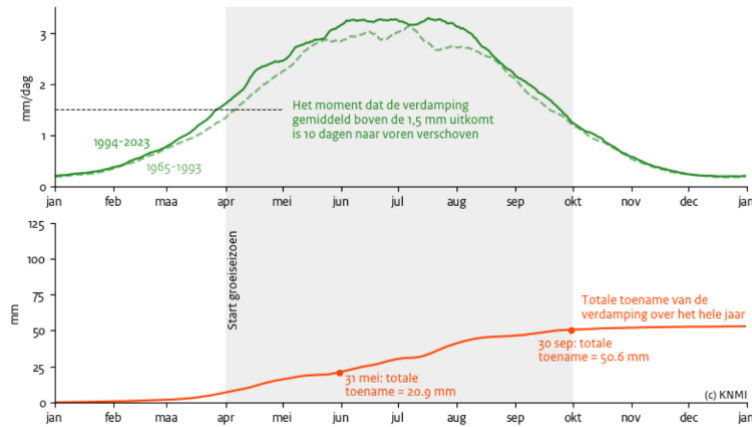


Figuur 3.1.2.3 Veranderingen in het seizoenspatroon van het neerslagoverschot/tekort in De Bilt. Het tekort is vooral in het voorjaar toegenomen, de aanvang van de periode met tekorten is vervroegd.

De neerslagtekorten volgen gedeeltelijk uit de toenemende instraling als gevolg van verminderde bewolking en verhoogde luchtkwaliteit (Figuur 3.1.2.4). De verdamping nam hierdoor in de lente ongeveer net zoveel toe als de zonnestraling. In de zomer nam de verdamping relatief iets meer toe dan de zonnestraling, met name in het binnenland. In de afgelopen jaren is de verdamping vervroegd en verhevigd (Figuur 3.1.2.5).

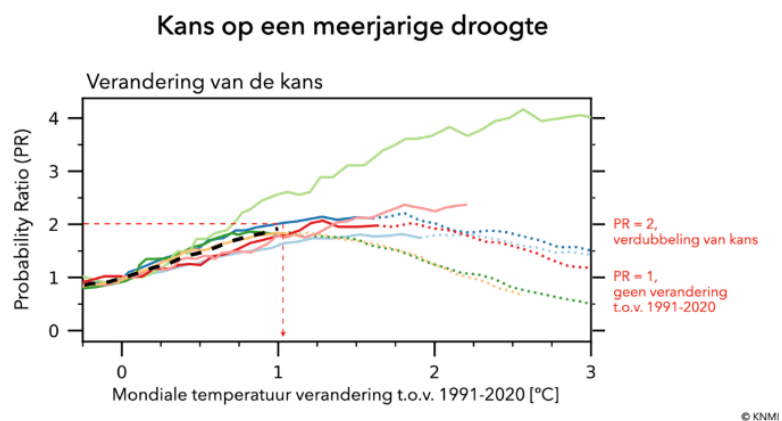


Figuur 3.1.2.4 Verdamping en zonnestraling gemiddeld over 5 meetstations verspreid over Nederland ('LH05') van 1965 tot en met 2022 a) in de lente (maart, april, mei) en b) in de zomer (juni, juli, augustus). ©KNMI.



Figuur 3.1.2.5 Toename van de referentieverdamping van de eerste helft (1965-1993) naar de tweede helft van de meetperiode (1994-2023). In groen de gemiddelde referentieverdamping voor iedere dag in het jaar in de twee periodes, in rood het totale verschil opgeteld over het jaar. ©KNMI.

Doordat het dus in de toekomst 's zomers minder regent en door toename van verdamping krijgen we vaker te maken met zomerse droogte en uitdroging van de bodem. Dit effect wordt verergerd door de opwarming van de aarde. Hierdoor neemt de kans op meerjarige droogte ook sterk toe (Figuur 3.1.2.6). Bij 1 °C extra opwarming is er een verdubbeling van de kans (Probability Ratio = 2).



Figuur 3.1.2.6 Verandering van de kans op een meerjarige droogte in het Rijn stroomgebied voor verschillende niveaus van klimaatverandering. Bron: Van der Wiel et al. (2022, ClimDyn).

Rivierafvoer

Door deze combinatie neemt de aanvoer van de rivieren naar de meren in de winter (mogelijk iets) toe en in de zomer af, zodat het contrast tussen de seizoenen groter wordt. Verblijftijden in de meren binnen het stroomgebied worden dus in de winter korter, en in de zomer mogelijk langer, afhankelijk van verdamping en beheersmaatregelen zoals het vasthouden van zoet water.

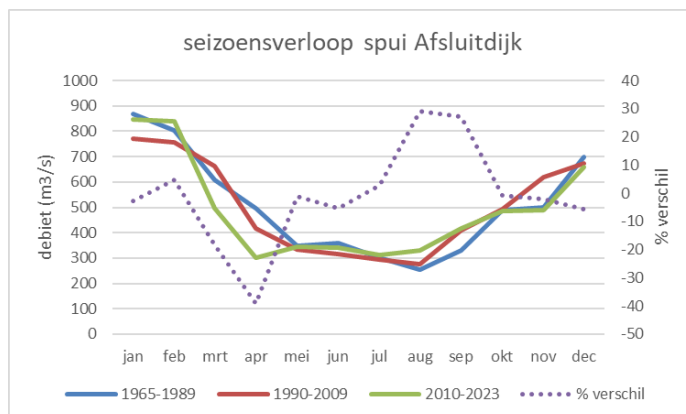
Door de toegenomen straling en verdamping in het voorjaar wordt het seizoen met lage afvoer in de rivieren vervroegd en start het seizoen meer abrupt. De grotere contrasten in afvoeren kunnen leiden tot verlies van contact met de oever en tot versnippering in relatie tot omringende waterlichamen.

Los van de systematische verschuivingen treden incidenten op in relatie tot piekafvoer en overmatige regenval enerzijds, of langdurige perioden van droogte anderzijds. In droogteperiodes wordt vanuit de meren (afgesloten zeearmen in de Zuidwestelijke Delta en het IJsselmeergebied)

soms wekenlang weinig of geen water afgevoerd, in de meest extreme perioden zoals voorjaar 2011 of zomer 2018 maandenlang niet. Dit kan verband houden met de beschikbaarheid van zoet water of met het voorkomen van de indringing van brak water (zoetspoelen Haringvliet).

Langere verblijftijd in meren

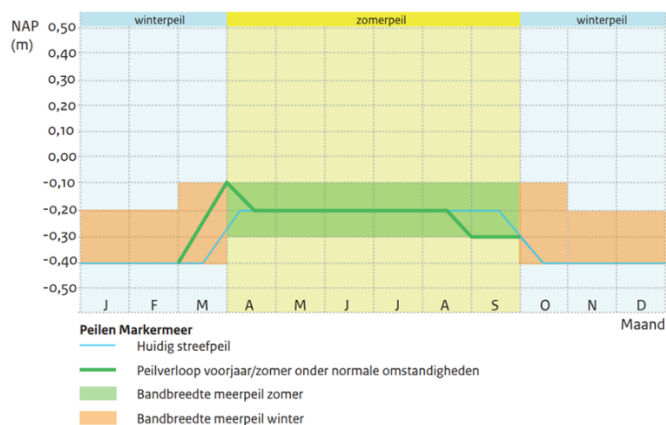
Waterbeheer wordt in het zomerhalfjaar gericht op het vasthouden van water, soms zelfs met een hoger peil dan voorheen (zoals in het IJsselmeer en Markermeer). De verblijftijd van het water wordt in de winter dus korter en in de zomer langer, met een meer abrupte seizoensovergang in het voorjaar die gemiddeld vervroegd in het seizoen plaatsvindt (Figuur 3.1.2.7).



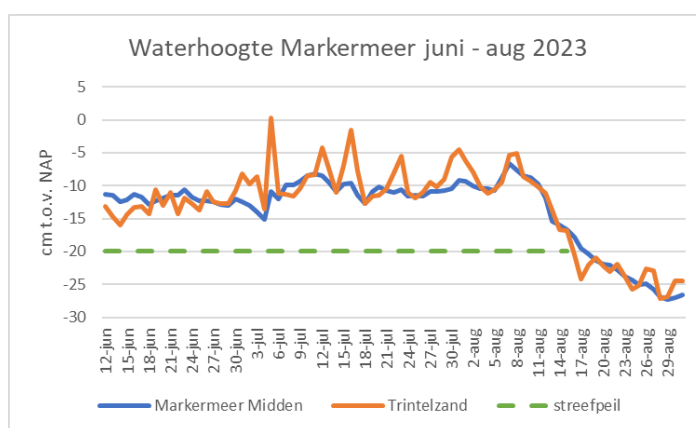
Figuur 3.1.2.7 Spui van het IJsselmeer naar de Waddenzee is niet sterk veranderd, behalve in het voorjaar, met vooral in april een forse afname.

Verblijftijden op zich worden niet gemonitord. Voor sommige wateren zijn over langere perioden waterbalansgegevens beschikbaar, waaruit veranderingen in verblijftijden kunnen worden berekend. Bij grotere wateren is het in de praktijk lastig alle informatie van verschillende beheerders te verzamelen. Omdat het waterkwantiteitsbeheer van de grote wateren in Nederland kunstmatig is, is het bovendien lastig veranderingen in verblijftijden te interpreteren. Veranderingen in aan-en afvoerposten geven soms goede indicaties en kunnen daarom als indicator worden gebruikt.

Door zeespiegelstijging wordt spui onder vrij verval vooral in de winter moeilijker. Aan de Afsluitdijk zijn daarom pompen geïnstalleerd. Daardoor wordt de verblijftijd in de meren in de winter potentieel korter en de waterstand gemiddeld lager, omdat in de huidige situatie zonder spui het winterpeil meestal niet wordt gehaald. Het winterpeil kan strakker worden gehandhaafd. Vanwege de toenemende vraag naar zoet water worden de peilen in de zomer hoger gehandhaafd binnen de mogelijkheden van de geldende peilbesluiten (Figuur 3.1.2.8). Het water wordt daardoor dieper, de verblijftijden langer. Ook wordt afhankelijk van de watervraag binnen de in het peilbesluit toegestane marges soms halverwege het seizoen “buffercapaciteit opgebouwd” via verhoging van het streefpeil (Figuur 3.1.2.9).



Figuur 3.1.2.8 Peilschema uit het geldende peilbesluit voor het Markermeer. Binnen het geldende peilbesluit van het IJsselmeer en het Markermeer is het zomerstreefpeil -20cm NAP, met een marge van -10 tot -30cm, onder meer bedoeld om het peil in de loop van de zomer enigszins te kunnen laten uitzakken ten gunste van de ecologie.



Figuur 3.1.2.9 Actueel peil in het Markermeer in de periode juni- augustus 2023. In de praktijk wordt de marge meer en meer gebruikt voor peilopzet voor opbouw van buffercapaciteit. Daarbij wordt de bovengrens van de marge gebruikt, van -10 cm NAP. Afhankelijk van de locatie kan daar nog opstuwing door wind bovenop komen.

Een langere verblijftijd geeft verschuivingen in de stoffenbalans: Er is geen afvoer van stoffen via verdamping dus er is meer retentie in interne processen, waardoor indikking optreedt. In combinatie met toename watertemperatuur is er een toename in afbraak van organisch stof, nalevering van fosfaat, etc. Verschuivingen treden vooral op in wateren met een relatief korte verblijftijd (korter dan een maand), omdat in dergelijke wateren in de praktijk niet alle voedingsstoffen worden opgebruikt. Daardoor kan een langere verblijftijd in combinatie met toename van de watertemperatuur ook resulteren in een grotere kans op algenbloei.

Stratificatie

In de zomer treden in de wateren twee typen stratificatie op. In diepere delen van meren (zoals in de Grevelingen en de zandwinputten in het IJsselmeergebied) kan langdurige stratificatie optreden gedurende een of meerdere perioden van enkele maanden, met korte onderbrekingen. Vooral later in de zomer gaat dit vaak gepaard met lage zuurstofconcentraties in de onderlaag. In ondiepere delen van de stilstaande wateren kan op warme dagen met weinig wind dagstratificatie ("microstratificatie") optreden, die meestal 's avonds weer wordt opgeheven. Tijdens hittegolven blijft de gelaagdheid van dagstratificatie meerdere dagen in stand, waardoor de zuurstofconcentratie in de onderlaag afneemt. Het eerste type stratificatie neemt door klimaatverandering toe in duur, het tweede type in frequentie (met hittegolven). Behalve

temperatuurstratificatie kan in een aantal wateren ook sprake zijn van saliniteitsstratificatie, die eveneens onder invloed van klimaatverandering kan verschuiven. Zowel bij toename van straling en watertemperatuur en toename van diepte (meer water vasthouden bij droogte) als bij toename van zout indringing (stijgende zeespiegel) neemt de kans op stratificatie en zuurstoftekorten toe.

3.1.2.2 Extreme situaties

Gemiddeld zal een droogte zorgen voor een verlaging in populatiegrootten en biodiversiteit (Magoulick and Kobza 2003; Stubbington 2009), wat ruimte kan bieden voor invasieve soorten (Lake 2003). Deze effecten zijn ook onderhevig aan de duur van de droogte. Langdurige droogteperiodes zullen zorgen voor een sterkere selectie en kunnen op den duur zorgen voor verlanding. Menselijk gebruik kan de droogte verheven via de aanleg van dammen en sloten voor waterafvoer en watergebruik (Bond 2008). Deze effecten kunnen droogte versnellen tot op een punt dat fysiologische aanpassingen niet snel genoeg tot uiting kunnen komen (Stanley 2004). Met name in waterlichamen die niet regelmatig droogvallen, zijn de zaadbanken onvoldoende aangepast, waardoor herstel langer zal duren.

Herstel van verdrogingseffecten is verder afhankelijk van connectiviteit en snelheid van vernatting. Graduele vernatting kan leiden tot een spoediger herstel van de lage trofische groepen met korte levenscycli, waarna de hogere ordes zoals vissen volgen. Snelle vernatting kan daarentegen voor uitspoeling, erosie en daarmee voor verdere achteruitgang zorgen. De aanwezigheid van nabijgelegen reservoirs van permanent water kan het herstel verder versnellen, doordat verschillende ongewervelden daarvanuit kunnen herkoloniseren (Robson 2008).

3.1.2.3 Blootstelling

De blootstelling aan veranderingen in droogval, stroomsnelheid en connectiviteit betreft in de eerste plaats de aquatische flora en fauna, met verschillen in blootstelling tussen bijv. waterplanten, ongewervelden zoals schelpdieren en vis, onder meer door verschillen in (aan- of afwezigheid van) mobiliteit en habitatkeuze. Ruimtelijke verschillen in blootstelling hebben te maken met eigenschappen van de verschillende watersystemen, zoals diepte (intergetijdegebieden versus diepere wateren met of zonder kans op stratificatie, zout of zoet) en stroomsnelheid. De blootstelling neemt verder toe als sprake is van combinatie met andere drukfactoren, zoals extra temperatuurtoename, extra zuurstoftekort door eutrofiering (afbraak organisch stof) of door chemische verontreiniging (chemisch zuurstofverbruik; rivieren). Gemeenschappen of soorten met belangrijke activiteiten als migratie of voortplanting in de zomer zijn relatief sterk blootgesteld aan verandering in connectiviteit en stroomsnelheid (en daaruit volgende stratificatie). De wateren waarin het risico speelt hebben enerzijds een natuurfunctie (KRW, N2000), anderzijds functies voor visserij, drinkwaterwinning en recreatie (zwemwater).

Blootstelling aan stratificatie betreft enerzijds de gehele levensgemeenschap via de productieketens, omdat verlenging van de verblijftijd in sommige wateren extra algengroei kan betekenen, onder meer door versterking van de vervroeging van het voorjaar (zie factsheet temperatuur en zuurstof). Anderzijds worden vis en macrofauna vaker en langer blootgesteld aan zuurstoftekorten bij stratificatie, waardoor vaker sterfte incidenten zullen plaatsvinden.

De blootstelling neemt verder toe als sprake is van combinatie met andere drukfactoren, zoals extra temperatuurtoename of door chemische verontreiniging (chemisch zuurstofverbruik; rivieren). Gemeenschappen of soorten met belangrijke activiteiten als migratie of voortplanting in de zomer zijn relatief sterk blootgesteld aan verandering in connectiviteit, stroomsnelheid en stratificatie. Door maatregelen tegen zout indringing (sluiten kier Haringvliet) verslechtert de connectiviteit verder en kan visintrek worden belemmerd, evenals de ontwikkeling van brakke overgangszones. Verschuivingen in de timing van spui kunnen een mismatch veroorzaken met de paaidrang van de verschillende soorten, waardoor het voortplantingssucces kan afnemen.

De wateren waarin het risico speelt hebben enerzijds een natuurfunctie (KRW, N2000), anderzijds functies voor visserij, drinkwaterwinning en recreatie (zwemwater).

3.1.2.4 Gevoeligheid

De gevoeligheid van gemeenschappen onder flora en fauna verschilt sterk met de habitatkeuze en de eigenschappen van de betreffende wateren. Schelpdieren in zeer ondiep water hebben direct te maken met droogval, toenemende temperatuurstress en dag stratificatie (sterfte incidenten tijdens hittegolven). In diepere wateren waar de verblijftijden verhogen, en dus de kans op stratificatie toeneemt, kan door zuurstoftekort sterfte van bodemfauna onder de spronglaag optreden, en van vis als het water mengt aan het eind van een stratificatie periode. Specifieke soorten of gemeenschappen reageren op de verlaagde stroomsnelheden. Hierbij kunnen “zwakke” zwemmers onder de vissen niet meer migreren en gaan stromingsafhankelijke soorten zoals tegumen- en kieuw ademende evertibraten (kreeftachtigen, wormen, haften) verloren.

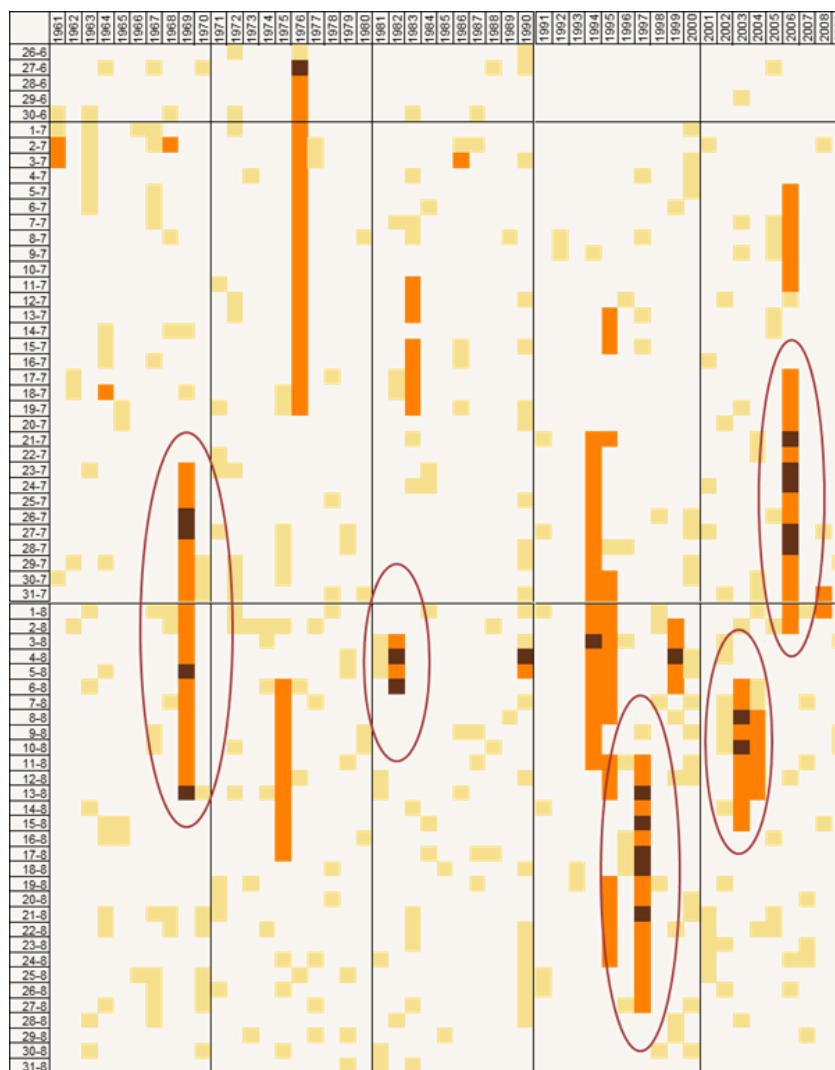
Toename van algenconcentraties als gevolg van de toenemende temperatuur en stratificatie kunnen in voedselrijke systemen leiden tot lichtbeperking van groei van waterplanten en het vrijkomen van toxische stoffen bij afbraak. In extreme gevallen leidt dit tot ernstig verlies van biodiversiteit en gezondheidsproblemen (zwemwater).

De gevoeligheid van vis- en macrofaunasoorten voor lage zuurstofconcentraties verschilt per soort, afhankelijk van onder meer mobiliteit (vis versus sessiele macrofaunasoorten zoals mosselen). Behalve sterfte van bodemfauna (Grevelingen) kunnen ook incidenten van massale vissterfte soms aan stratificatie worden gekoppeld.

Spiering is net als andere zalmachtigen relatief gevoelig voor lage zuurstofconcentraties. In het IJsselmeer en Markermeer, waar spiering een cruciale rol speelde als voedsel voor visetende watervogels, is het bestand sinds de jaren 1980 sterk gedaald. Hiervoor zijn meerdere mogelijke oorzaken aan te geven, waaronder afname van de voedselrijkdom (fosfaat), maar ook overbevissing in de periode van grootste afname (inmiddels is spieringvisserij echter al jaren verboden), habitatverlies (toename van waterplanten en van de helderheid) en waarschijnlijk ook klimaatverandering. Spiering is een noordelijke soort die hier de zuidgrens van zijn verspreidingsgebied bereikt.

Massale sterfte incidenten in het IJsselmeergebied vielen samen met perioden van hoge temperaturen en weinig wind, omstandigheden waaronder ook dagstratificatie op beperkte diepte meerdere dagen aan kan houden. Lage concentraties in de onderlaag dwingen de vis naar de bovenste waterlagen, waar de zuurstofconcentraties alsnog tijdelijk verlaagd worden als het water aan het eind van de periode weer wordt gemengd.

Massale sterfte van spiering dan wel andere sleutelsoorten wordt niet standaard geregistreerd. De hieronder getoonde informatie komt uit veldnotities van een RWS-onderzoeker (M.R. van Eerden; Figuur 3.1.2.10). Deze reeks kan voor dit aspect niet worden aangevuld. Wel is de toename van de frequentie van hittegolven door het KNMI aangetoond.



Figuur 3.1.2.10 Het voorkomen van perioden met hoge temperaturen (oranje) dagen met weinig wind (geel), en de combinatie daarvan (zwart) in juni-augustus, en perioden waarin massale sterfte van Spiering werd gemeld in het IJsselmeergebied (cirkels).

Massale sterfte van sleutelsoorten (zoals Spiering, maar ook habitatvormers of biobouwers, zoals oesters of mosselen) kan leiden tot permanente (langdurige) verschuivingen in de verhoudingen tussen soorten of habitats, vooral bij combinaties van drukfactoren (veranderingen voedselrijkdom, bodemdaling/zeespiegelstijging). De wateren waarin het risico speelt hebben enerzijds een natuurfunctie (KRW, N2000), anderzijds functies voor visserij, drinkwaterwinning en recreatie (zwemwater).

Daarnaast is er sprake van gevoeligheid van het ecosysteem als geheel via beheerskeuzes met betrekking tot waterkwantiteit, naar aanleiding van klimaatverandering (zeespiegelstijging, rivierafvoer, zoutindringing, zoetwaterbeschikbaarheid). Veranderingen in peilfluctuaties (afname dynamiek door pompen) en peilen (peilopzet in het voorjaar, handhaven hoog peil in de zomer) hebben negatieve effecten op ecologie. Peilfluctuaties en uitzakkend zomerpeil zijn cruciaal voor de kwaliteit van moerasvegetatie (zoals in doorstroommoerassen en moerasbeken) en het succes van natuurontwikkelingsprojecten.

Verhoging van het peil in het broedseizoen (t.b.v. buffercapaciteit) is zeer nadelig voor broedvogels die op de grond nestelen of in ondiep water of op droogvallend slik met hun jongen moeten foerageren (vaak Natura 2000 doelsoorten).

Het sluiten van sluizen in verband met zoetwaterbeschikbaarheid en het tegengaan van verbrakking beperkt de kansen voor trekvis en brakwater gemeenschappen.

3.1.2.5 Impact

De hier behandelde parameters, verblijftijd en stratificatie en de ecologische gevolgen daarvan, worden niet gericht gemonitord. Veranderingen in verblijftijd zijn vooral van belang als ze korter waren dan ongeveer een maand en van daaruit langer worden. Indicatoren zijn dan de ratio opgelost/totaal fosfaat (wordt lager bij verlenging) en chlorofylconcentratie (neemt toe tot opgelost fosfaat wordt uitgeput).

Verlenging van stratificatieperiodes kan leiden tot sterkere afname van zuurstof in de onderlaag, waarbij ook nalevering van fosfaat toeneemt. Zuurstof en fosfaat zijn dus indicatoren, maar moeten dan onder de spronglaag dan wel op meerdere dieptes worden gemeten. Voor de ecologie betekent verlenging een verminderde beschikbaarheid van dieper water voor macrofauna en vis, die hier bij hoge watertemperaturen tijdens hittegolven kan schuilen zolang er voldoende zuurstof is. Als de zuurstofconcentraties dalen kan dus enerzijds de hittestress van vis toenemen, terwijl menging van de waterkolom aan het eind van een stratificatieperiode kan leiden tot tijdelijke onderverzadiging in de hele waterkolom. Sterfte incidenten van organismen op de bodem, zoals zoetwatermosselen, of van vissoorten die gevoelig zijn voor hoge watertemperaturen en lage zuurstofconcentraties, zoals spiering, zijn dan goede indicatoren. Op dit moment is er echter geen standaard registratie van dit soort incidenten. Ook neemt de waarde van massale sterfte als indicatie uiteindelijk af als de betreffende soort ook door andere oorzaken afneemt. Als dat een onderdeel is van toename van diversiteit is dat in zekere zin positief, omdat daarmee in het voedselweb nieuwe, alternatieve voedselketens ontstaan.

3.2 Gevolgen

De effecten vanuit de verschillende drukfactoren uiteten zich verschillend per soortgroep. Op basis van literatuur kan een verwachting worden gegeven voor de mate van risico (

Tabel 3.2.1 Overzicht relevante grenswaarden (Bron: DPZW)), maar de mate van impact kan verder en preciezer worden geduid op basis van maximum toleranties van de verschillende soorten.

Tabel 3.2.1 Overzicht relevante grenswaarden (Bron: DPZW)

		Risico			Bron
		Laag	Medium	Hoog	
Stroming	Macrofyt	Daling <10%	Daling <20%	Daling >20%	(Janauer et al., 2010)
	MAV				(Blöcher et al., 2020; Gore, 1978; Riis et al., 2008)
	Vis				(Aadland, 1993)
Temperatuur	Macrofyt	Stijging <1C	Stijging <3C	Stijging >3C	(Manolaki & Papastergiadou, 2013, 2016)
	MAV	Stijging <1C	Stijging <3C	Stijging >3C	(Bonacina et al., 2023)
	Vis	Stijging <1C	Stijging <4C	Stijging >4C	(Kottelat & Freyhof, 2007; Kriaučiūnienė et al., 2019)
Verziltig	Macrofyt	<2 g/L	< 5 g/L	> 6 g/L	(Du et al., 2021; Moreira et al., 2023; Telesh et al., 2011, 2013)
	MAV	<1 g/L	< 5 g/L	> 5 g/L	(Telesh et al., 2011, 2013)
	Vis	<2 g/L	< 5 g/L	> 5 g/L	(Telesh et al., 2011, 2013)

3.2.1

Temperatuur

Binnen het Deltaprogramma zoetwater zijn temperatuurstijgingen voorspeld voor onder andere de Nederlandse rivieren. Voor het Deltascenario Rust wordt een gemiddelde stijging van de zomertemperatuur van <1.5C verwacht voor 2050, waarna de toename stagneert. Voor het scenario Stoom is er een initiële toename van tussen de 1.5 en 2C in 2050, waarna deze verder stijgt naar ongeveer 5C in 2100 (Tabel 3.2.2).

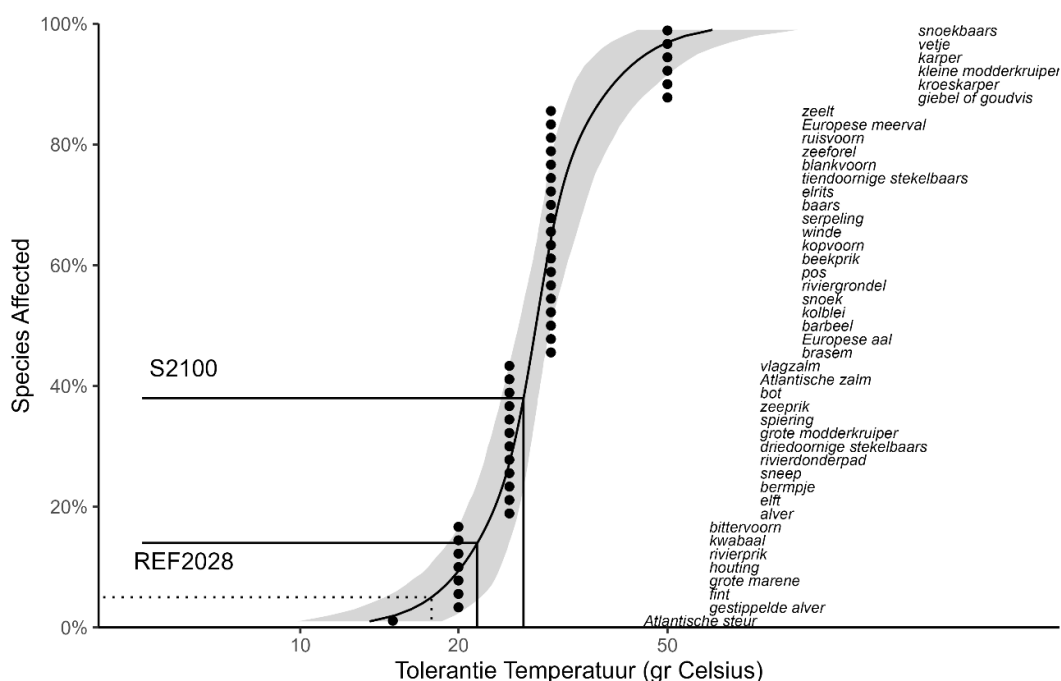
Tabel 3.2.2 Voorspelde zomergemiddelden voor temperatuur in rivieren (Bron: DPZW). De temperaturen zijn gekleurd op basis van de grenswaarden uit

Tabel 3.2.1 Overzicht relevante grenswaarden (Bron: DPZW)

Scenario	Zandmaas	Waal	Nederrijn
RP2050Asum	22.9	22	21.9
RP2100Asum	22.9	22	21.9
S2050Asum	23.5	22.8	22.6
S2100Asum	26.5	26.1	25.7
REF2028	21.6	20.9	20.9

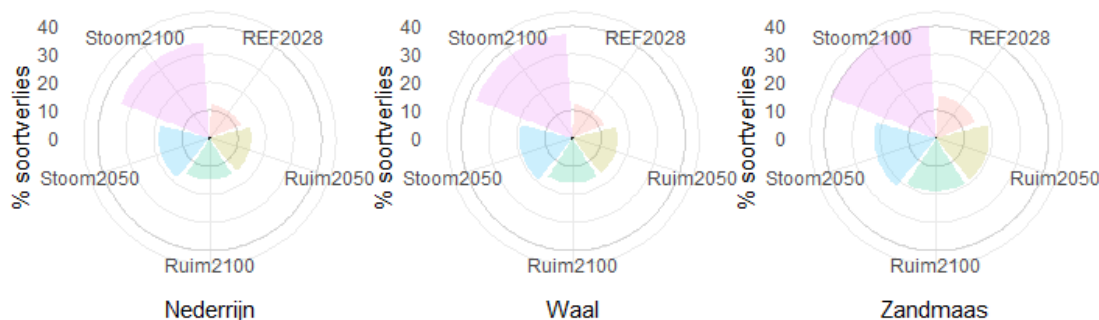
Onder de vissoorten betekent dat een stijging van het percentage aangetaste soorten van 15% (REF2028) tot maximaal 38% (S2100) KRW-soorten welke niet in de Nederlandse rivieren voort zouden kunnen bestaan (Figuur 3.2.1.1 en Figuur 3.2.1.2). Vergelijkbare trends bestaan voor de evertrebraten en macrofyten, waarbij met name de evertrebraten gevoelig zijn voor temperatuurstijging (

Tabel 3.2.3). Wel is het belangrijk om bij de beoordeling van de effecten in gedachten te houden dat bovenstaande temperaturen voor het water aan het oppervlak zijn. In dieper water stratificeert de temperatuur en zullen de bentische soorten dus blootgesteld worden aan enigszins lagere temperaturen (Figuur 3.2.1.2C). Mobile soorten kunnen daarnaast tijdelijk naar de diepere lagen vluchten (zolang daar nog voldoende zuurstof is). Om deze reden kunnen de percentages het beste geïnterpreteerd worden als maximumeffect voor de respectievelijke temperatuur.

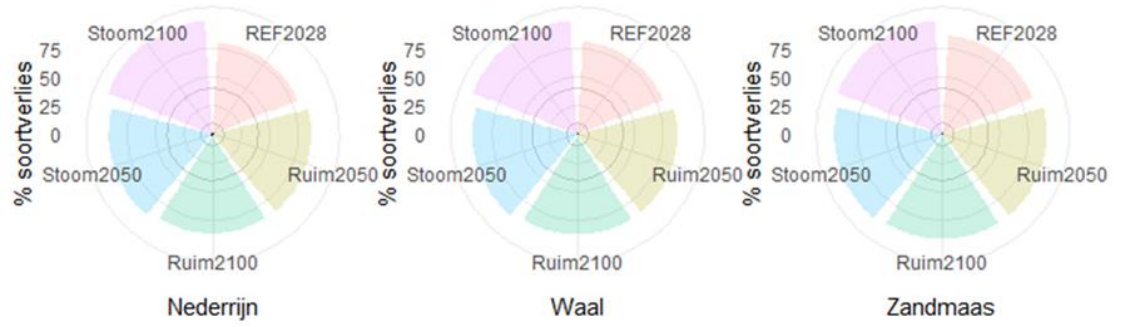


Figuur 3.2.1.1 Tolerantiecurve KRW vissoorten. De zwarte lijnen indiceren het percentage soorten dat niet kan gedijen onder de gemiddelde zomertemperatuur voor de referentie en (meest extreme) Deltascenario S2100 in de Zandmaas (BRON: DPZW)

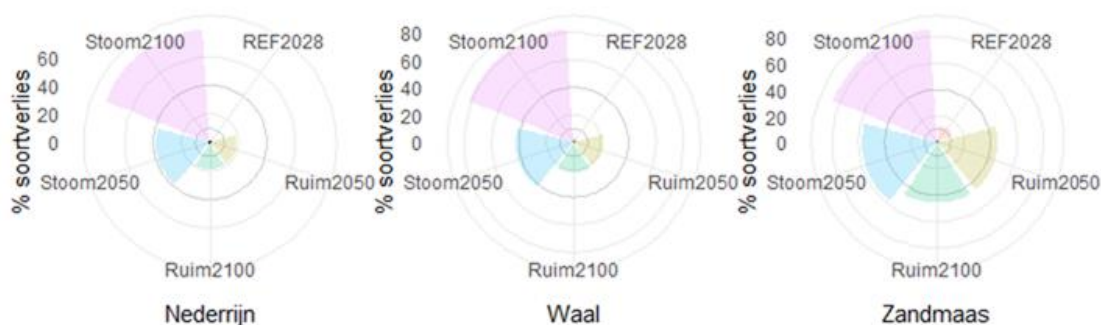
a) KRW-Vissoorten



b) KRW-evertebraat soorten



c) KRW-evertebraat soorten (-5 °C)



Figuur 3.2.1.2 Percentage KRW doelsoorten die niet voor kunnen komen bij gemiddelde zomer temperaturen voor de referentie en Deltascenario's. Boven zijn de vissoorten weergegeven, in het midden de evertebraten, en onder de evertebraten gecorrigeerd voor temperaturen lager in de waterkolom. Elke ring vertegenwoordigt een percentage aangeduid op de y-as, waarbij de kern 0% (BRON: DPZW)

Tabel 3.2.3 Voorspelde percentages soorten waarvoor de maximumtemperatuur wordt overschreden op basis van de zomergemiddelden voor temperatuur in rivieren (Bron: DPZW).

Scenario	Waal Evertebraat (%)	Nederrijn Evertebraat (%)	Zandmaas Evertebraat (%) -5c	Waal Evertebraat (%) -5c	Nederrijn Evertebraat (%) -5c	Zandmaas vis (%)	Waal vis (%)	Nederrijn vis (%)
Ruim2050	88	87	46	22	19	18	15	15
Ruim2100	88	87	46	22	19	18	15	15
Stoom2050	92	91	57	42	38	2	17	17
Stoom2100	99	99	85	82	79	38	35	32
REF2028	81	8	13	04	03	14	12	12

3.2.2 Kwetsbare groepen en hun plek in het ecosysteem

Om een beeld te geven van de veranderingen op gemeenschapsniveau worden de soortgroepen macrofyten, evertebraten en vissen hieronder beoordeeld op basis van functionele groepen voor onder andere voeding, mobiliteit en groeivorm. Soorten binnen functionele groepen maken op vergelijkbare manieren gebruik van de ruimte, waarbij ze ook op vergelijkbare manier worden blootgesteld en reageren op stressoren. Ook is de doorvertaling naar de rol in een ecosysteem op basis van (een combinatie van) functionele groepen mogelijk, waardoor structurele veranderingen in een ecosysteem beter te bepalen zijn dan met een soortbenadering.

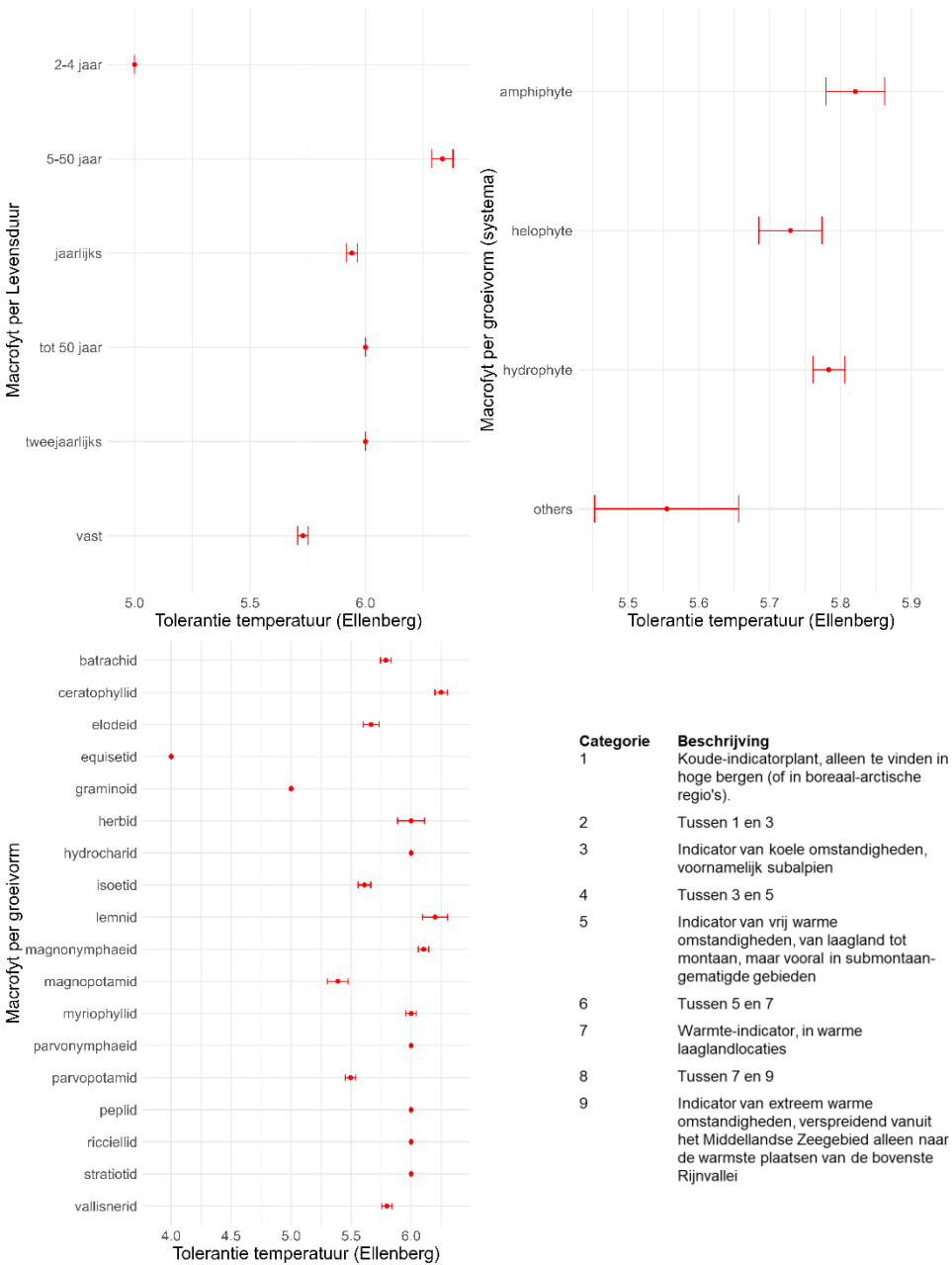
3.2.2.1 Temperatuur

Macrofyten

Omdat er geen temperatuurtolerantiedata beschikbaar is voor Nederlandse macrofyten populaties, worden deze beoordeeld op basis van de tolerantieclassificatie van Ellenberg, een classificatie van temperatuurvoorkeur op basis van voorkeursklimaat (1 = alpiene, 3 = sub-alpiene, 5 = sub-montaan, 7 = warme laaglanden, 9 = mediterraan). De data berusten op buitenlandse data voor dezelfde doelsoorten (Figuur 3.2.2.1). Hieruit blijkt dat een overgroot deel van de KRW-macrofytensoorten als indicator voor gematigd klimaat wordt gezien (score 5-6). Uitzonderingen hierop zijn de grassen (graminoid) en paardenstaarten (equisetid), welke indicatief zijn voor een kouder klimaat. Ook blijken de meerjarige planten (2-4 jaar en vaste planten), en oever- en drijfbladplanten (groeivorm 'others') relatief gevoeliger voor stijgingen in temperatuur. Hierdoor lijkt de nadruk voor temperatuurgevoeligheid vooral te liggen op soorten aan de oever en het oppervlak van het water. Ook is zichtbaar dat plantensoorten typisch voor lage

nutriëntbelasting (vennen en systemen gevoed uit regenwater) en lichtsterkten (ondergroei) gevoeliger zijn voor hoge temperaturen (Appendix A).

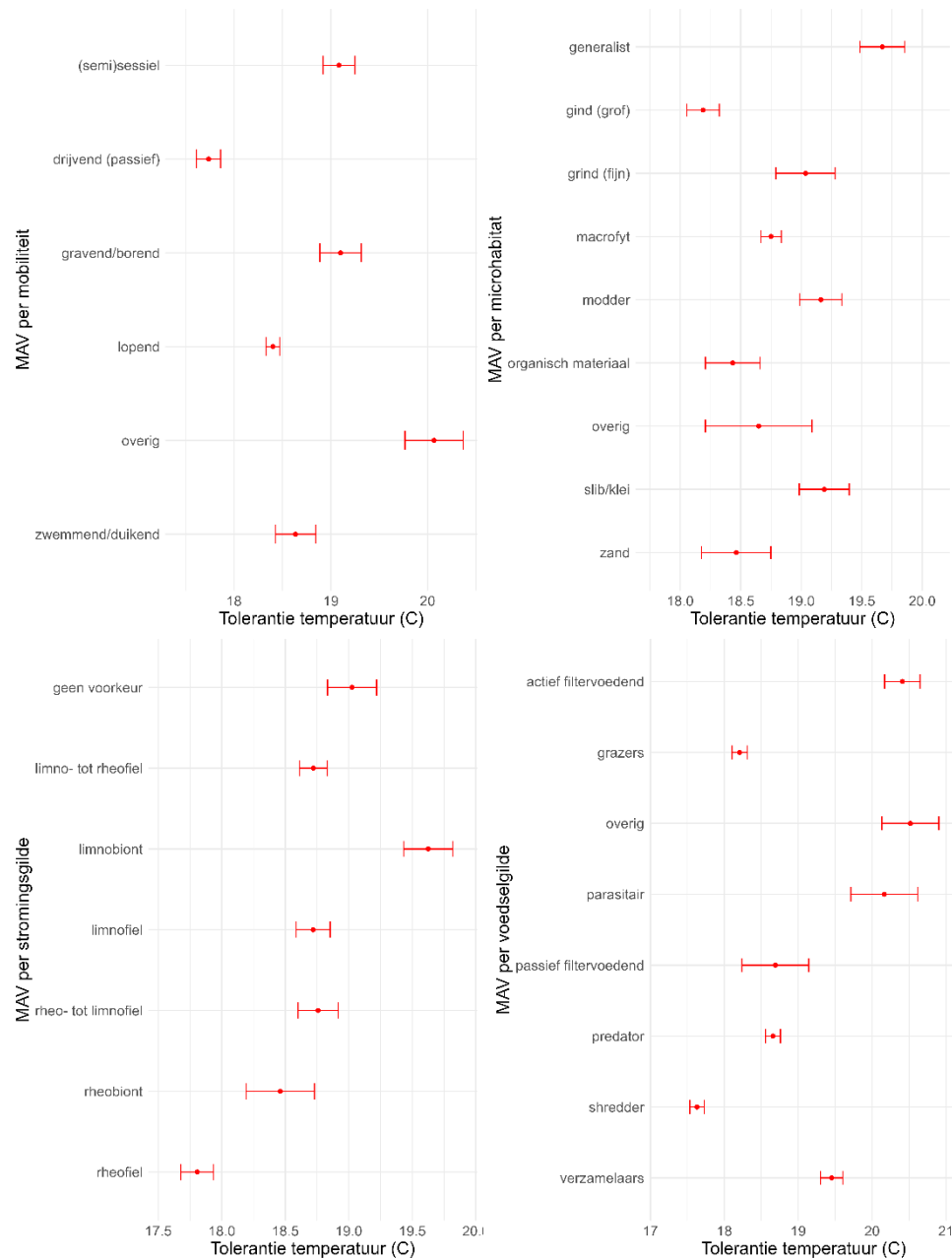
Net als bij fytoplankton kunnen hogere temperaturen resulteren in een versnelde groei, verder versterkt door de vroegere start van het groeiseizoen, met gedempte temperatuurflictuaties binnen de vegetatie bij de bodem. Schaduwwerking door de planten dempt de opwarming tussen en onder de planten, waarmee de gradiënt wordt versterkt. Terwijl onbegroeide ondiepten relatief sterk opwarmen, zorgen deze vegetaties dus voor een relatief koel habitat, waarbij deze kunnen dienen als refugium voor allerlei ongewervelden en visbroed.



Figuur 3.2.2.1 Maximum temperatuurtolerantie (95% betrouwbaarheidsinterval) functionele planten groepen op basis van a) levensduur, b) groeivorm ten opzichte van waterstand of c) morfologie. Het rode interval geeft de verdeling van maximumtoleranties aan. Bij temperaturen hoger dan het begin (links) van het maximuminterval zal een deel van de soorten binnen de gilde niet voor kunnen komen.

Evertebraten

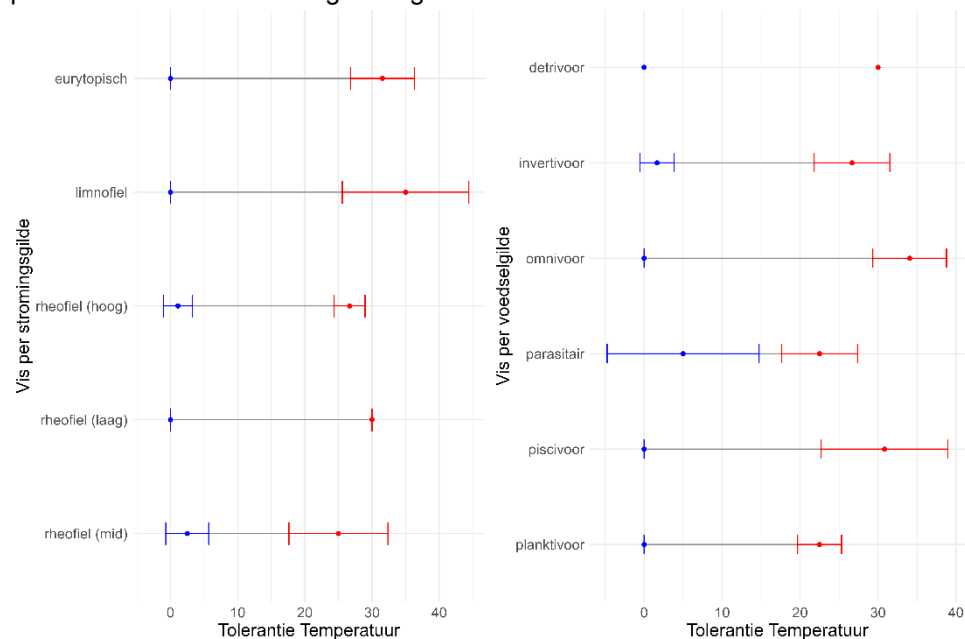
Onder de ongewervelden zijn de stroming minnende en stroming gebonden soorten relatief gevoelig (Figuur 3.2.2.2). Deze zullen onder druk staan wanneer stroming afneemt en temperatuur- en zuurstofstratificatie in toenemende mate plaatsvindt. Wat betreft locomotie zijn met name de passief zwevende en over de bodem lopende soorten gevoelig zoals kieuwpotigen en haftenlarven. Dat de bodemdieren gevoelig zijn is ook zichtbaar uit de verdeling op basis van microhabitat. Met name de soorten op grof grind en organisch materiaal zijn gevoelig zijn. Op basis van de voedingsgilde zijn dat grazers, shredders, passief filter voedende soorten of predatoren. Al met al lijken de lagere trofische niveaus, zoals detrivoren en filtervoeders, disproportioneel gevoelig, met name in de (snel) stromende wateren. In combinatie met veranderingen in de productie van waterplanten kan de positie van plantenminnende soorten sterker worden.



Figuur 3.2.2.2 Maximum temperatuurtolerantie (95% betrouwbaarheidsinterval) functionele groepen ongewervelden op basis van a) mobiliteit, b) microhabitat, c) voorkeur voor stroming of d) voedselgilde. Het rode interval geeft de verdeling van maximumtoleranties aan. Bij temperaturen hoger dan het begin (links) van het maximuminterval zal een deel van de soorten binnen de gilde niet voor kunnen komen.

Vissen

Binnen de vissoorten zijn de stroming minnende en stroming gebonden soorten eveneens relatief gevoelig voor hoge temperaturen (Figuur 3.2.2.3). Ook zijn de plankton etende soorten en parasitaire soorten relatief gevoelig.



Figuur 3.2.2.3 Temperatuurtolerantie (95% betrouwbaarheidsinterval) functionele visgroepen op basis van a) stromingsgilde of b) voedselgilde adult. Het rode interval geeft de verdeling van maximumtoleranties aan, het blauwe interval de minimumtoleranties. Bij temperaturen hoger dan het begin (links) van het maximuminterval zal een deel van de soorten binnen de gilde niet voor kunnen komen.

Gemeenschappen

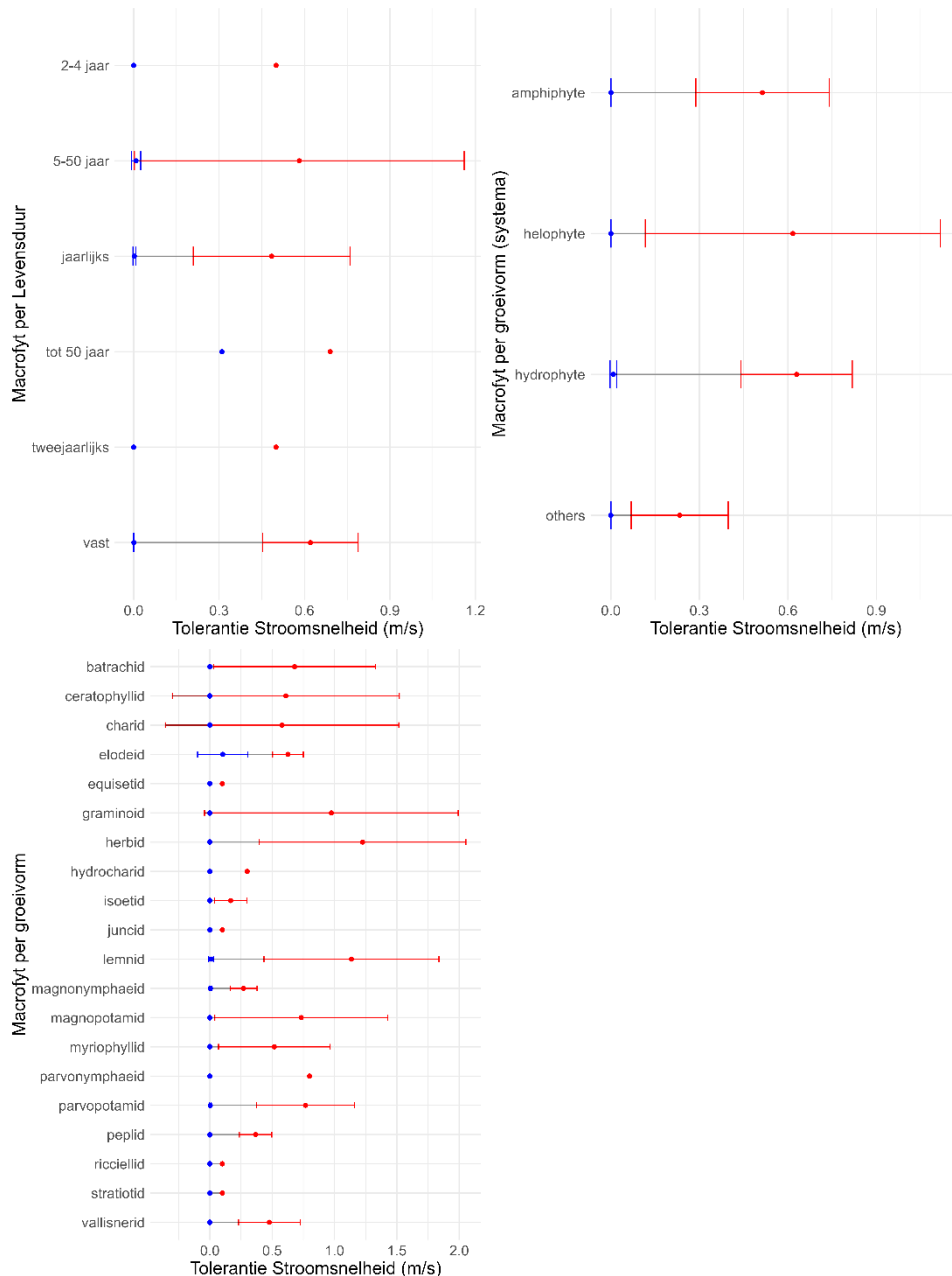
De lagere trofische niveaus voor met name de stromende wateren zijn gevoelig voor temperatuurstijging. Hierbij zullen eerst de filtervoedende en detritivore ongewervelden en planktivore vissoorten verdwijnen (Figuur 3.2.2.3). De algen en bacteriën krijgen hierdoor meer ruimte waardoor algenbloei en door algen veroorzaakte verstikking van macrofyten kan ontstaan. Dit kan door de temperatuur en de daaruit volgende stratificatie worden verhevigd. Bij verdere stijging zullen ook de predatore evertebraten en invertivore vissoorten afnemen wat verdere trofische cascades kan veroorzaken. En de gemeenschap laat verschuiven naar een systeem gedomineerd door dipteren, kevers en wantsen.

3.2.2.2 Verdroging

Stromingssnelheid

Macrofyten

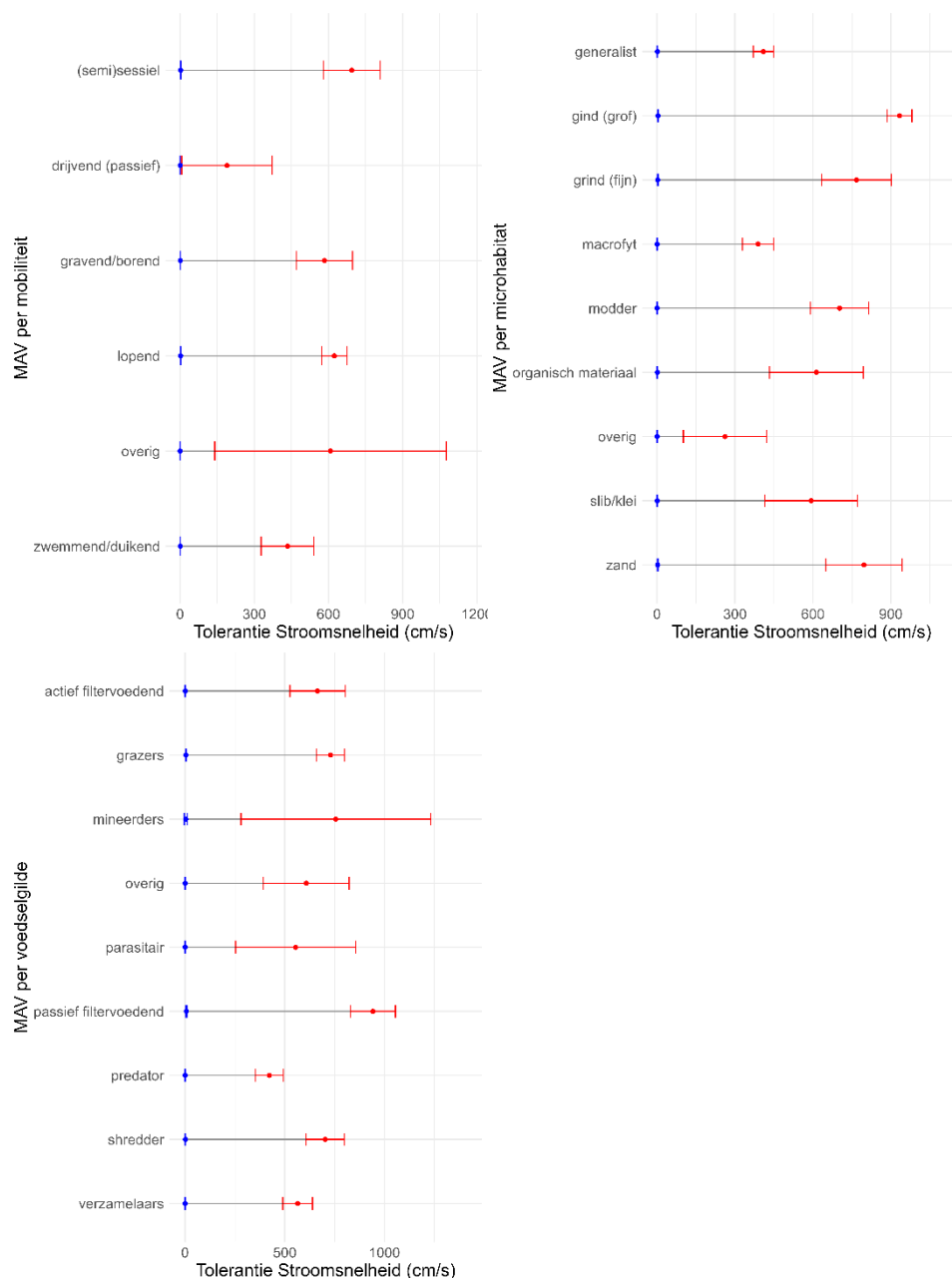
Hoge stroomsnelheden zijn onder de macrofyten vooral een selectieve druk tijdens het vestigen, waarbij enkele soort(groep)en zich gespecialiseerd hebben in het koloniseren van snelstromende wateren. Ondanks dat afname van stroomsnelheid waarschijnlijk geen directe drukfactor voor deze groep zal zijn kunnen indirecte effecten, zoals verandering in chemie en toenemende concurrentie vanuit de eurytope en limnofiele soorten toch leiden tot achteruitgang van deze specialistische soorten (Figuur 3.2.2.4). Hierbij kunnen helofyten en drijfplanten toenemen, terwijl de stromingsgebonden soorten dus afnemen. Wat morfologie betreft zijn vooral de grasachtigen (graminoid), kroosachtigen (lemnid) en varens (herbid) gevoelig.



Figuur 3.2.2.4 Stroomingstolerantie (95% betrouwbaarheidsinterval) functionele planten groepen op basis van a) levensduur, b) groeivorm ten opzichte van waterstand of c) morfologie. Het rode interval geeft de verdeling van maximumtoleranties aan, het blauwe interval de minimumtoleranties. Bij stroomsnelheden hoger dan het begin (links) van het maximuminterval zal een deel van de soorten binnen de gilde niet voor kunnen komen.

Evertebraten

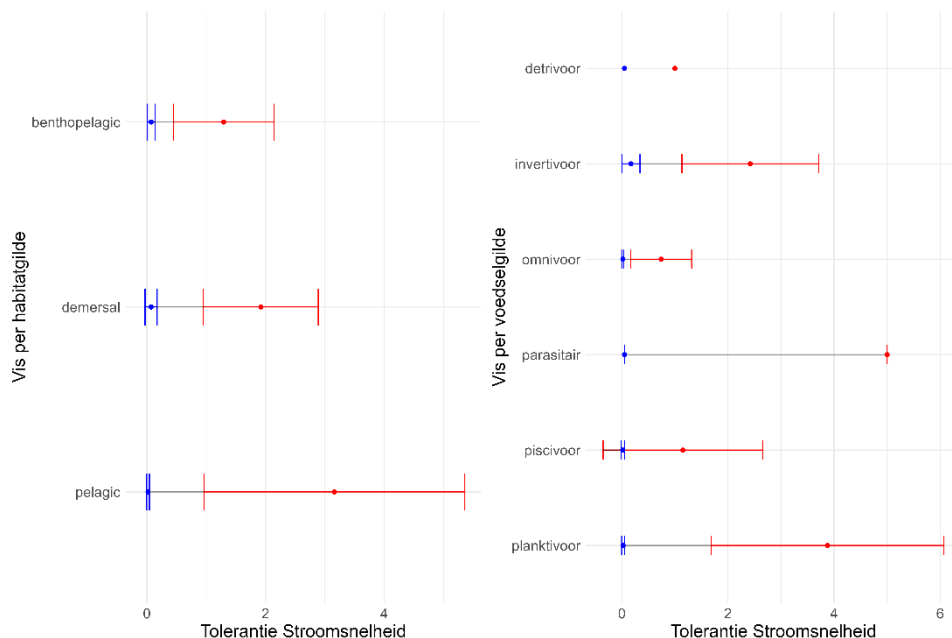
Onder de ongewervelden zijn de sedentaire en (over de bodem) lopende soorten met name typerend voor afnemende stroomsnelheden (Figuur 3.2.2.5). Wat betreft microhabitat komt dit overeen met rivierbedding (grind en zand). Op basis van voedselgilde zijn met name de (passieve) filtervoeders en mineerders typerend voor hoge strooming, gevolgd door de grazers en shredders. Deze groepen kunnen eveneens weggeconcentreerd worden wanneer de strooming vermindert.



Figuur 3.2.2.5 Stromingstolerantie (95% betrouwbaarheidsinterval) functionele groepen ongewervelden op basis van a) mobiliteit, b) microhabitat of d) voedselgilde. Het rode interval geeft de verdeling van maximumtoleranties aan, het blauwe interval de minimumtoleranties. Bij stroomsnelheden hoger dan het begin (links) van het maximuminterval zal een deel van de soorten binnen de gilde niet voor kunnen komen.

Vissen

Onder de vissen zijn met name de pelagische soorten gevoelig voor vermindering in stroming en daaruit volgende concurrentie (Figuur 3.2.2.6). Op basis van voedselgilde zijn met name planktivore en parasitaire vissoorten afhankelijk van stroming, gevolgd door de invertivore vissoorten.



Figuur 3.2.2.6 Stromingstolerantie (95% betrouwbaarheidsinterval) functionele visgroepen op basis van a) verticaal habitat of b) voedselgilde adult. Het rode interval geeft de verdeling van maximumtoleranties aan, het blauwe interval de minimumtoleranties. Bij stroomsnelheden hoger dan het begin (links) van het maximuminterval zal een deel van de soorten binnen de gilde niet voor kunnen komen.

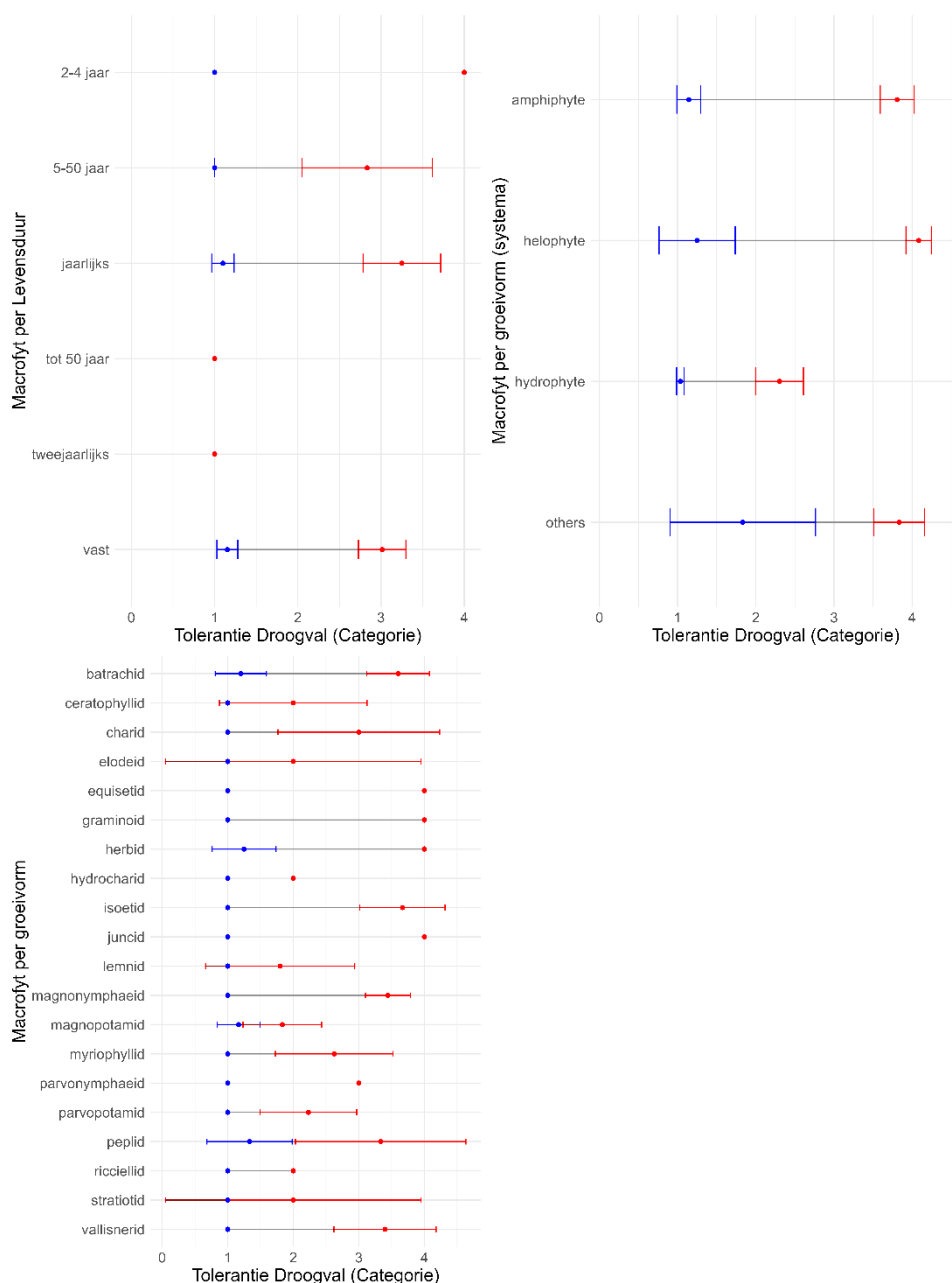
Gemeenschappen

De lagere trofische niveaus zijn met name gevoelig voor vermindering in stroming. Hierbij zullen eerst de meerjarige planten, filtervoedende en minerende ongewervelden en planktivore vissoorten verdwijnen. De algen en bacteriën krijgen meer ruimte wat gecombineerd met stratificatie tot algenbloei en door algen veroorzaakte verstikking van macrofyten kan leiden. Bij verdere daling in stroming zullen ook de detrivore ongewervelden en invertivore vissoorten afnemen wat verdere trofische cascades kan veroorzaken. Als de daling in stroomsnelheid niet gepaard gaat met een hoge temperatuurstijging kan de gemeenschap verschuiven naar een vorm typisch voor langzaam stromende tot stilstaande wateren.

Droogval

Macrofyten

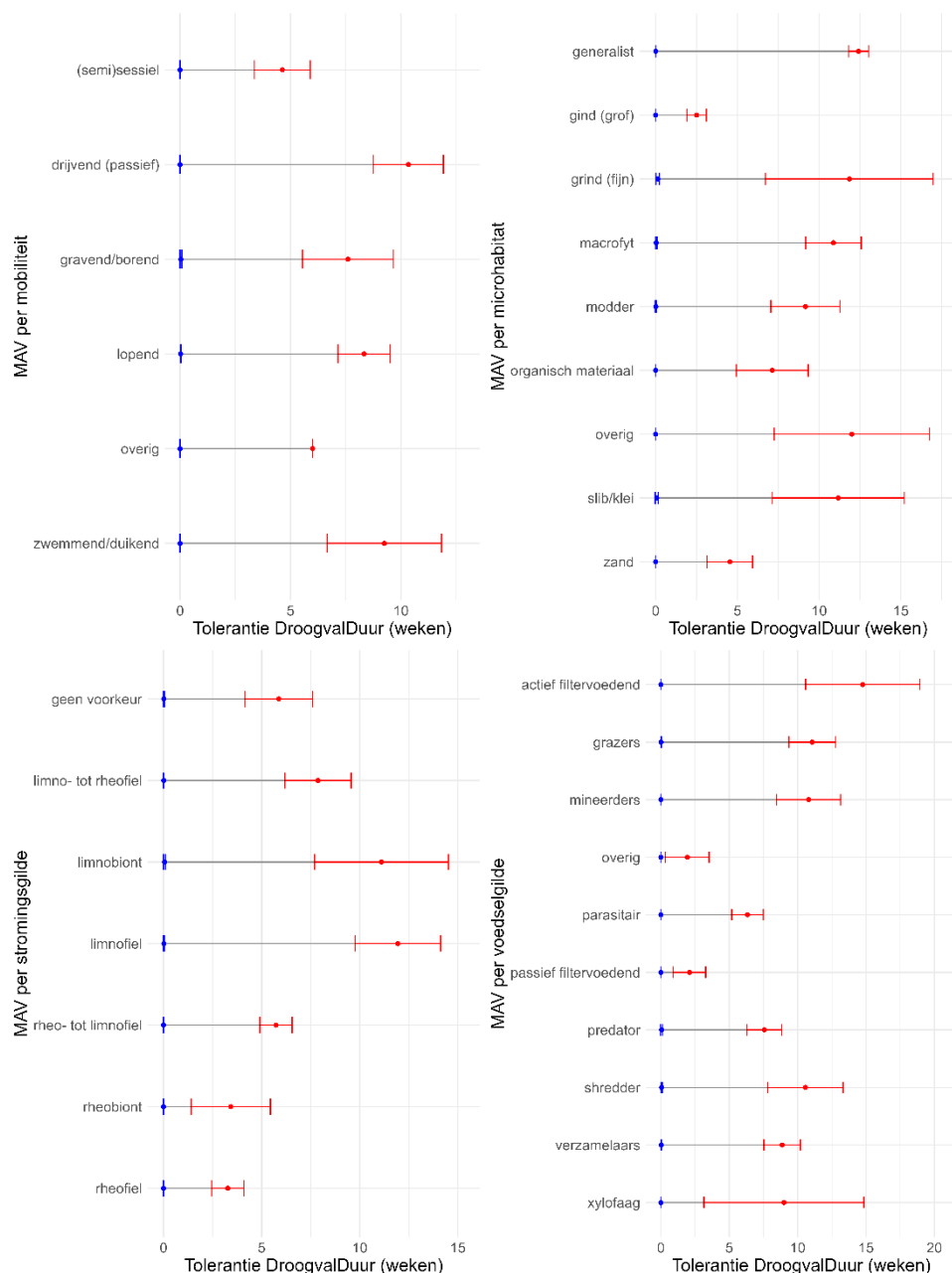
Met name de vaste planten zijn gevoelig voor droogval (Figuur 3.2.2.7). Dit lijkt gepaard te gaan met de helofyten en moerassoorten. Wat betreft morfologie zijn met name de groeivormen aan de oever of het oppervlak gevoelig, zoals drijfbladplanten (batrachid), charofyten (charid; kranswieren), kattenstaarten (peplid) en biesvaren (isoetid).



Figuur 3.2.2.7 Tolerantie droogval (95% betrouwbaarheidsinterval) per functionele planten groep op basis van a) levensduur, b) groeivorm ten opzichte van waterstand of c) morfologie. Het rode interval geeft de verdeling van maximumtoleranties aan, het blauwe interval de minimumtoleranties. Bij droogval langer dan het begin (links) van het maximuminterval zal een deel van de soorten binnen de gilde niet voor kunnen komen.

Evertebraten

Onder de ongewervelden zijn met name de sessiele en gravende soorten gevoelig (Figuur 3.2.2.8). Op basis van microhabitat en stromingsgilde betreft dit de aan stroming gebonden soorten op grind, zand gevolgd door organisch materiaal. Vooral de evertebraat soorten die passief filtervoeden, zich voeden met hout of predator zijn, zijn gevoelig voor droogval.



Figuur 3.2.2.8 Tolerantie droogval (95% betrouwbaarheidsinterval) in weken per functionele groep ongewervelden op basis van a) mobiliteit, b) microhabitat, c) voorkeur voor stroming of d) voedselgilde. Het rode interval geeft de verdeling van maximumtoleranties aan, het blauwe interval de minimumtoleranties. Bij droogval langer dan het begin (links) van het maximuminterval zal een deel van de soorten binnen de gilde niet voor kunnen komen.

Vissen

Voor de verschillende functionele groepen van vis is geen verschil gevonden op basis van tolerantie voor droogval. Deze zijn allen niet tolerant.

Gemeenschappen

Met name de (meerjarige) plant en diersoorten aan het oppervlak of in ondiep water zijn gevoelig voor droogval. In stromend water zullen eerst de aan stroming gebonden soorten verdwijnen als gevolg van de afnemende rivieraanvoer. In geval van daadwerkelijke droogval zullen eerst de vissen, drijf- en moerasplanten en sessiele, filtervoedende evertrebraten verdwijnen. Met de oevervegetatie gaat een belangrijk (broed)habitat verloren. De vermindering in waterzuivering

door de achteruitgang van de filtervoeders zal voor een versterking van algenbloei zorgen wat gecombineerd met stratificatie tot algenbloei en door algen veroorzaakte verstikking van macrofyten kan leiden. Bij voldoende bronpopulaties kan deze verstoring tot een toename van pionierssoorten leiden, wat in combinatie met het verlies aan vissoorten een toename aan dipteren kan betekenen.

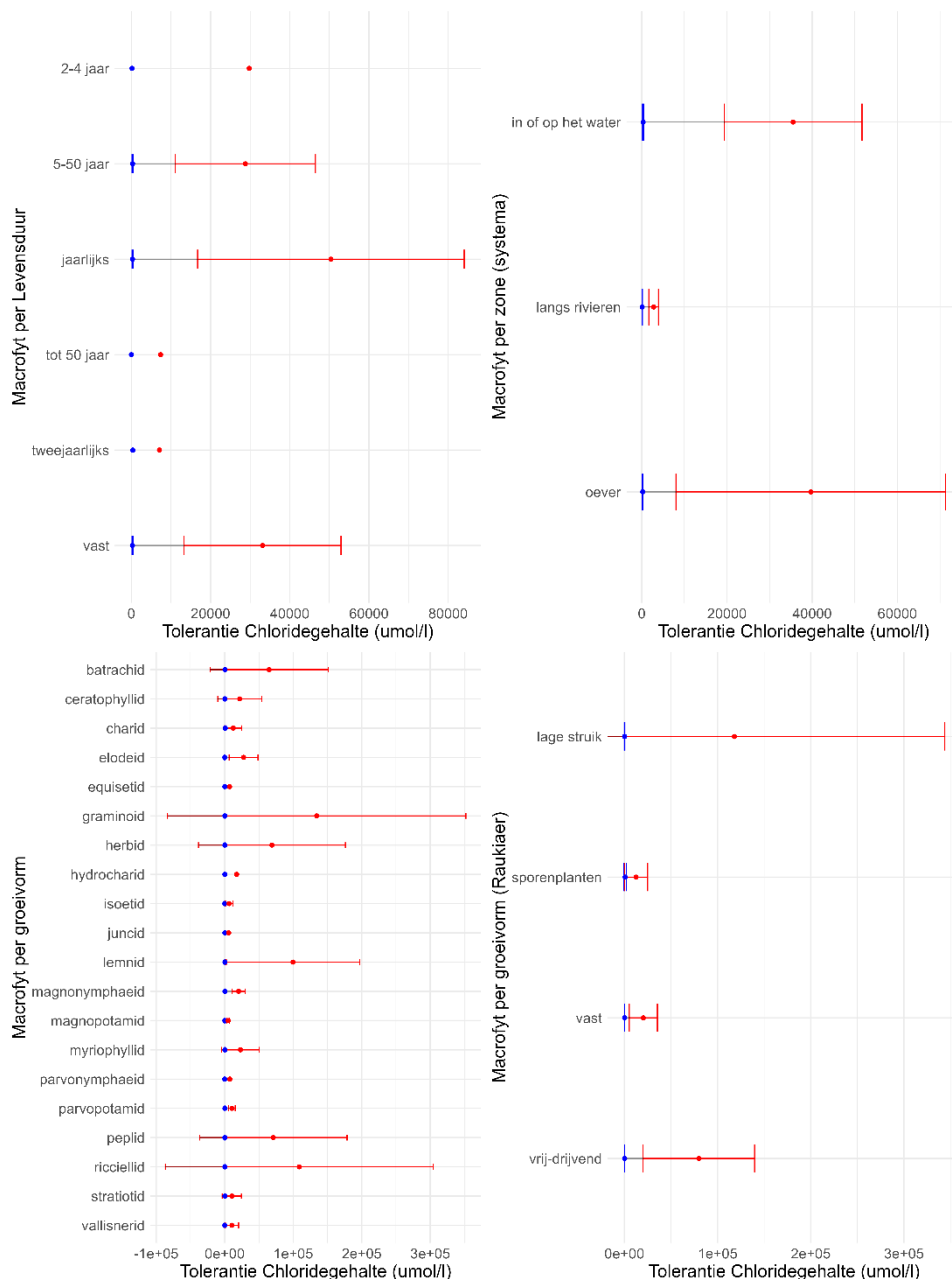
3.2.2.3 Overige parameters

Enkele drukfactoren, hoewel relevant, zijn lastiger te duiden. Zo is informatie over verzilting in kleinere en tijdelijke oppervlaktewateren vrijwel niet beschikbaar. Dit maakt het lastig om prognoses te geven voor de kleinere wateren. Ook zijn interacties zoals met toxische druk lastig te ontkoppelen en is er ook weinig informatie over indirecte effecten zoals ecologische cascades en fenologie. Hieronder worden deze parameters kort toegelicht.

3.2.2.4 Verzilting

Macrofyten

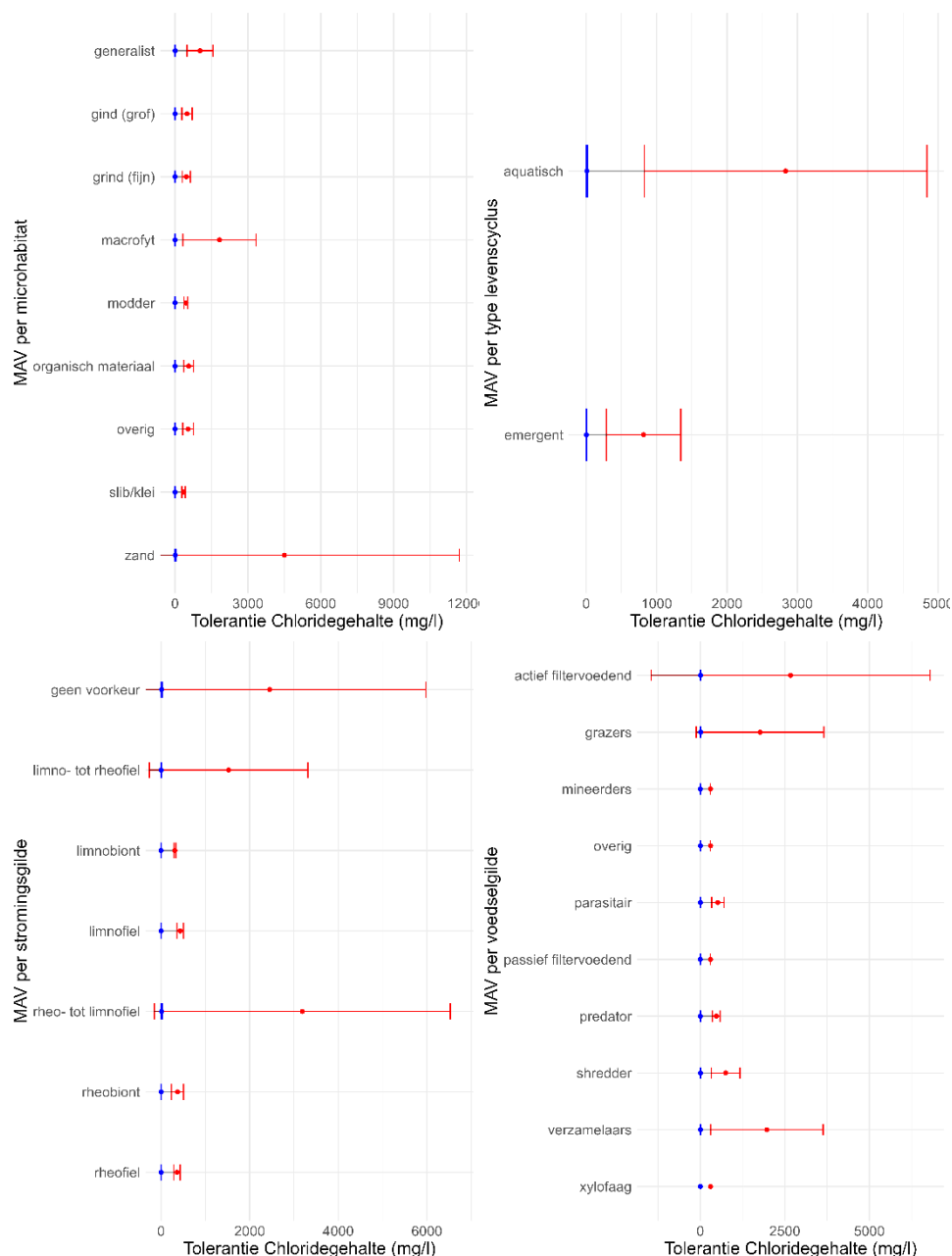
Onder de plantensoorten is een grote verscheidenheid aan groeivormen minder tolerant (Figuur 3.2.2.9). Hieronder vallen met name de vaste- en sporenplanten langs rivieren.



Figuur 3.2.2.9 Chloridetolerantie functionele planten groepen op basis van a) levensduur, b) groeivorm ten opzichte van waterstand, c) groeivorm per morfologie of d) Raunkiaer groeivorm. Het rode interval geeft de verdeling van maximumtoleranties aan, het blauwe interval de minimumtoleranties. Bij chloridegehalten hoger dan het begin (links) van het maximuminterval zal een deel van de soorten binnen de gilde niet voor kunnen komen.

Evertebraten

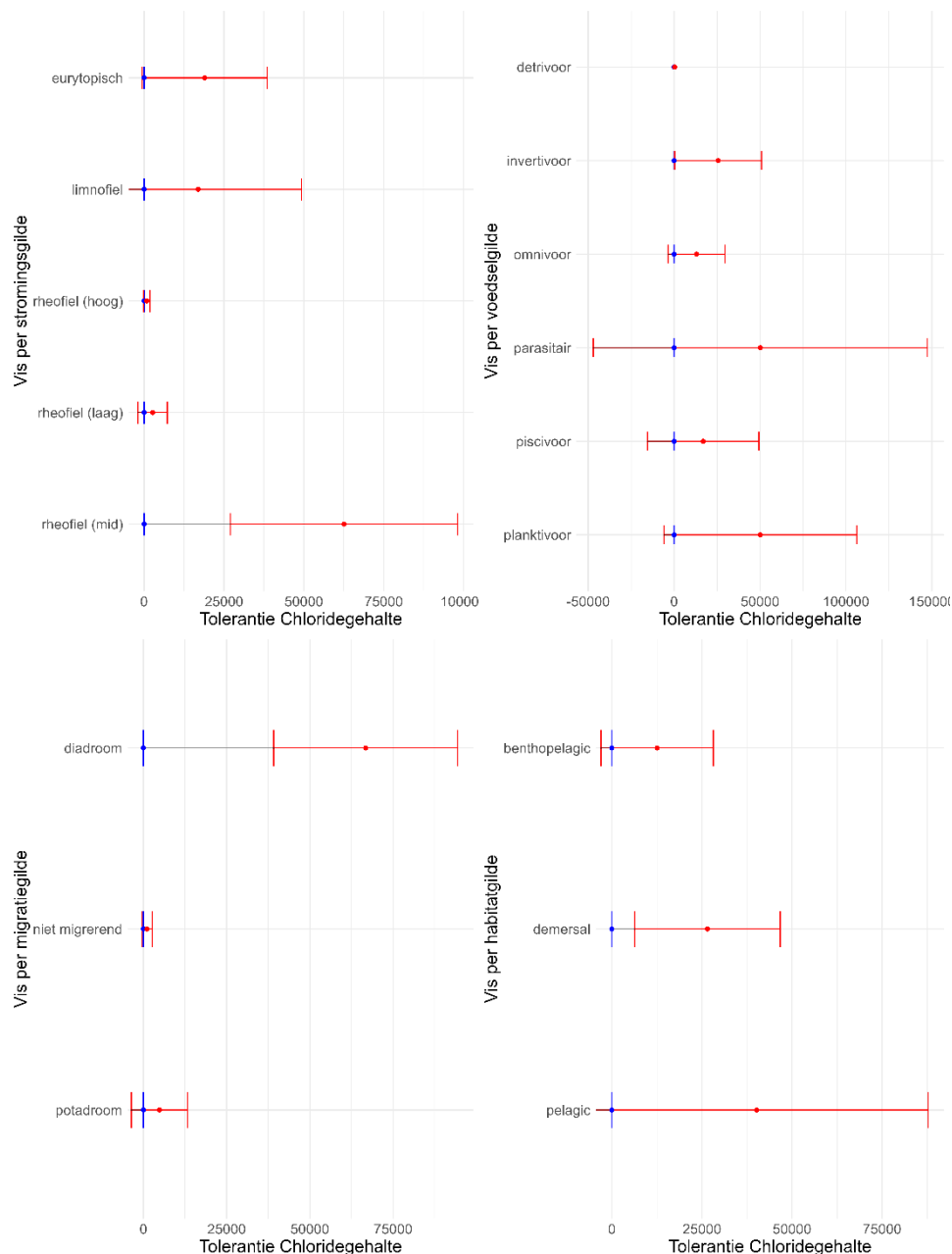
Ook onder de ongewervelden is een groot deel niet aangepast aan hogere chloridegehalten (Figuur 3.2.2.10). Met name de emergente soorten zijn relatief gevoelig, waardoor de verbinding met het terrestrische voedselweb onder druk kan komen te staan. Zowel specialisten gebonden aan stromend of stilstaand water zijn gevoelig. Deze zijn verdeeld over een groot deel van de (micro)habitats en voedselgildes.



Figuur 3.2.2.10 Chloridetolerantie functionele groepen ongewervelden op basis van a) mobiliteit, b) emergentie, c) voorkeur voor stroming of d) voedselgilde. Het rode interval geeft de verdeling van maximumtoleranties aan, het blauwe interval de minimumtoleranties. Bij chloridegehalten hoger dan het begin (links) van het maximuminterval zal een deel van de soorten binnen de gilde niet voor kunnen komen.

Vissen

Binnen de vissoorten zijn met name de soorten gebonden aan hoge en lage stroming gevoelig (Figuur 3.2.2.11). Qua voedselgilde komt dit met name neer op de lagere trofische niveaus. Voor de ruimtelijke verspreiding gaat het met name om de niet migrerende benthische soorten.



Figuur 3.2.2.11 Chloridetolerantie (µmol/L) functionele visgroepen op basis van a) stromingsgilde, b) voedselgilde adult, c) migratiegilde of d) verticale verspreiding. Het rode interval geeft de verdeling van maximumtoleranties aan, het blauwe interval de minimumtoleranties. Bij chloridegehalten hoger dan het begin (links) van het maximuminterval zal een deel van de soorten binnen de gilde niet voor kunnen komen.

3.2.2.5 Interacties

Fenologie

“Mismatches” in de timing van ecologische processen kunnen optreden wanneer prooi en predator op verschillende manieren reageren op stuurparameters (daglengte versus temperatuur). Zo is spiering erg gevoelig voor temperatureffecten. Hierdoor kan de verandering in de opbouw van het seizoen leiden tot verschillen tussen het groeiseizoen en de paai van spiering, waardoor vislarven onvoldoende voedsel vinden, omdat dit simpelweg nog niet beschikbaar is. Ook ruimtelijke veranderingen spelen een rol. De noordelijke, visetende eenden Nonnetje en Grote Zaagbek, die vroeger in grote aantallen in het IJsselmeergebied

overwinterden, nemen in Nederland af, enerzijds omdat de Oostzee geschikter wordt als overwinteringsgebied door de afnemende ijsvorming, anderzijds door de afname van spiering.

Deze aspecten zijn ook relevant bij de implementatie van maatregelen. Zo kunnen maatregelen tegen bijvoorbeeld zout indringing (sluiten kier Haringvliet), de connectiviteit verslechteren. Hierdoor kan visintrek worden belemmerd, evenals de ontwikkeling van brakke overgangszones. Verschuivingen in de timing van spui kunnen een mismatch veroorzaken met de paaidrang van de verschillende soorten, waardoor het voortplantingssucces kan afnemen.

Cascades

Wanneer de beschikbaarheid van een soort af- of toeneemt en haar interacties niet voldoende ondervangen kunnen worden door de rest van de gemeenschap kan een hiërarchische opeenstapeling van veranderingen in gemeenschapssamenstelling plaatsvinden, ofwel een ecologische cascade. Zo kan blijvende algenbloei leiden tot omslagen in aquatische ecologie en diversiteit, door ineenstorting van ondergedoken vegetatie en de daarbij behorende fauna.

Massale sterfte van vis of bodemfauna kan leiden tot omslagen in soortensamenstelling van de desbetreffende gemeenschap en tijdelijke voedselschaarste (vogels; Figuur 3.2.2.12). Wanneer sleutelsoorten zoals biobouwers, dominante prooi(vis)soorten of toppredatoren verloren gaan kan dit leiden tot een permanente (langdurige) verschuiving in soortgemeenschap (Figuur 3.2.2.13), vooral in combinatie met andere drukfactoren zoals verandering in voedselrijkdom, bodemdaling en verontreiniging.

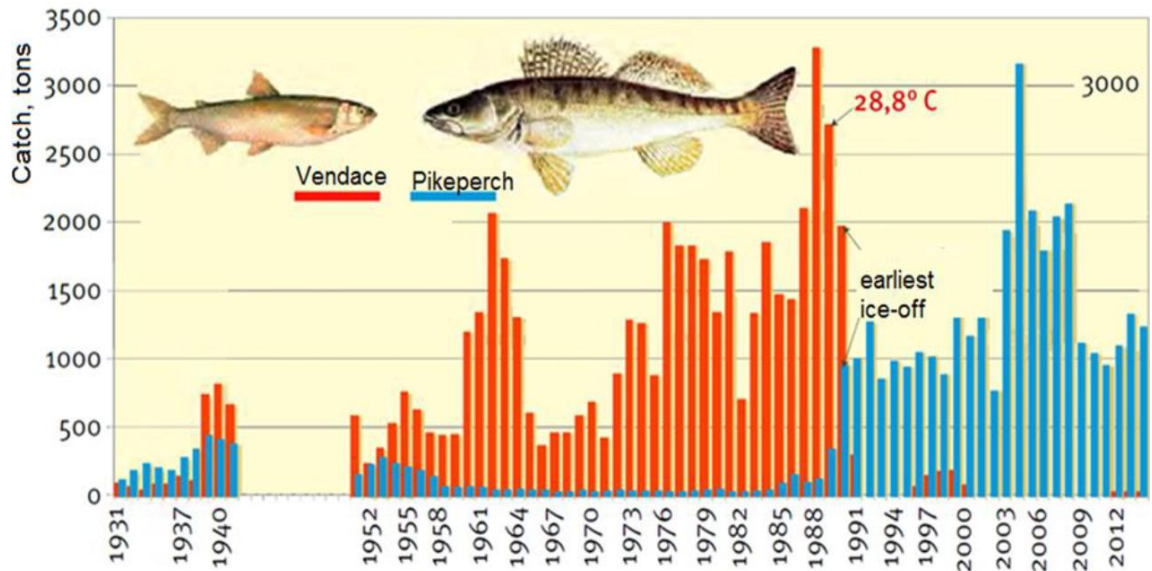
Ongebruikelijke massasterfte onder zeekoeten en alken (en het is geen vogelgriep): 'Het gaat iedere dag harder'

Goos Bies · 12 oktober 2023, 15:51 · Ameland

Deel dit artikel [f](#) [t](#) [i](#) [e](#)



Figuur 3.2.2.12 Persbericht over massale sterfte van Alken en Zeekoeten, gerelateerd aan de extreem hoge temperaturen in de Noordzee (Leeuwarder Courant, NIOZ).



Figuur 3.2.2.13 Permanente verschuiving in de visgemeenschap van het Peipsi-meer in Estland als gevolg van massale sterfte van koudwater-prooivis (Kleine Marene) en overname door warmwater-predator (Snoekbaars) door extreem hoge voorjaarsstemperaturen in 1990 (Kangur & Kanbur 2014; Kangur et al. 2018).

Interacties en toxische druk

Klimaat effecten haken via directe (temperatuur en verziltingseffecten) en indirecte (voedselschaarste) weg aan op allerlei andere processen. Zo is het bekend dat temperatuur, door het beïnvloeden van metabolisme en het energiebudget, organismen ook gevoeliger maakt voor een brede reeks aan toxicanten (Heugens et al., 2001). Dit kunnen natuurlijke toxicanten zijn zoals cyanotoxines (uit algenbloei), of chloride (uit verzilting), maar ook verontreiniging uit zware metalen, of pesticiden. Deze laatste groep kan eveneens in invloed toenemen doordat verdroging tot hogere uitspoeling vanuit landbouw kan leiden. Het afzonderlijk beoordelen van de verschillende klimaatdrukfactoren en overige drukfactoren, zal dan ook leiden tot een onderschatting van ecologische effecten.

3.3 Conclusies en aanbevelingen

3.3.1 Conclusie

Veranderingen in temperatuur, stroomsnelheid, verblijftijd en droogval, en de onderlinge interacties, leiden tot een verstoring van de ecologische gemeenschappen. Het merendeel van deze effecten raakt de lagere trofische niveaus waardoor omslag naar algenbloei kan ontstaan. In het meest gunstige geval vindt er kolonisatie door andere inheemse soorten plaats, en daarmee een (tijdelijke) verschuiving naar een gemeenschap typerend voor het nieuwe watertype, met lagere stroomsnelheden en verminderde grootte. In het minst gunstige geval betekent dit een overgang naar verlanding of verslechterde diversiteit, toegenomen gevoeligheid voor invasieve soorten en een geheel verlies aan natuurwaarde.

Adaptatie van soorten vindt in eerste instantie plaats door migratie van de plant en diersoorten, hetzij van individuen, hetzij van gemeenschappen. De effectiviteit daarvan hangt af van de mobiliteit van de soort of gemeenschap en de connectiviteit van gebieden met geschikt habitat. Van zeevissen is bekend dat de verspreiding in relatie tot opwarming in noordelijke richting verschuift en/of naar grotere diepte. Trekvogels reageren eveneens met noordwaartse verschuivingen in arealen en verschuivingen in timing van aankomst en vertrek. Soorten die minder mobiel zijn en of meer te maken hebben met continuïteit van habitat reageren ook met verschuivingen, maar langzamer, waardoor zich een "klimatschuld" opbouwt (waardoor deze migratie nog lange tijd voortschrijdt na het eventueel stoppen van opwarming).

Wateren die ook op andere manieren onder druk staan (onderliggend lijden) zijn extra kwetsbaar. Het reduceren van deze drukfactoren (eutrofiering, lage habitatdiversiteit, dynamiek en slechte connectiviteit, overexploitatie etc.) vergroot dus ook de adaptatiecapaciteit ten aanzien van klimaatverandering. Dit is wat wordt onder meer beoogd in de Programmatische Aanpak Grote Wateren. Natuurontwikkelingsprojecten als Marker Wadden zijn mede bedoeld om de desbetreffende watersystemen klimaatrobuuster te maken door het versterken van diversiteit en betere benutting van dynamiek. De aangeraden adaptatiemaatregelen haken hier eveneens op aan (par. 2.6).

3.3.2 Kennisleemtes en discussie

Er ontbreekt nog belangrijke kennis:

1. **Beperkingen gevaarinformatie:** De voorspellingen voor klimatologische en hydrologische veranderingen berust op vaak schaarse en daarom geaggregeerde data uit het verleden, in zowel ruimte als tijd. Hierdoor gaat belangrijke informatie over lokale extremen en interacties verloren. Voor de temperatuurdatabasis zijn de prognoses verder gelimiteerd tot de grote wateren en rivieren, terwijl juist de kleine, ondiepe waterlichamen naar verwachting gevoelig zijn. Schaarste met betrekking tot monitoringsdata die voorspelling bemoeilijkt heeft onder meer betrekking op:
 - a. Beperkte beschikbaarheid van detailgegevens van watertemperaturen en gradiënten daarin over de waterkolom en tussen planten (effecten van beschaduwning)
 - b. Nagenoeg ontbreken van gegevens met betrekking tot seizoensrhythmiciteit van aquatische planten en dieren in relatie tot opwarming (seizoensverlenging en mismatching)
 - c. Ontbreken van monitoring cq registratie van extreme gebeurtenissen zoals massale sterfte
 - d. Beperkte informatie over bepaalde cruciale schakels in het voedselweb, met name zoöplankton
2. **Risico-informatie temperatuurtoleranties ontbreekt:** Er is nog geen kwantitatief inzicht in de gevolgen van temperatuursverandering op Nederlandse macrofyt en evertebraat gemeenschappen en de gevolgen van chloridegehalte op visgemeenschappen. Om deze reden is er gewerkt met data uit andere landen of op basis van categorische in plaats van numerieke data.
3. **Beperkingen Risico-informatie:** De bruikbaarheid van tolerantiedata is altijd beperkt tot de context waarbinnen deze verzameld is. Zo zijn de experimentele omstandigheden vaak een versimpeling van de omstandigheden buiten en wordt er vaak maar een beperkt aantal individuen van een populatie getest. Het gevolg is dat alleen directe impacts kunnen worden beoordeeld. Daarnaast kan er lokale adaptatie hebben plaatsgevonden waardoor de beoordeelde populatie mogelijk meer of minder tolerant is dan de gemiddelde Nederlandse populatie en kunnen de Nederlandse populaties onderling verschillen. Om deze reden is het verstandig om de toleranties relatief van elkaar te beoordelen.

4. **Beperkingen data functionele groepen:** De indeling van functionele groepen voor de verschillende soortgroepen is overgenomen uit een Europese database. Deze data zijn niet voor alle KRW soorten compleet. Het gevolg is dat de extremen van de toleranties in werkelijkheid enigszins af zouden kunnen wijken. Daarnaast zou het voor kunnen komen dat enkele functionele groepen relatief ondervertegenwoordigd zijn in de KRW soortenlijst. Of dit het geval is wordt komend jaar vastgesteld binnen de ontwikkeling van de KRW-verkenner.
5. **De beschreven waterkwaliteitsrisico's geven geen compleet beeld.** De effecten van klimaat op waterkwaliteit worden niet compleet afgedekt door de hier beschreven risico's voor waterkwaliteit: de duur tot herstel, de impacts op het functioneren en effecten op andere sectoren zijn niet goed weergegeven. Deels doordat de impact trajecten van indirecte effecten onduidelijk zijn en deels als gevolg van de beperkingen van de beschikbare data als beschreven in punt 1, 2, 3 en 4.

4 Risico's waterkwaliteit

4.1 Introductie

In onderstaande verkenning zijn de resultaten uit Basisprognose 2018 gebruikt en geanalyseerd per hoofdwater regio (Figuur 3.3.2.1). Om een beeld per hoofdwater regio per beheerder te kunnen geven zijn de PBL-waterlichamen heringedeeld in KRW-clusters voor de Rijkswateren en Regionale wateren (Tabel 4.1.1). Op basis van de verdeling van de KRW-clusters over de hoofdwater regio's is te verwachten dat met name de hoge zandgronden gevoelig zijn voor verdroging en temperatuursveranderingen. Dit omdat deze gebieden het overgrote deel van de ondiepe en langzaam stromende waterlichamen bevatten (Figuur 3.3.2.2 en Figuur 3.3.2.3).

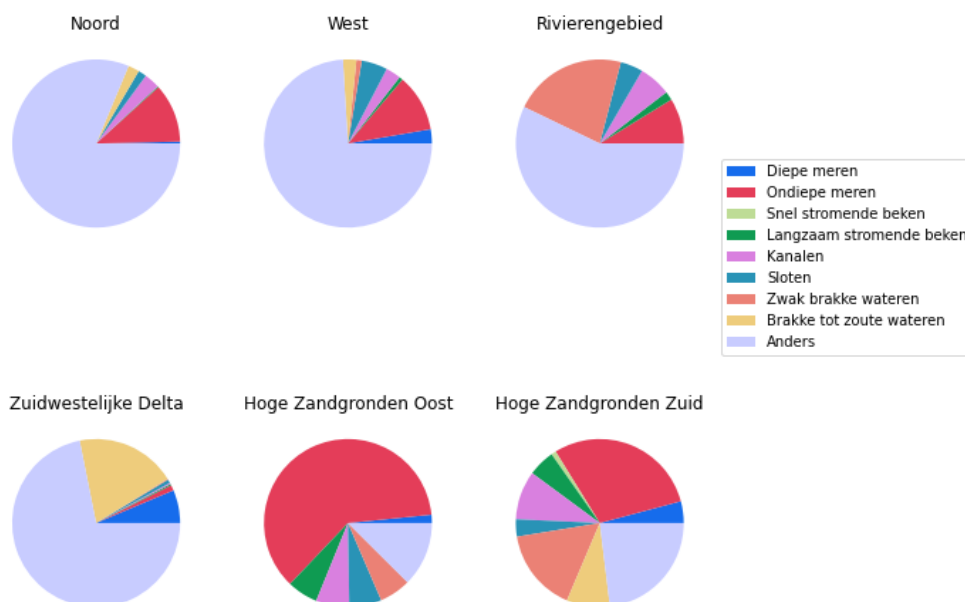


Figuur 3.3.2.1 Zoetwater hoofdregio's (verschillende kleuren + label) met daarin de zoetwater deelregio's zwart omlijnd (links) en de bijbehorende watertypen (rechts) met legenda.

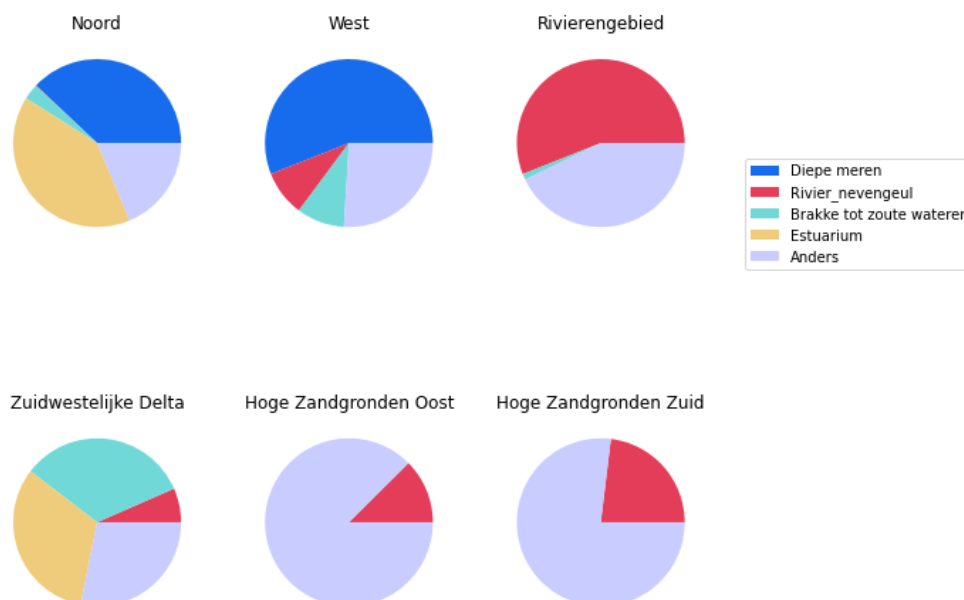
Tabel 4.1.1 Overzicht relatie PBL watertypen met KRW-clusters (Bron: PBL, KRW-verkenner)

Afkorting	PBL watertypen	Rijkswateren	Regionale Wateren
KBS	Beschut kustwater	Estuarium (K2)	NA
MBR	Brakke wateren	NA	Brakke tot zoute wateren (M30-32)
MGD	Grote meren	Diepe meren (M21)	NA
MKA	Kanalen	NA	Kanalen (M3,4,6,7,10)
MKD	Kleine diepe plassen	NA	Diepe meren (M16-18, M24, M28)
MKO	Kleine ondiepe plassen	NA	Ondiepe meren (M11, M22)
MKV	Kleine ondiepe veenplassen	NA	Ondiepe meren (M25)
MMD	Matig grote diepe meren	NA	Diepe meren (M20, M29)
MMO	Matig grote ondiepe meren	NA*	Ondiepe meren (M14, M15, M23, M27)
MSL	Sloten	NA	Sloten (M1, M2, M8, M9)
MVN	Vennen	NA	Ondiepe meren (M12, M13, M26)
MWR	Wateren in het rivierengebied	NA	Zwak brakke wateren (M5, M19)
OTY	Overgangswateren	Brakke tot zoute wateren (O2)	NA
RBL	Langzaam stromende wateren	NA	Langzaam stromende beken (R3-5, R11, R12)
RBS	Snelstromende wateren	NA	Snelstromende beken (R9, R10, R13, R14, R17, R18)
RMB	Riviertje	NA	Langzaam stromende beken (R6)
RRS	Snelstromende rivier	Rivier/nevengeul (R16)	NA
RRV	Langzaam stromende rivier	Rivier/nevengeul (R7, R8)	NA

* MMO zijn origineel in de KRW-clusters ingedeeld bij zowel regionale wateren (hoofdzakelijk) en Rijkswateren (incidenteel). Om overlap te voorkomen wordt in deze analyse uitgegaan dat MMO alleen onderdeel uitmaken van de Regionale wateren.



Figuur 3.3.2.2 Oppervlak in procenten aan KRW-watercluster per zoetwater hoofdregio voor de Regionale wateren. De categorie "Anders" verwijst naar wateren in de hoofdwater regio welke onderdeel zijn van de Rijkswateren.

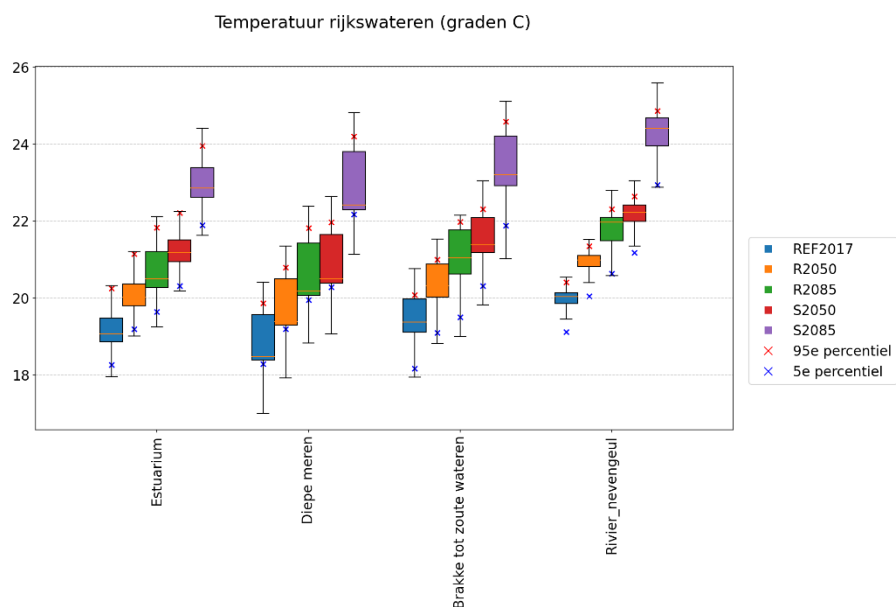


Figuur 3.3.2.3 Oppervlak in procenten aan KRW-watercluster per zoetwater hoofdregio voor de Rijkswateren. De categorie "Anders" verwijst naar wateren in de hoofdwaterv regio welke onderdeel zijn van de Regionale wateren.

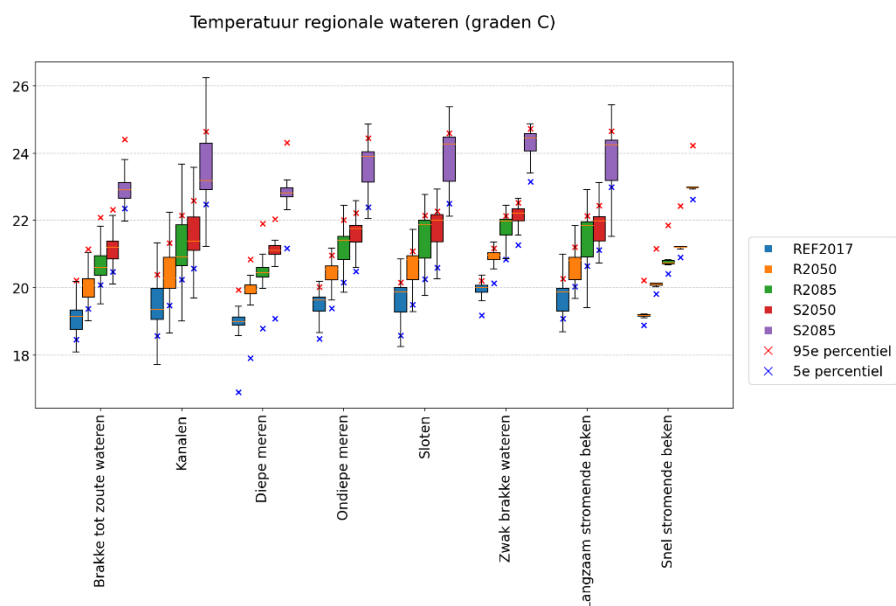
4.2 Klimaatdreiging:

4.2.1 Temperatuur

Over alle scenario's speelt een toename van de gemiddelde zomer temperatuur, zowel gemiddeld als 5^e en 95^e percentiel met enige toename in spreiding voor 'Sterk risicoverhogend' (Figuur 4.2.1.1 en Figuur 4.2.1.2). De toename over de KRW watertypen is gelijk voor de KRW-clusters (Appendix B) waarbij de nevengeulen de hoogste temperaturen blijven behalen. Binnen de regionale wateren (Appendix C) behalen de kleine waterlichamen en zwak brakke wateren rondom het rivierengebied de hoogste temperaturen. De toename in Temperatuur is ruimtelijk redelijk gelijk nationaal verspreid en speelt daarmee overal.



Figuur 4.2.1.1 Gemiddelde zomertemperatuur (°C) per KRW-watercluster per scenario voor de Rijkswateren tot 2050. 95% en 5% indicatief voor T1/20 events zijn weergegeven als respectievelijk rode en blauwe kruizen.



Figuur 4.2.1.2 Gemiddelde zomertemperatuur (°C) per KRW-watercluster voor de regionale wateren tot 2050. 95% en 5% indicatief voor T1/20 events zijn weergegeven als respectievelijk rode en blauwe kruizen.

4.2.1.1 Klimaatdreiging(en) contextscenario 'beperkt risicoverhogend'

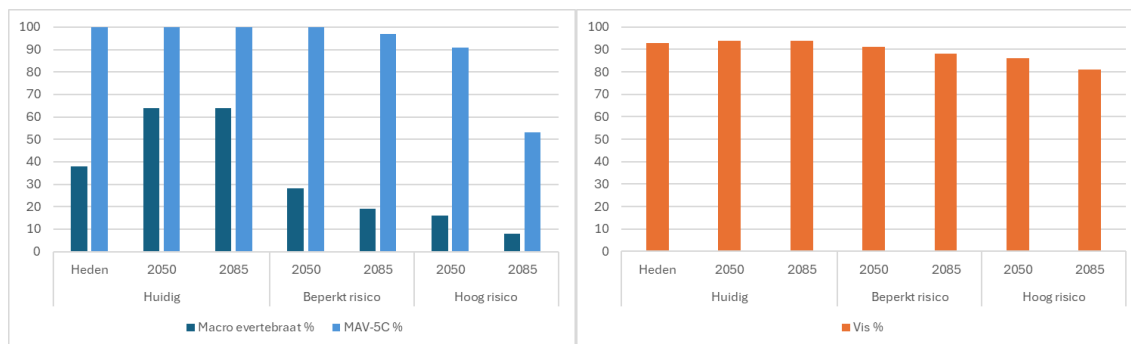
Landelijk wordt er een toename in watertemperatuur aan het oppervlak voorspeld van grofweg 1°C tot 2050 en 2°C in 2085 ten opzichte van 2017. Gemiddeld leidt dit tot zomer watertemperaturen boven de 20°C voor 2050 en 21°C voor 2085. Dit zal vooral invloed hebben aan de oever en het wateroppervlak, waar vooral grassen, paardenstaarten en drijfbladplanten verder onder druk zullen staan. Met name in de ondiepere wateren, waar ook het aantal kwetsbare soorten onder de ongewervelden enigszins toeneemt (Tabel 4.2, Figuur 4.5). Ook is er hiermee een toenemende kans op algenbloei en extreme temperaturen aan het wateroppervlak.

4.2.1.2 Klimaatdreiging(en) contextscenario 'sterk risicoverhogend'

Landelijk is er een toename van grofweg 2,5°C tot 2050, dan versnelling tot 4°C tegen 2085. Gemiddeld leidt dit tot zomer watertemperaturen boven de 21°C voor 2050 en boven de 23°C voor 2085 met uitzondering van de estuaria. S2085 benadert hiermee een sub mediterraan klimaat (Materia et al., 2022), wat overeenkomt met indicator waarde 8 van de Ellenberg schaal. Naar verwachting gaat deze temperatuurstijging gepaard met een toename aan extremen tijdens hittegolven, en dus ook met een toename aan zuurstofloosheid en sterfte incidenten van onder andere vis. Geen van de macrofyten binnen de KRW soortenlijst heeft een voorkeur voor dergelijke temperaturen (Figuur 3.2.2.1). Zelfs de meest tolerante macrofytgroepen zoals de eendenkroos-achtigen (lemnid) en ondergedoken waterplanten als hoornbladachtigen (ceratophylid), waterlelies (magnonymphaeid) en wortelende waterplanten (herbid) zullen hiermee uiteindelijk onder druk staan. Hiermee gaat dus mogelijk een belangrijke bron van voedsel, broedgebied, refugia en structuur verloren. Hiermee zal het aantal vissoorten en evertebraatsoorten dat duurzaam voort kan bestaan verder achteruitgaan, terwijl met name de evertebraten al flink onder druk staan door directe temperatuurseffecten (Tabel 4.2.1 en Figuur 4.2.1.3).

Tabel 4.2.1 Percentage duurzame KRW doelsoorten voor 2124 Macro evertebraatsoorten (links) en 45 vissoorten (rechts) op basis van temperatuurtolerantiecurven. Waarden zijn bepaald op basis van het verwachte landelijk zomergemiddelde voor oppervlaktewatertemperatuur zoals berekend in DP'24. Voor macro-evertebraten zijn eveneens waarden weergegeven gecorrigeerd voor onder in de waterkolom (bij aangenomen gemiddelde stratificatie van 5°C).

		Huidig			Beperkt risico		Hoog risico	
		Heden	2050	2085	2050	2085	2050	2085
Macro evertebraat	%	38	64	64	28	19	16	8
Macro evertebraat - 5°C	%	100	100	100	100	97	91	53
Vis	%	93	94	94	91	88	86	81

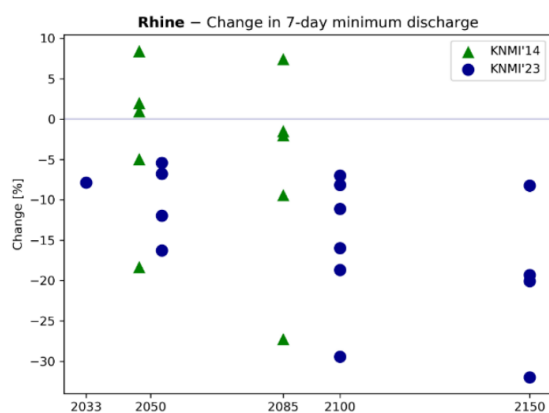


Figuur 4.2.1.3 Percentage duurzame KRW doelsoorten voor Macro evertebraat (links) en vis (rechts) op basis van temperatuurtolerantiecurven. Waarden zijn bepaald op basis van het verwachte landelijk zomergemiddelde voor oppervlaktewatertemperatuur zoals berekend in DP'24. Voor macro-evertebraten zijn eveneens waarden weergegeven gecorrigeerd voor onder in de waterkolom (bij aangenomen gemiddelde stratificatie van 5°C).

4.2.2 Debiet

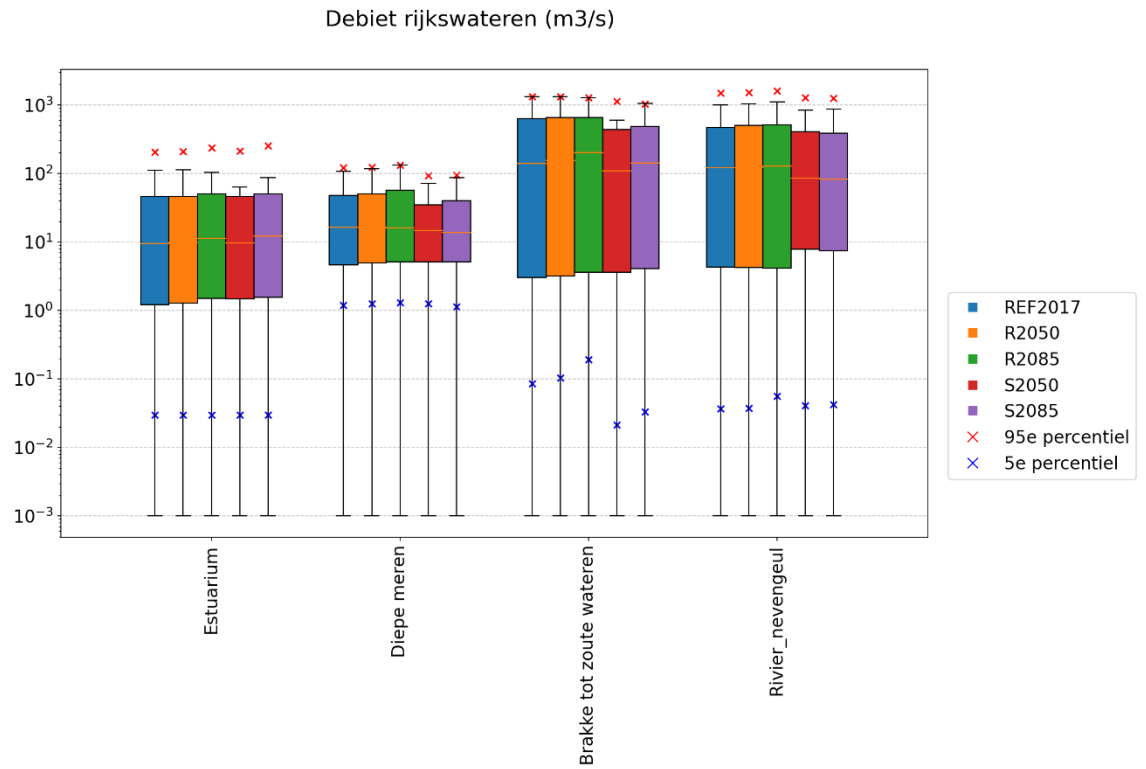
Gemiddeld geven de KNMI'23 scenario's een vergelijkbaar beeld als de 'oude' KNMI'14-scenario's (ter Maat et al., 2024). De kans op extreem laagwater is iets kleiner dan eerder gedacht. Maar, waar bij de gematigde KNMI'14-scenario's nog sprake leek te kunnen zijn van ook een kleine toename van de afvoer in de zomer, wijzen alle KNMI'23-scenario's nu op een afname van de afvoeren in de zomer. De kans op extreme droogte (circa 300 mm neerslagtekort, zoals in de droge jaren 2018 en 2022) neemt wel veel sneller toe dan eerder gedacht.

Zowel de KNMI'14 als de KNMI'23-scenario's projecteren een consistente verandering in de gemiddelde jaarafvoer van de Rijn. De verschillen tussen de scenario's zijn echter groot, waarbij de geprojecteerde toename van de gemiddelde afvoer in de winter groter is dan de geprojecteerde afname in de zomer. Volgens alle KNMI'23-scenario's zal de laagste 7-daagseafvoer afnemen met maximaal 30% (Buitink et al., 2023) (Figuur 4.2.2.1 als indicatie voor Rijn). Dit wordt bevestigd door de land dekkende berekeningen op basis van BP18, waarbij er enige stijging in gemiddeld en maximum zomerdebiet zichtbaar is voor de binnenlandse wateren onder het beperkt risico verhogend scenario. Het sterk risico verhogend scenario laat echter wel een daling in zomerdebiet zien.

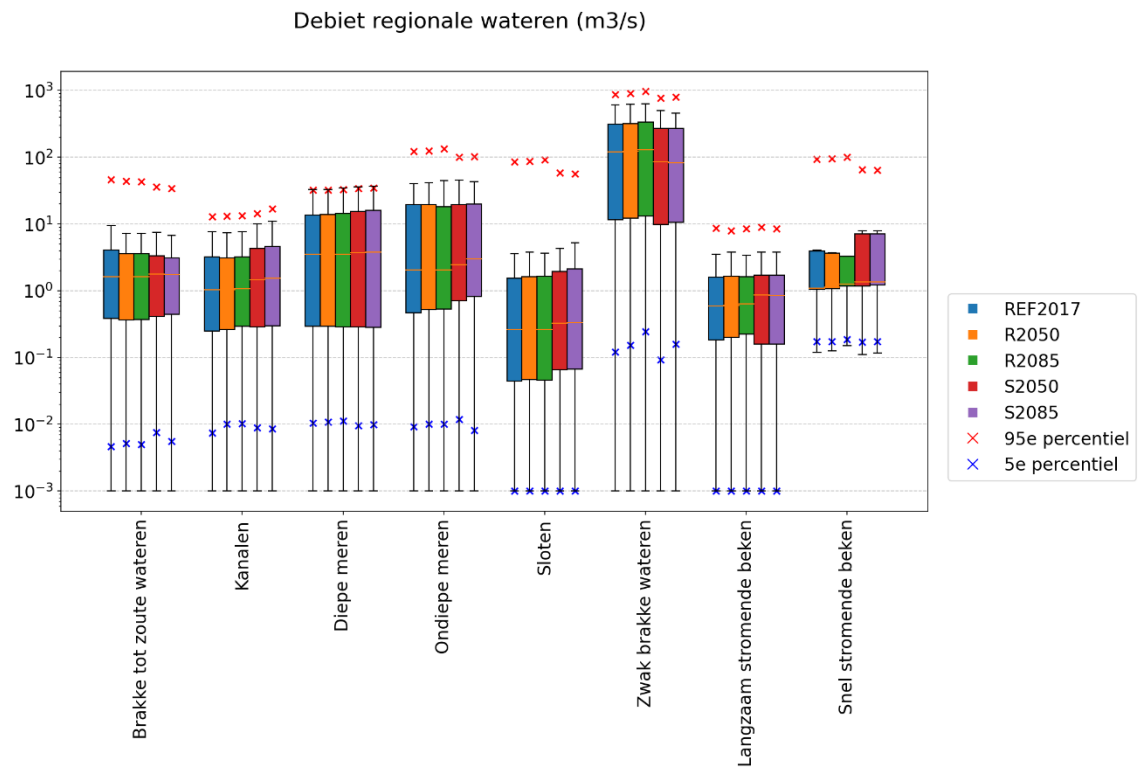


Figuur 4.2.2.1 Geprojecteerde veranderingen (%) in de laagste zevendaagse afvoer voor de Rijn bij Lobith volgens de KNMI'14-scenario's (groen) en KNMI'23-scenario's (blauw) voor de betreffende tijdshorizon. (Bron: ter Maat et al., 2024)

Deze veranderingen worden ondersteund door de landelijke voorspellingen uit BP18, waarbij het beperkt risico verhogend scenario gemiddeld een lichte daling van de verblijftijd voor de meren, sloten, brakke tot zoute wateren en nevengeulen laat zien en een verwaarloosbare stijging voor de snelstromende beken tot 2050. Vervolgens stijgt het debiet voor de brakke tot zoute wateren met ca. 30% (Figuur 4.2.2.2). Voor het sterk risico verhogend scenario treedt een sterk dalend debiet (landelijk ca. 35%) op voor de brakke tot zoute wateren in de Zuidwestelijke delta tot 2050 (Figuur 4.2.2.3; Appendix E). Dit is ook het geval voor de zwak brakke wateren (landelijk ca. 40%) in het rivierengebied en op de hoge zandgronden oost en de nevengeulen (landelijk ca. 40%) in het Rivierengebied en West. De veranderingen zijn proportioneel gelijk voor de gemiddelden en maxima en minima (respectievelijk 95^e en 5^e percentiel). In de periode tot 2085 treedt er herstel van het debiet op voor de brakke tot zoute wateren. Voor de overige waterclusters blijft het gedaalde debiet hetzelfde.



Figuur 4.2.2.2 Gemiddeld zomerdebiet (log-schaal m3/s) per KRW-watercluster voor de Rijkswateren tot 2050. 95% en 5% indicatief voor T1/20 events zijn weergegeven als respectievelijk rode en blauwe kruizen.



Figuur 4.2.2.3 Gemiddeld zomerdebiet (log-schaal m3/s) per KRW-watercluster voor de regionale wateren tot 2050. 95% en 5% indicatief voor T1/20 events zijn weergegeven als respectievelijk rode en blauwe kruizen.

4.2.2.1 **Klimaatdreiging(en) contextscenario ‘beperkt risicoverhogend’**

De veranderingen in debiet blijven beperkt tot (lichte) stijgingen of verwaarloosbare dalingen voor regionale en Rijkswateren. Hierdoor zijn de ecologische effecten naar verwachting gering. De verblijftijd en stroomsnelheden blijven over het algemeen stabiel, wat betekent dat het zelfreinigend vermogen van watersystemen behouden blijft. Nutriëntenopname en zuurstofhuishouding blijven functioneel, en het risico op algenbloei blijft grotendeels onveranderd. Dit betekent echter niet dat er geen aandachtspunten zijn. De bestaande invloeden van een sterk gereguleerd (soms tegennatuurlijk) peil op successie en het gebrek aan zout-zout gradiënten en peilfluctuatie blijven immers ook gelijk.

4.2.2.2 **Klimaatdreiging(en) contextscenario ‘sterk risicoverhogend’**

In het sterk risico verhogende scenario treden aanzienlijke dalingen in debiet op, met name voor brakke tot zoute wateren, zwak brakke wateren en rivier-nevengeulen. Deze afname leidt tot sterkere verzilting, maar ook tot langere verblijftijden en lagere stroomsnelheden, wat de uitspoeling en de verdunning van nutriënten belemmert. Hierdoor neemt de kans op accumulatie van stikstof en fosfaat toe, wat eutrofiëring en algenbloei stimuleert — vooral in stilvallende of stratificerende systemen. Dit brengt risico's mee voor de zuurstofhuishouding, biodiversiteit en waterkwaliteit.

Veranderingen in soortsaamenstelling zijn afhankelijk van de precieze morfologie en substraattype en de daaruitvolgende (verandering in) stroomsnelheden. Gemiddeld genomen zullen initieel de grasachtigen, kroosachtigen en varens achteruitgaan, wat invloed heeft op de beschaduwing en dus de blootstelling aan temperatuursveranderingen voor de overige groepen. Binnen de macrofauna worden met name de soorten afhankelijk van stratificatie en zuurstofrijk water, zoals de filtervoeders in de waterkolom en de mineerders, grazers en shredders op de bodem. Dit zal afbraak van organisch materiaal vertragen en algenbloei verder versterken. Onder de vissen zijn de (pelagische) openwater en planktivore soorten met name gevoelig gezien hun afhankelijkheid van hoge stroomsnelheden voor mobiliteit en voedseltransport en resuspentie.

4.2.3 **Droogval**

De regionale watervraag neemt het sterkst toe in regio Noord, tevens de grootste regio (Tabel 4.2.2). In het scenario met 2 graden opwarming (ten opzichte van 1951 – 2010) en 0,4 meter zeespiegelstijging bedraagt de toename meer dan 60%, door zowel de verdampingstoename (wat tot uiting komt in de toegenomen watervraag voor peilbeheer) (Pouwels et al., 2021) als de toegenomen watervraag voor doorspoelen (Delsman et al., 2022). In regio West verdubbelt de watervraag voor doorspoeling in dit scenario. In de Zuidwestelijke Delta neemt de watervraag voor beregening toe als gevolg van verdamping en uitbreiding van het aantal beregeningsinstallaties (scenario ‘sterk risicoverhogend’).

Tabel 4.2.2 Overzicht van de gemiddelde regionale watervraag in een zeer droge zomermaand, uitgesplitst naar zoetwaterregio (bron: Mens, 2024).

Zoetwaterregio	Regionale watervraag (m3 /s) in het huidige klimaat	Regionale watervraag (m3 /s) bij 2°C opwarming + 0,4 m zeespiegelstijging	Regionale watervraag (m3 /s) bij 2°C opwarming + 1 m zeespiegelstijging	Regionale watervraag (m3 /s) bij 2°C opwarming + 2 m zeespiegelstijging
Hoge Zandgronden	40	50	50	50
Rivierengebied	70	75	75	75
Noord	140	230	265	325
West	60	85	105	150
Zuidwestelijke Delta	15	20	25	25
Totaal	325	460	520	625

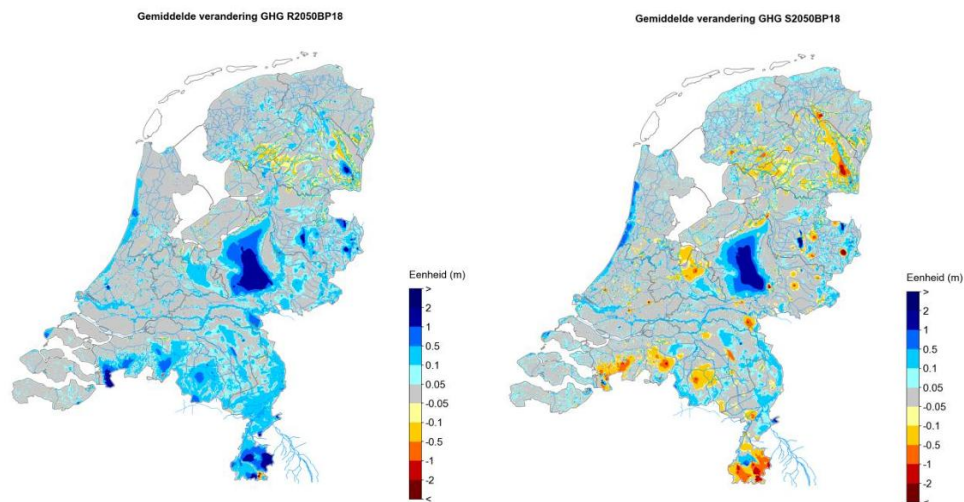
Peil

Het peil wordt beïnvloed door de disbalans tussen zoetwater toevoer en zoetwaterbehoefte. De verandering in zoetwaterbehoefte is hierbij afhankelijk van het landgebruik voor bijvoorbeeld beregening, maar de regionale verschillen zijn grofweg in drie groepen in te delen. In de hogere delen van het land is het peil vooral afhankelijk van verdamping. In het rivierengebied en in de meren speelt peilbeheer een belangrijke rol en aan de kust is er vooral vraag vanuit het uitspoelen van verziltend oppervlaktewater. Doordat het onduidelijk is wanneer er van spuien naar pompen moet worden overgeschakeld is er onduidelijkheid over de toekomstige doorspoelbehoefte die volgt uit de verzilting. Het niet mee dalen van het peil met de bodem (passieve peilstijging) kan de kans op droogval in de lagergelegen delen van Nederland (regio's Noord en West) enigszins verlichten (Hunink et al., 2021). Dit geldt niet voor de binnenlandse delen van Nederland, welke hoofdzakelijk afhankelijk zijn van neerslag en daardoor een relatief hogere kans hebben op verdroging.

Bij een toename van 2°C ten opzichte van 1981-2010 en 1 tot 2 meter zeespiegelstijging, stijgt de nationale watervraag in een droge zomermaand Nationaal tot ongeveer het dubbele van de huidige vraag. Dit is met name het gevolg van de toenemende vraag naar peilbeheer en doorspoeling in zoetwaterregio's Noord en West. Er is dan grofweg twee keer zoveel water nodig als via de rivieren wordt aangevoerd (Mens et al., 2024). Gegeven de temperatuurstijging uit sectie 4.2.1 is een dergelijk watertekort voor context scenario sterk risico-verhogend al behaald in 2050. Dit geldt ook uiteindelijk voor context scenario beperkt risico-verhogend, wanneer dezelfde eisen aan waterkwaliteit worden gesteld als nu en er geen relevante maatregelen worden genomen.

Grondwaterstand (GHG)

Berekeningen uit de Geactualiseerde knelpuntenanalyse (2020; Figuur 4.2.3.1) geven aan dat de GHG in de infiltratiegebieden licht stijgen, met name op de Veluwe, al blijft het daar buiten bereik van de wortelzone, waardoor dit niet doorwerkt in het verdampingstekort. In west Nederland leidt de bodemdaling tot een netto daling van de Gemiddelde Grondwaterstand (GHG). Risico op droogte blijft dan ook ongeveer gelijk in dit scenario. Onder scenario Stoom dalen de GHG in de meeste infiltratiegebieden. Uitzonderingen hierop zijn de gebieden met zeer lage grondwaterstanden als de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe. De daling in GHG heeft gevolgen voor de beekafvoeren en gaat gepaard met een forse toename van het verdampingstekort. Uiteindelijk leidt de verminderde afvoer en hogere verdamping tot een verslechtering van de oppervlaktewaterkwaliteit en een verhoging in de kans op droogte. De effecten hiervan zijn het grootst op de Hoge Zandgronden Zuid, doordat naast klimaat extra onttrekking voor drinkwater, industrie en beregening hier het sterkst doorwerken.



Figuur 4.2.3.1 Gemiddelde verandering van de GHG (Gemiddeld Hoogste Grondwaterstanden) voor de scenario's Rust (links) en Stoom (rechts) voor 2050. (Bron: Mens et al., 2020).

4.2.3.1 Klimaatdreiging(en) contextscenario 'beperkt risicoverhogend'

De toename van verdrogingsrisico blijft relatief beperkt, maar verlengde verblijftijden en lichte verlagingen van waterstanden kunnen al lokale stress veroorzaken voor ondiepe, stilstaande waterlichamen. Dit is met name het geval in binnenlandse regenwater gevoede gebieden of kustgebieden waar de doorspoelbehoefte licht toeneemt.

Wat betreft soortensamenstelling zullen vooral gevoelige macrofyten zoals drijfbladplanten (Batrachid), charofyten (Charid) en oeverplanten in moerassige milieus (zoals kattenstaarten en biesvaren) licht achteruit kunnen gaan. Bij de ongewervelden kunnen sessiele en gravende soorten op zandige of organisch-rijke substraten al onder druk komen te staan, vooral in ondiepe wateren waar het pijl sterk kan fluctueren. Door lichte afname van filterende evertes kunnen de nutriëntbelasting licht toenemen, met als gevolg meer algengroei. Verlies van oeverbegroeiing kan bovendien het broedhabitat voor vissen en insecten verminderen. De risico's blijven echter grotendeels lokaal, en met voldoende inzet, beheersbaar.

4.2.3.2 Klimaatdreiging(en) contextscenario 'sterk risicoverhogend'

Het cumulatief gemiddeld neerslagtekort onder KNMI14 stijgt met 35% tot 210 mm in 2050 (371 mm onder T=20) en met 59% tot 248 in 2085 (406 mm onder T=20) onder het scenario 'sterk risico verhogend'. Veranderingen in neerslagtekorten ten opzichte van nu vallen het laagst uit voor Hoge Zandgronden Oost en het hoogst voor Zuidwestelijke Delta en Hoge Zandgronden Zuid. In combinatie met de dalende zomerwaterstanden en toenemende watervraag zullen de ondiepe waterlichamen op de Zuidelijke hoge zandgronden vaker en langduriger droogvallen.

Naast de problemen die optreden binnen het beperkt risico-verhogend scenario zal een grote disbalans in watervraag en toevoer leiden tot toenemende chlorideconcentraties aan de kust. De waterkwaliteit zal hiermee met name in de ondiepe wateren van de polders, zoals de poldersloten verslechteren. Ook zullen de sloot en boezempeilen dalen wat onder andere tot achteruitgang van oevervegetatie kan leiden en op termijn tot erosie van (veen)kades en bodemdaling.

De verwachte droogval en afname in stroomsnelheid zullen leiden tot een duidelijke ecologische verslechtering. Specialistische soorten die afhankelijk zijn van stroming, zuurstofrijk water of stabiele, natte omstandigheden – zoals stromingsgebonden waterplanten, filtervoedende macrofauna en alle vissoorten – zullen sterk afnemen of geheel verdwijnen. Onder de waterplanten zal dit zichtbaar zijn als verlies van kranswieren (Charid), drijfplanten (Batrachid), moeras- en oeverplanten zoals kattenstaarten (peplid) en ondergedoken planten zoals biesvaren.

(isoetid). Dit kan kansen bieden voor opportunistische soorten als riet en kroos. Onder de ongewervelden zijn met name de sessiele soorten zoals schelpdieren gevoelig, maar ook de filtervoeders, gravende soorten, shredders en predatoren door hun afhankelijkheid van zuurstofrijk water. Hiermee zal er een verschuiving zijn naar pionierssoorten als wantsen, kevers en muggen en vliegen. Alle vissoorten zijn gevoelig voor droogval, maar de ecologische druk zal vooral zwaar vallen op de pelagische, planktivore en parasitaire soorten, die sterk afhankelijk zijn van stroming. In ondieper stilstaand water met toenemende stratificatie zullen deze groepen al snel verdwijnen. Het visbestand zal daardoor verschrompelen, met een dominante rol voor slechts enkele robuuste soorten of zelfs volledig verlies van vis in (nu) tijdelijke wateren. Deze veranderingen resulteren in een verarming van de biodiversiteit en een overgang naar soorten die beter gedijen onder eutrofe, warme en stilstaande omstandigheden, wat op termijn leidt tot instabieler en minder veerkrachtige ecosystemen, zeker wanneer interacties met andere drukfactoren als verzilting en temperatuur worden overwogen.

4.3 Secundaire effecten

Deze paragraaf beschrijft de secundaire ecologische effecten die optreden door veranderingen in temperatuur en verdroging en hoe deze de werking en veerkracht van watersystemen beïnvloeden. Secundaire effecten omvatten cascade-effecten, zoals een verhoogde kans op invasieve soorten, met verstrekende gevolgen voor biodiversiteit, waterkwaliteit en ecosysteemdiensten.

4.3.1 Secundaire effecten contextscenario 'beperkt risicoverhogend'

De veranderingen in temperatuur, debiet en verblijftijd blijven in dit scenario grotendeels beperkt, waardoor ook de secundaire ecologische effecten relatief gering zijn. Het ecologisch functioneren blijft behouden en het zelfreinigend vermogen van watersystemen, de zuurstofhuishouding en nutriëntenopname blijven functioneel. Hierdoor is de kans op grootschalige algenbloei of zuurstofproblemen vergelijkbaar met nu. Bestaande knelpunten, zoals het gebrek aan natuurlijke peildynamiek, verstoringen van zout-zout gradiënten en een sterk gereguleerd watersysteem, blijven echter aanwezig en kunnen lokaal de ecologische ontwikkeling blijven belemmeren.

4.3.2 Secundaire effecten contextscenario 'sterk risicoverhogend'

De combinatie van hogere temperaturen, afnemende debieten en langere verblijftijden leiden tot een reeks van secundaire ecologische risico's. Door stagnatie van water en verhoogde nutriëntenconcentraties neemt de kans op blauwalgbloei sterk toe, wat direct effect heeft op vissen, vogels en recreatie. Stilstaand water en zuurstofloosheid van de onderlaag kunnen leiden tot interne eutrofiëring via fosfaatmobilisatie uit het sediment, terwijl het zelfreinigend vermogen van het systeem sterk afneemt. De veranderde omstandigheden maken wateren bovendien vatbaar voor invasieve soorten en leiden tot het verdwijnen van al gevoelige soortgroepen. In veengebieden kan verdroging leiden tot versneld afsterven van oevervegetatie, oxidatie van veen, bodemdaling en CO₂-emissies. De connectiviteit tussen waterlichamen neemt af, waardoor migratie en genetische uitwisseling beperkt worden. Deze veranderingen leiden tot verarming van de lokale biodiversiteit, wat het watersysteem structureel onder druk zet.

4.4 Adaptatiemaatregelen

Deze sectie beschrijft de relevante maatregelen uit sectie 2.6, die samen de impact van opwarming, verdroging en verzilting kunnen verzachten, met aandacht voor hun rol bij het versterken van veerkracht en het terugdringen van kwetsbaarheid.

4.4.1 Adaptatiemaatregelen adaptatiescenario 'Intensiveren'

Naast het eerdergenoemde belang van het (h)erkennen van interacties tussen maatregelen (sectie 2.6.1) en het gebruik van een systeembenadering (sectie 2.6.2) is het van belang om de ruimtelijke schaal van invloed van een maatregel in te schatten. Zo hebben technische

maatregelen voor natuur veelal een lokale invloed. Ook zijn technische maatregelen vaak specifiek in hun toepassing, door bijvoorbeeld aan te haken op chemische processen, zoals het wegvangen van natrium uit verzilte bodems met gips. Hierdoor zijn dergelijke maatregelen per definitie reactief, en kunnen deze pas worden toegepast wanneer een probleem al gesignaleerd is. Om deze redenen kunnen technische maatregelen helpen behouden wat er nu aan natuur is, maar deze niet op grote schaal veerkrachtig maken.

Tabel 4.4.1 Overzicht van mogelijke toekomstige adaptatiemaatregelen adaptatiescenario 'intensiveren'

	Beleid	Adaptatiemaatregel	Relevantie	Bron	Verantwoordelijkheid
Temperatuur	Handhaving toxische normen*	Verhoogde temperaturen verhogen de gevoeligheid voor toxicanten	Vermindering interactieve stress	Heugens et al., 2001**	Rijk & waterschappen
Verdroging ****	Zuiveringsinstallaties	Hergebruik effluent RWZI	Verminderen zoetwater-onttrekking	Deltares**, STOWA**	Rijk & waterschappen
Verziltig	Zuiveringsinstallaties	Hergebruik effluent RWZI	Verminderen zoetwater-onttrekking	Deltares**, STOWA**	Rijk & waterschappen
Verziltig	Zuiveringsinstallaties	Zuiveren kwelwater via reverse-osmose	Verkleinen zoutwaterbel en zoetwater-onttrekking	Deltares**, STOWA**	Rijk & waterschappen
Verziltig	Zuiveringsinstallaties	Zuiveren oppervlaktewater	Verminderen instroom zout water	PBL†	Rijk & waterschappen
Verziltig	Kwelreductie-technieken	Dichten zoute wellen	Verminderen instroom zout kwelwater	Deltares**, STOWA**	Rijk & waterschappen
Verziltig	Pompschepen*	Injecteren geperste lucht in onderlaag (bellenpluim)	Verhogen menging met zoete bovenlaag	STOWA**	Rijk & waterschappen

4.4.2 Adaptatiemaatregelen adaptatiescenario 'Transformeren'

Het versterken van natuur door het laten afnemen van menselijke drukfactoren kan worden gerealiseerd door ons ruimtelijk gebruik aan te passen. Hierbij kan het verbinden van natuurgebieden soorten de kans geven om te verplaatsen, genetisch materiaal uit te wisselen en meer levensvatbare metapopulaties te vormen. Connectiviteit is daarmee cruciaal voor een veerkrachtige natuur, hetgeen ook een uitgangspunt is voor het Natuurnetwerk Nederland. Toch is voor een veerkrachtige natuur in Nederland belangrijk dat niet alleen beschermde natuurgebieden met elkaar verbonden worden, maar dat juist ook buiten deze beschermde gebieden meer ruimte komt voor hogere kwaliteit natuur. In een natuur inclusieve samenleving is de natuur overal, wordt deze gezien als onderdeel van andere maatschappelijke opgaven, wordt natuur meegenomen in economische en politieke besluitvorming, en wordt er gebiedsgericht aan samengewerkt door overheden en betrokkenen

Door het verminderen van uitstoot en afname van drukfactoren brengen we de basiscondities op orde, om veerkracht terug te brengen in het natuurlijk systeem. Dit kan door handhaven op normen voor toxische stoffen. Ook kan ruimtelijke herindeling van industrie en landbouw bijdragen. Door blootstelling te concentreren kan kwetsbare natuur deels worden ontzien van blootstelling aan vervuiling.

De laatste stap voor het realiseren van natuur van voldoende kwaliteit en kwantiteit is het geven van ruimte aan dynamische processen. Deze maatregelen gaan deels over het geven van fysieke ruimte, voor bijvoorbeeld meandering en overstromingsvlakten, maar zeker ook het geven van maatschappelijke ruimte aan veranderingen in de natuur: habitats zullen zich gaan verplaatsen, er zullen soorten verdwijnen en andere bijkomen, en deze veranderingen zullen op

maatschappelijk begrip en draagvlak moeten kunnen rekenen. Dit laatste vraagt een verandering in het maatschappelijk denkkader rondom natuur.

Veel van de ruimtelijke adaptaties spelen in op systeemtransformatie en vragen daardoor ook om een lange termijn aanpak voor zowel het realiseren als de doorwerking van de maatregelen. Wanneer hier de tijd en ruimte aan wordt gegeven, hebben deze maatregelen een meer 'vlakdekkende' en dus grootschalige uitwerking.

Tabel 4.4.2 Overzicht van mogelijke toekomstige adaptatiemaatregelen adaptatiescenario 'transformeren'

	Beleid	Adaptatiemaatregel	Relevantie	Bron	Verantwoordelijkheid
Temperatuur	Beschaduwning	Beschaduwning via aquatische vegetatie ter vermindering van instraling	Verminderen opwarming	Bartlett & Dedekorkut-Howes, 2023**	Rijk & waterschappen
Temperatuur	Beschaduwning	Beschaduwning via multifunctionele bufferstroken	Verminderen opwarming	Bartlett & Dedekorkut-Howes, 2023**	Rijk & waterschappen
Temperatuur	Handhaving toxische normen*	Verhoogde temperaturen verhogen de gevoeligheid voor toxicanten	Vermindering interactieve stress	Heugens et al., 2001**	Rijk & waterschappen
Verdroging****	Beheer vegetatie	Verminderen instraling door water-, oever- of terrestrische vegetatie	Verlagen verdamping	Deltares**	Rijk & waterschappen
Verziltig	Aanpassing vorm waterlichaam	Verondiepen bodem	Verminderen instroom zout water	STOWA**	Rijk & waterschappen
Verziltig	Ruimtelijke adaptatie	Ruimtelijke herindeling van type natuurgebied passend bij nieuwe ecologische status. [†]	Ervaren verziltingsproblematiek	Deltares***	Rijk & waterschappen
Verziltig	Halofytenfilter	Natuurlijke filtering van zouten uit oppervlaktewater	Filteren van indringend zout	Alterra rapport 2115**	Rijk & waterschappen

* Sommige interventies bestrijden niet de oorzaak, maar het effect van het klimaatrisico. Deze maatregelen hebben daardoor alleen impact op kleine schaal. Zo kan het verhogen van menging van water stratificatie tegengaan, maar zonder verdere ingrepen is dit een tijdelijke en zeer lokale oplossing. Bijvoorbeeld, de temperatuur aan het wateroppervlak zal verminderen bij verhoogde connectiviteit, maar daarmee stijgt de temperatuur onder in de waterkolom. Het risico bij dit soort ingrepen is dat vooral verdere metingen in de waterlichamen lager uit kunnen vallen, zonder dat de natuur er verder bij gebaat is. Dit kan zowel het geval zijn bij directe abiotische metingen, als beheer gebaseerd op een selectie van doelsoorten.

** Deze bron is geen onderdeel van een maatregelenpakket beschreven in wetgeving. De maatregel is beschreven in factsheets of lopend onderzoek van het genoemde instituut.

*** Deze maatregel is gebaseerd op het niet uitvoeren van huidig beleid. De maatregel is al mogelijk, maar wordt nog niet bewust overwogen, merken wij uit lopende projecten. Om deze reden is er geen directe externe bron.

**** De maatregelen tegen verdroging mitigeren ook de verhogingen in verblijftijd (Tabel 2.4)

[†] Soms is terugkeer naar de oude (oer) natuur van een natuurgebied door klimaatverandering (nagenoeg) niet mogelijk. Er kan dan worden overwogen of de nieuwe klimatologische status van het gebied passend is voor een ander wenselijk type natuur. Hierbij is het nodig om te kijken naar de nationale natuuropgaven naast de regionale natuuropgaven.

[‡] Door PBL benoemd als beleidsmaatregel tijdens het overleg voor LNVK op 30/8. Verdere bron vooralsnog onbekend.

4.5 Blootstelling

Naast de hierboven beschreven blootstelling via de context scenario's wordt blootstelling aan de klimaatdrukfactoren temperatuur en verdroging ruimtelijk gemitigeerd via adaptatiescenario's. Hieronder worden de daaruit volgende ruimtelijke patronen op nationaal niveau en per zoetwaterregio beschreven als verandering in de waterkwaliteit in vergelijking tot nu.

4.5.1 Blootstelling bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'

4.5.1.1 Nationaal

De klimaatdruk op flora en fauna is relatief beperkt en extreme gebeurtenissen zijn relatief zeldzaam. De blootstelling van gevoelige soortgroepen, zoals drijfbladplanten, moerasplanten en sessiele ongewervelden, blijft grotendeels gelijk aan huidige veranderingen in peil en incidentele hittegolven. Vissen en schelpdieren in ondiepe wateren ervaren incidenteel verhoogde temperaturen, en verlaagde zuurstofgehalten maar dit leidt zelden tot grootschalige uitval.

Onder andere de vernatting van het veenweidegebied uit onderwaterdrainage verhoogt de watervraag flink, wat vraagt om een herindeling van de regionale aanvoer en een verondieping van de Nieuwe waterweg (deelrapport waterbeschikbaarheid sectie 4.2).

Het hergebruik van RWZI-effluent vermindert de druk op zoetwatervoorraden en voorkomt extra droogval in sloten en beken. In verziltende gebieden zoals de Zuidwestelijke Delta beperken zuiveringsmaatregelen (zoals kwelwaterbehandeling en reverse osmosis) de instroom van zout en beschermen daarmee kwetsbare zoetwatersystemen. Deze maatregel is vooral gunstig voor wieren, wortelende waterplanten (pepliden en isoetiden) die zoutintolerant zijn.

Hoewel de klimaateffecten relatief gering zijn, is de blootstelling van aquatische systemen met niet verwaarloosbaar, maar vergelijkbaar met nu. In overgangssystemen kan interactie met menselijke verstoring als koelwaterlozingen, chemische verontreiniging, al aanwezige eutrofiëring of pesticiden toch tot lokale schade leiden. Hier kan actieve handhaving van toxische normen verdere belasting voorkomen. De overige maatregelen kunnen worden ingezet om invloed uit incidentele verstoring of overschrijdingen te minimaliseren.

4.5.1.2 Noord-Nederland

Ondanks dat de klimaatdruk beperkt is in toename, zijn proactieve (technische) adaptatiemaatregelen nodig om de blootstelling aan klimaatdrukfactoren te beperken. Vooral in gevoelige (overgangs)gebieden met geleidelijke verzilting of droogtegevoelige ondiepe wateren.

De toenemende doorspoelvraag in dit beleidsscenario betekent een verhoogde druk op de meren, zoals het IJsselmeer en Markermeer, en de wateren die hiervan afhankelijk zijn. De maatregelen beperken zoutindringing, maar tekorten ontstaan desondanks na 2050. De harde gesloten kust en daarmee toenemende barrières, leiden tot een afname van dynamiek. Hierdoor zullen soorten die afhankelijk zijn van meerdere habitats afnemen en ondanks dat zoetwaterhabitats behouden blijven, is er verminderde mogelijkheid om uit te wijken naar schuilplekken tijdens hittegolven. Ook leidt de verminderde dynamiek tot een versnelde successie, waardoor meer beheer nodig zal zijn om verbossing van de oevers tegen te gaan.

4.5.1.3 Hoge Zandgronden Oost en Zuid

Door de focus op landbouw, en toenemende onttrekking, neemt de bestaande verdrogingsopgave voor aquatische natuur in hevigheid toe, en zo ook de afhankelijkheid van externe aanvoer van beregeningswater. Met effectieve inzet van een combinatie van maatregelen kan verergering van de bestaande opgave enigszins worden verlicht, maar de bestaande gevoeligheid van het gebied, met name voor droogte en stilvallen van de stromende wateren, wordt al met al onvoldoende ondervangen.

4.5.1.4 Rivierengebied

De toenemende barrières aan de kust en toenemende afhankelijkheid van oppervlaktewater verergert de klimaatdruk in de regio, met name tijdens incidentele lage afvoeren. Er is een toenemend risico voor de sedimenthuishouding.

4.5.1.5 West-Nederland

De harde, gesloten kust leidt tot een blijvende afhankelijkheid van de afvoer van de Rijn tegen zoutindringing en een verslechtering van de sedimenthuishouding. Hiermee blijven huidige opgaven als bodemdaling, erosie en ook verzilting bestaan.

4.5.1.6 Zuidwestelijke Delta

Door te kiezen voor een harde, gesloten kust, met zoetwaterbuffers voor landbouw en drinkwater, ontstaat er een nog scherpere overgang van zoet naar zout water en achteruitgang van schorren en slikken. Door de verder ingeperkte dynamiek, habitatdiversiteit en connectiviteit, neemt de robuustheid tegen extreme regenval en droogte en hittegolven af. Soorten die afhankelijk zijn van meerdere leefgebieden zullen afnemen en zoete wateren zullen niet in kwantiteit, maar wel in kwaliteit afnemen.

De Rijn-maas monding is lijdt hier met name onder. Door de insteek om huidige functies, zoals het huidig beschermstelsel en de scheepvaart voor de mens, zo lang mogelijk te behouden. Hierdoor treedt er een conflict op met de behoeften aan connectiviteit, zoet-zout gradiënten en algehele dynamiek. Wanneer de effecten op de hoofd vismigratieroute niet worden opgevangen op andere plekken zoals de haringvliet zal dit de vismigratie enorm beperken, met consequenties lager in de voedselketen. Echter zijn de kansen voor bijvoorbeeld het toenemend openen van 'de Kier' in toenemende mate beperkt. Door de waterbeschikbaarheid is er beperkte ruimte om rekening te houden met de soortafhankelijke timing met de seizoens- en dag-nachtritmie. Ook kan eventuele inzet van technische oplossingen als bellenschermen de vissen verstoren en belemmeren.

4.5.2 Blootstelling bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'

4.5.2.1 Nationaal

Door de combinatie van toenemende temperaturen, extreme en langdurige droogte en verzilting, raken veel wateren ernstig verstoord. Vooral moerasplanten, drijfplanten, filtervoeders en openwatersoorten in de ondiepere wateren ondervinden een sterke achteruitgang. In veen- en poldergebieden treedt langdurige en soms meerjarige droogte op, met verlies aan vegetatie en leefgebied, en uitputting van bronpopulaties voor herstel, als gevolg.

De technische maatregelen zorgen vooral voor lokale, kortdurende en reactieve verlichting van de klimaatdruk. Hetgeen alleen effectief is wanneer er tijdig en dicht bij de 'bron' van de verstoring wordt gehandeld. De effectiviteit van deze aanpak zal beperkt zijn tegenover de structurele systeemveranderingen. Doordat de onderliggende ecologische druk (zoals verlies van biodiversiteit en habitatfragmentatie) niet wordt tegengegaan, blijft de blootstelling en gevoeligheid van langzaam herstellende gemeenschappen structureel hoog, met als gevolg een verschuiving naar verstoorde pionierssystemen. Dit betekent ook een verlies van de natuurwaarden en natuurfuncties waarvan wij nu gebruikmaken.

4.5.2.2 Noord-Nederland

Het watertekort in de regio neemt sterk toe, met name in de wateren die afhankelijk zijn van aanvoer uit het IJsselmeer en Markermeer (deelrapport waterbeschikbaarheid sectie 4.3). Maatregelen kunnen hier maar beperkt en zeer lokaal mee omgaan, met dalende grondwaterstanden en daarmee verdroging en ondergrondse zoutindringing als gevolg. Het sluiten van de kust legt waterlichamen verder vast, en de afhankelijkheid van het IJsselmeer en Markermeer neemt toe, waardoor meer onderhoud tegen verbossing van de verschillende waterlichamen nodig is. Door de verminderde dynamiek en barrières voor soorten die afhankelijk zijn van meerdere leefgebieden zal alle natte natuur in de regio in kwaliteit afnemen.

4.5.2.3 Hoge Zandgronden Oost en Zuid

Door de focus op landbouw, en toenemende onttrekking, neemt de bestaande verdrogingsopgave voor aquatische natuur in hevigheid toe, en zo ook de afhankelijkheid van externe aanvoer van beregeningswater. De langzaam stromende wateren op de hoge zandgronden zullen dan ook vaker stil- en droogvallen, met desastreuze gevolgen voor de waterkwaliteit. Op termijn zal dit naast verlies in natuurwaarden ook betekenen dat de benodigde zuiveringsinspanning voor (drink)wateronttrekking zal toenemen.

4.5.2.4 Rivierengebied

De toenemende barrières aan de kust en de toenemende afhankelijkheid van oppervlaktewater vergroot de klimaatdruk in de regio. De harde overgangen zorgen voor verdere erosie en verslechtering van de sedimenthuishouding. En door de toenemende watervraag afnemende debieten zullen sloten en kanalen frequenter droogvallen.

4.5.2.5 West-Nederland

Door het sluiten van de kust worden de waterlichamen verder vastgelegd met een verlies in (peil)dynamiek als gevolg. Doordat zoutindringing voornamelijk wordt uitgespoeld is er een toename in afhankelijkheid van de afvoer van de Rijn. Op termijn is de watervraag hiermee niet houdbaar, met ondergrondse verzilting, erosie en bodemdaling als gevolg. Zeer gevoelig zijn de hoger gelegen grondwaterafhankelijke oppervlaktewateren, welke in toenemende mate droog zullen vallen.

4.5.2.6 Zuidwestelijke Delta

Door te kiezen voor een harde, gesloten kust, met zoetwaterbuffers voor landbouw en drinkwater, ontstaat er een nog scherpere overgang van zoet naar zout water en verlies van schorren en slikken. Hierdoor neemt de natuurkwaliteit en natuurlijke sponswerking af en daarmee ook de robuustheid tegen extreme regenval en droogte. Door de verminderde dynamiek en barrières voor soorten die afhankelijk zijn van meerdere leefgebieden zal alle natte natuur in de regio in kwaliteit afnemen en gaat een belangrijke internationale broedplek en migratieroute voor vogel en vis verloren.

De Rijn-maas monding is hier een duidelijk voorbeeld van. Door de insteek om huidige functies, zoals het huidig beschermingsysteem en de scheepvaart voor de mens zo lang mogelijk te behouden, treedt er een conflict op met de waterbeschikbaarheid (Deelrapport waterbeschikbaarheid sectie 3.3.1), met gevolgen voor zowel verzilting (en gebrek aan geleidelijke overgangen), verdroging als temperatuurrisico's (verhoogde blootstelling door verondieping). Wanneer de effecten op de hoofd vismigratieroute niet worden opgevangen op andere plekken zoals de haringvliet zal dit vismigratie enorm beperken, met consequenties lager in de voedselketen. Echter nemen kansen voor bijvoorbeeld het toenemend openen van 'de Kier' ook af door de beperkingen in waterbeschikbaarheid, terwijl het huidig succes al belemmerd wordt door mismatches in timing met de seizoens- en dag-nachtritmiek van de vissoorten.

4.5.3 Blootstelling bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'

4.5.3.1 Nationaal

Proactieve transformatieve adaptatiemaatregelen kunnen de blootstelling aan klimaatdrukfactoren sterk beperken. Vooral in overgangsgebieden met geleidelijke verzilting of droogtegevoelige ondiepe wateren bieden maatregelen als verondieping van waterlichamen en beschaduwning via aquatische vegetatie bescherming aan wieren, wortelende waterplanten en andere helofyten.

Gezien de watervraag voor peilbeheer naar verwachting niet toeneemt, en er slechts enige toename in doorspoelvraag is (deelrapport waterbeschikbaarheid sectie 4.1.2), is de verwachte verdroging en verzilting als gevolg van waterbeschikbaarheid beperkt. Er hoeven dan ook geen veranderingen in regionale watersysteem plaats te vinden, maar dit leidt tot enige verzilting (deelrapport waterbeschikbaarheid sectie 4.1.6)

De inzet op multifunctionele bufferzones en landschappelijke herinrichting vergroot de veerkracht van watersystemen, bijvoorbeeld door het beperken van piektemperaturen en het verlagen van de verdamping. Dit maakt de habitatomstandigheden voor moerasvegetatie, sessiele macrofauna en paaigebonden vissoorten stabiel. De toegenomen weerbaarheid en ruimtelijke herindeling maken het mogelijk om habitatverlies door geleidelijke verzilting op te vangen.

Door gericht in te zetten op systeemherstel en herindeling van ruimtelijk gebruik ontstaat ruimte voor natuurlijke peildynamiek, gradiënten en verschuiving in natuurstype, waarmee veerkrachtige gemeenschappen zich kunnen versterken of opnieuw kunnen vestigen. De kans op neerwaartse cascades zoals algenbloei of zuurstofloosheid wordt zo structureel verkleind, waardoor enig herstel van de al opgelopen klimaatschade mogelijk is.

4.5.3.2 Noord-Nederland

De toenemende doorspoelvraag (35%), welke het merendeel van het waterbeschikbaarheidsvraagstuk voor deze regio vertegenwoordigt, met name in de wateren die afhankelijk zijn van aanvoer uit het IJsselmeer en Markermeer, kan ruimschoots worden opgevangen (deelrapport waterbeschikbaarheid sectie 4.3). Hierdoor worden geen wezenlijke invloeden op de zomergrondwaterstand verwacht en kunnen de klimaatrisico's voor grondwaterafhankelijke natuur sterk verminderd (deelrapport waterbeschikbaarheid sectie 6.3). De maatregelen beperken ook de zoutindringing, maar tekorten ontstaan desondanks na 2050. Het inzetten van kleigronden als waterberging in plaats van landbouw zorgt voor een afnemende afhankelijkheid van het IJsselmeer en Markermeer waardoor het peilbeheer hier niet verder hoeft worden vastgelegd. Gezien de estuaria en veenweide mogen verbrakken, met hoog of flexibel waterpeil, betekent dat er genoeg ruimte voor zoet-zout gradiënt met voldoende dynamiek. Zoetwatersoorten zullen lokaal terugtrekken, maar daarvoor in de plaats is er herstel van trekvissen, schelpdieren en brakwaterplanten zoals zeegras.

4.5.3.3 Hoge Zandgronden Oost en Zuid

Extensivering van de landbouw en aanleg van buffers via kruidenrijke graslanden dragen bij aan een robuuster watersysteem, waarin de natuurlijke infiltratie en berging verbeteren en er een verminderde afhankelijkheid van externe aanvoer is. De verminderde onttrekking als gevolg van de verandering in landgebruik betekent een verminderd risico op verdroging als gevolg van toenemende tekorten en een vergrootte weerbaarheid om droogte te overbruggen. Toename van watertemperaturen kan worden beperkt door aansturen op beschaduwning in de bufferzone rondom de waterlichamen. Door de combinatie van maatregelen wordt verergering van de bestaande opgave voorkomen. Verbetering van de huidige opgave zou kunnen optreden wanneer belasting van het grondwatersysteem uit drinkwateronttrekking ook wordt aangepakt (deelrapport waterbeschikbaarheid 6.3).

4.5.3.4 Rivierengebied

Klimaatdruk wordt verlicht door de ter beschikking stelling van graslanden voor waterberging en verhoogde ruimte voor rivieren door het extra oppervlak op kleigronden voor natuur. Dit verhoogt de robuustheid tijdens lage afvoeren en geeft meer ruimte voor dynamiek. Ruimte voor natuurlijke processen als meandering verminderen erosie en verbeteren sedimenthuishouding en sponswerking, wat gegeven de beperkte toename in klimaatdruk onder dit scenario kansen biedt om naast verlichting van toekomstige klimaat impact ook de huidige opgaven wat te verlichten.

4.5.3.5 West-Nederland

Het inzetten van kleigronden als waterberging in plaats van landbouw zorgt voor een afnemende afhankelijkheid van de afvoer van de Rijn en vermindering in bodemdaling als gevolg van uitzakkende grondwaterstanden. Hiermee blijft het risico op verzilting in de regio beperkt gegeven de beperkte toename in klimaatdruk onder dit scenario. Echter blijven er opgaven voor verdroging van de met name de hoger gelegen grondwaterafhankelijke oppervlaktewateren.

4.5.3.6 Zuidwestelijke Delta

Door te kiezen voor een zachte kust die mee kan groeien met de zee, en het ontwikkelen van natuur inclusief grasland, ontstaat er een meer geleidelijke overgang van zoet naar zout water met verbeterde sponswerking en waterberging. Dit bevordert robuuste natuurlijke gradiënten en biedt veerkracht bij extreme regenval en droogte. Het laten meegroeien van de schorren en slikken aan de kust biedt voldoende ondieptes voor schelpdieren en de vogels die daar foerageren of grondbroeden.

In de Rijn-maas monding leidt het afsluiten van de Nieuwe waterweg en het openen van het Haringvliet tot een toename van de nu ondervetegenwoordigde brakwaternatuur, met voldoende ruimte voor de bijbehorende natuurlijke processen als dynamiek en ruimte voor zoet-zoutgradiënten. Ook opent dit de weg voor een grote verbetering voor mismigratie, mits de kunstwerken landinwaarts vis-passeerbaar zullen zijn.

4.5.4 Blootstelling bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'

4.5.4.1 Nationaal

De klimaatrisico's en bijbehorende effecten in dit scenario zijn hoog. Structureel herstel en ruimtelijke functieverandering zijn dan ook essentieel voor beperking van ecologische schade en daaruit volgende risico's voor de maatschappelijke domeinen waar ecologie een fundament voor is, zoals veiligheid, waar sponswerking en vegetatie erosie en overstromingsrisico beperken en gezondheid waarbinnen biodiversiteit waterzuivering ondersteunt en watergebonden en vector gebonden ziekten onderdrukt. Cruciale maatregelen zijn onder andere beschaduwning door bufferstroken en aquatische vegetatie, waardoor opwarming van ondiepe waterlichamen wordt beperkt en gevoelige soortgroepen beschermd blijven tegen hittestress.

Gezien de watervraag voor peilbeheer naar verwachting niet toeneemt, en er slechts enige toename in doorspoelvraag is (deelrapport waterbeschikbaarheid sectie 4.1.2), is de verwachte verdroging als gevolg van waterbeschikbaarheid beperkt. Er hoeven dan ook geen veranderingen in regionale watersysteem plaats te vinden, maar dit leidt tot enige verzilting (deelrapport waterbeschikbaarheid sectie 4.1.6)

De herinrichting van waterlichamen door aanpassing van morfologie via bijvoorbeeld verondieping beperkt zoutindringing en stratificatie. Dit vergroot de habitatgeschiktheid voor bodem gebonden fauna zoals gravende macrofauna en voorkomt zuurstofloosheid. Toch zijn de effecten van langdurige droogte met name desastreus, vooral in de kleinere waterlichamen. De opties voor maatregelen tegen verdroging zijn beperkt. Een hogere prioritering van natuur in de waterbalans, door bijvoorbeeld meer water vast te houden in de winterperiode, of vermindering van watergebruik uit andere sectoren is dan ook essentieel voor behoud van natuur(kwaliteit).

Hoewel de blootstelling op systeemniveau hoog blijft, maken deze maatregelen adaptief beheer mogelijk dat voor zover mogelijk meebeweegt met het nieuwe klimaatregime. Dit vermindert de druk op ecosysteemdiensten en creëert ruimte voor nieuwe ecologische evenwichten met zo min mogelijk achteruitgang van biodiversiteitswaarde en de daaruit volgende problematiek voor de mens.

4.5.4.2 Noord-Nederland

Het watertekort in de regio neemt toe, met name in de wateren die afhankelijk zijn van aanvoer uit het IJsselmeer en Markermeer (deelrapport waterbeschikbaarheid sectie 4.3). Maatregelen beperken de zoutindringing, maar tekorten ontstaan desondanks na 2050. Het inzetten van kleigronden als waterberging in plaats van landbouw zorgt voor een afnemende afhankelijkheid van het IJsselmeer en Markermeer waardoor het peilbeheer hier niet verder hoeft worden vastgelegd. Gezien de estuaria en veenweide mogen verbrakken, met hoog of flexibel waterpeil, betekent dat er genoeg ruimte voor zoet-zout gradiënt met voldoende dynamiek. Zoetwatersoorten zullen lokaal terugtrekken, maar daarvoor in de plaats is er herstel van trekvis, schelpdieren en brakwaterplanten zoals zeegras.

4.5.4.3 Hoge Zandgronden Oost en Zuid

Extensivering van de landbouw en aanleg van buffers via kruidenrijke graslanden dragen bij aan een robuuster watersysteem, waarin de natuurlijke infiltratie en berging verbeteren en er een verminderde afhankelijkheid van externe aanvoer is. De verminderde onttrekking als gevolg van de verandering in landgebruik betekent een verminderd risico op verdroging als gevolg van toenemende tekorten en een vergrootte weerbaarheid om droogte te overbruggen. Hiermee wordt de bestaande opgave niet opgelost, maar verergering wordt voorkomen.

4.5.4.4 Rivierengebied

Klimaatdruk wordt verlicht door de ter beschikking stelling van graslanden voor waterberging en verhoogde ruimte voor rivieren door het extra oppervlak op kleigronden voor natuur. Dit verhoogt de robuustheid tijdens lage afvoeren en geeft meer ruimte voor dynamiek. Ruimte voor natuurlijke processen als meandering verminderen erosie en verbeteren sedimenthuishouding en sponswerking.

4.5.4.5 West-Nederland

Het inzetten van kleigronden als waterberging in plaats van landbouw zorgt voor een afnemende afhankelijkheid van de afvoer van de Rijn en vermindering in bodemdaling als gevolg van uitzakkende grondwaterstanden. Echter blijven er opgaven voor met name de hoger gelegen grondwaterafhankelijke oppervlaktewateren.

4.5.4.6 Zuidwestelijke Delta

Door te kiezen voor een zachte kust die mee kan groeien met de zee, en het ontwikkelen van natuur inclusief grasland, ontstaat er een meer geleidelijke overgang van zoet naar zout water met verbeterde sponswerking en waterberging. Dit bevordert robuuste natuurlijke gradiënten en biedt veerkracht bij extreme regenval en droogte. Ook in de Rijn-Maas monding, waar het afsluiten van de Nieuwe waterweg en het openen van het Haringvliet nieuwe kansen biedt voor de nu ondervetegenwoordigde brakwaternatuur (en bijbehorende natuurlijke processen) en vismigratie. Wel is de verzilting in dit scenario dusdanig dat verzilting op zal trekken tot in het Volkerrak-zoommeer en het Brielse meer. Dit laatste tenzij het Spui wordt afgesloten van het Haringvliet (deelrapport waterkwantiteit sectie 3.3.2). Het laten meegroeien van de schorren en slikken aan de kust biedt voldoende ondieptes voor de vogels die daar grondbroeden, maar de toenemende temperaturen beperkt het herstel van de schelpdieren.

4.6 Gevoeligheid:

De gevoeligheid van aquatische flora en fauna voor klimaatverandering hangt sterk samen met hun (micro)habitatvoorkeuren, fysiologische grenzen en levenscycluskenmerken, alsook met de niet klimaat gerelateerde drukfactoren zoals fysisch-chemische eigenschappen van de watersystemen waarin ze voorkomen. In ondiepe intergetijdengebieden zijn sessiele soorten zoals schelpdieren direct blootgesteld aan temperatuurpieken tijdens hittegolven, wat kan leiden tot acute sterfte. In diepere wateren kan stratificatie leiden tot zuurstofloosheid onder de

spronglaag, wat risico's met zich meebrengt voor bodemfauna en – bij menging – ook voor vis. Soorten en gemeenschappen die sterk afhankelijk zijn van seizoenale timing, zoals vissen die eenmaal per jaar paaïen of planten met een smalle bloeiperiode, zijn gevoelig voor vervroeging van het voorjaar. Daarbij kan “phenological mismatching” ontstaan wanneer prooi- en predatoren verschillend reageren op signalen zoals temperatuur of daglengte, met voedseltekorten en verstoorde trofische interacties als gevolg. Deze gevoeligheden komen in verschillende mate tot uiting, afhankelijk van de mate van klimaateffect en het type adaptatiestrategie.

4.6.1 Gevoeligheid bij contextscenario ‘beperkt risicoverhogend’ en adaptatiescenario ‘Intensiveren’

Kwetsbaar:

- Drijfbladplanten en moerasplanten (gevoelig voor peilregime en temperatuur)
- Sessiele macrofauna zoals mosselen (gevoelig voor hitte- en zuurstofschommelingen)
- Vis met voorjaars paaimoment (gevoelig voor vervroegde seizoenen)

Adaptatiebuffer: effect op gevoeligheid gering; mitigatie via effluenthergebruik en handhaving toxische normen beperkt effect op structurele kwetsbaarheden

4.6.2 Gevoeligheid bij contextscenario ‘sterk risicoverhogend’ en adaptatiescenario ‘Intensiveren’

Kwetsbaar (aanvullend op 4.6.1):

- Filtervoeders en bentische fauna (gevoelig voor zuurstofloosheid en temperatuur(stratificatie))
- Openwatervissen en planktivoren (gevoelig voor afname stroming en zuurstof)
- Macrofyten (gevoelig voor lichtreductie door algenbloei)

Adaptatiebuffer: beperkt; maatregelen vertragen schade maar keren systeemdruk niet om

4.6.3 Gevoeligheid bij contextscenario ‘beperkt risicoverhogend’ en adaptatiescenario ‘Transformeren’

Kwetsbaar (beperkt):

- Specialistische soorten (zoals kranswieren) profiteren van herstel
- Vis en amfibieën met paaibehoeft in voorjaar → beschermd door schaduw/bufferzones

Adaptatiebuffer: hoog; verhoogt structurele veerkracht en verkleint seizoensgevoeligheid

4.6.4 Gevoeligheid bij contextscenario ‘sterk risicoverhogend’ en adaptatiescenario ‘Transformeren’

- Soorten zonder aanpassingsvermogen (bv. Obligaat zoetwater/koudwater/stromingsminnende soorten) vallen mogelijk uit
- Bentische fauna blijft gevoelig voor zuurstofloosheid zonder actief herstel

Adaptatiebuffer: sterk sturend; gevoeligheid blijft maar wordt proactief opgevangen door systeemaanpassing. Lokale veranderingen in gemeenschapssamenstelling (bv. Als gevolg van verzilting) ontstaan, maar worden elders gecompenseerd.

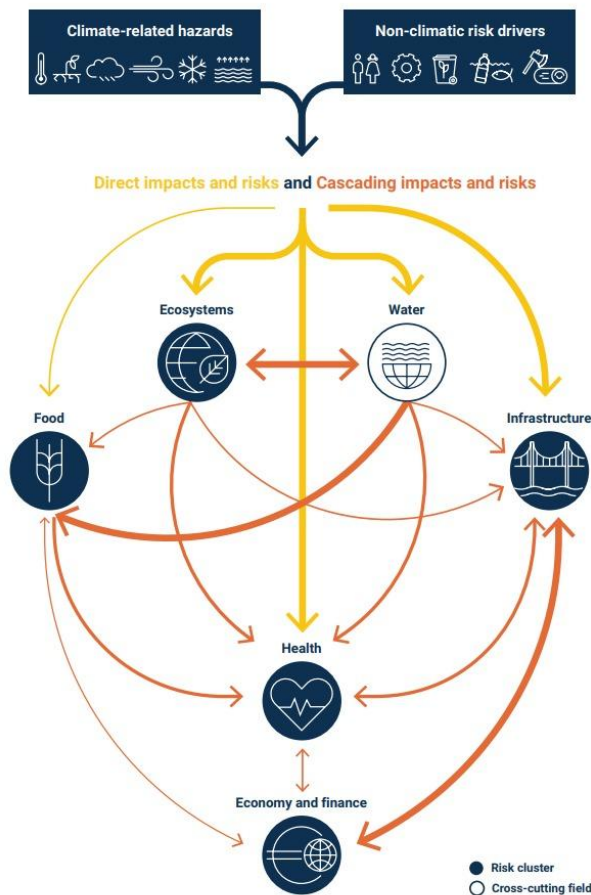
4.7 Impact

De ecologische impact van klimaatverandering op aquatische systemen uit zich via zowel directe als indirecte effecten op biodiversiteit, ecosysteemdiensten en functionele processen (Hoofdstuk 4). Door de optelsom van stressfactoren, zoals stratificatie, zuurstofloosheid en toxische druk, kan de functionele integriteit van ecosystemen verminderen.

- 4.7.1 Impact bij contextscenario ‘beperkt risicoverhogend’ en adaptatiescenario ‘Intensiveren’**
In dit scenario is de blootstelling aan klimaatrisico's beperkt. Daarom zijn ook de verwachte impacts beperkt. Toch blijven technische maatregelen continu nodig om schade te beperken.
- Incidentele uitval vis of schelpdieren bij lokale zuurstoftekorten
 - Stabiliteit ecosysteemfunctie grotendeels behouden
 - Enkele verstoringen in voedselweb (voorjaar/algen)
 - Behoud ecosysteemdiensten bij gerichte normhandhaving
- 4.7.2 Impact bij contextscenario ‘sterk risicoverhogend’ en adaptatiescenario ‘Intensiveren’**
De hoge blootstelling aan klimaatrisico's en het ontbreken van structurele systeemaanpassingen betekenen een verlies van natuurkwaliteit die slechts beperkt (in ruimte en tijd) opgevangen kunnen worden met technische maatregelen.
- Structurele algenbloei, verlies ondergedoken vegetatie
 - Herhaaldelijke sterfte-incidenten vis/schelpdieren
 - Verlies biodiversiteit, afname veerkracht
 - Verminderd zelfreinigend vermogen, verhoogde toxische druk
 - Verstoring ecosysteemfuncties
 - Beperkt herstelvermogen en toename extremen met blijvende verstoring
- 4.7.3 Impact bij contextscenario ‘beperkt risicoverhogend’ en adaptatiescenario ‘Transformeren’**
De blootstelling aan klimaatdrukfactoren is in dit scenario laag. Transformatieve maatregelen maken structureel herstel en toename van veerkracht mogelijk.
- Voorkomen van structurele problemen door versterken veerkracht via ruimtelijke ingrepen
 - Behoud biodiversiteit door versterking habitatkwaliteit
 - Functionele stabiliteit ecosysteem door beschaduwning en vegetatieherstel
 - Herstel van ecosysteemdiensten en kansen voor recreatie
 - Versterking van lokale buffering tegen extremen
- 4.7.4 Impact bij contextscenario ‘sterk risicoverhogend’ en adaptatiescenario ‘Transformeren’**
Ondanks een blijvend hoge blootstelling aan klimaatrisico's maakt het beleidsscenario adaptief beheer mogelijk, en daarmee ruimte voor nieuwe evenwichten.
- Beperkt maar aanwezig biodiversiteitsverlies ondanks ruimtelijk herontwerp
 - Beperking sterfte incidenten vis/schelpdieren via temperatuur- en zuurstofbuffering
 - Transitie ecosysteemstructuur, behoud functioneren via nieuwe natuurdoelen/types en evenwichten
 - Afschaling menselijke druk of verplaatsing functies (recreatie, visserij)
 - Minimale achteruitgang ecologische veerkracht ondanks veranderde soortensamenstelling
 - Langzaam herstel via adaptieve inrichting en monitoring, maar gevoelig voor extremen

4.8 Eind impact mens en cultuur

De eindimpact op mens en cultuur weerspiegelt de bredere gevolgen van ecologische achteruitgang als gevolg van klimaatverandering, veranderend landgebruik en waterbeheer (Figuur 4.7.4.1). Waar natuurlijke ecosystemen voorheen dienst deden als stabiele buffers tegen extreme weersomstandigheden en vervuiling, verschuift die functie steeds meer naar (afhankelijkheid van) menselijke systemen. Deze verschuiving brengt merkbare druk op gezondheid, veiligheid, levenskwaliteit en daarmee op sociaaleconomische stabiliteit. Belangrijk dilemma is dat maatregelen in het kader van klimaatmitigatie (vanuit andere disciplines, zoals veiligheid of zoetwatervoorziening) lokaal of regionaal vaak meer impact op natuurfuncties hebben dan de klimaatverandering zelf. Daarmee is ook de bedoelde bufferwerking gemoeid.



Figuur 4.7.4.1 Links tussen de klimaatdrukfactoren en enkele maatschappelijke domeinen (Bron: EEA, 2024)

De gevolgen van verminderde water- en natuurkwaliteit zijn voelbaar in het dagelijks leven. Afnemende ecologische weerbaarheid vergroot de kans op de verspreiding van infectieziekten via vectoren zoals muggen en teken, terwijl zwemverboden en afgesloten natuurgebieden de toegang tot recreatie beperken. Tegelijkertijd neemt de druk op essentiële voorzieningen zoals schoon drinkwater en voedselvoorziening toe, met als gevolg maatschappelijke ongelijkheid en toenemende bestaansonzekerheid. De beschreven ecologische veranderingen raken dus niet alleen natuurwaarden, maar vormen maatschappelijke opgaven die directe en langdurige impact hebben op alle domeinen van de samenleving.

4.8.1 Eind impact mens en cultuur bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'

Veiligheid

- Beperkte erosie langs kust en rivieren

Drinkwaterkwaliteit

- Hogere zuiveringskosten, nog beschikbaarheid
- Periodieke adviezen tegen recreatief watergebruik

Luchtkwaliteit

- Tijdelijke smogvorming in warme periodes
- Toename allergieën en ademhalingsproblemen bij kwetsbare groepen

Waterconflicten

- Spanningen tussen landbouw en natuur, incidenteel

Levenskwaliteit

- Zwemverboden door blauwalg op piekdagen
- Hogere voedselprijzen bij mislukte oogsten
- Werklast fluctueert in landbouw en visserij

Socio-economisch

- Beheersbare extra investeringen in zuivering en buffering
- Ongelijkheid in toegang tot groene ruimte zichtbaar in steden

4.8.2 Eind impact mens en cultuur bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'

Veiligheid

- Regelmatige overstromingen
- Frequentie natuurbranden, ook aan nabij steden

Drinkwaterkwaliteit

- Schaarste in kwetsbare gebieden, spoelverboden
- Noodmaatregelen in droge perioden

Luchtkwaliteit

- Structureel slechte luchtkwaliteit in steden

Waterconflicten

- Regionale conflicten tussen watergebruik landbouw – industrie – drinkwater

Levenskwaliteit

- Langdurige zwemverboden, natuurgebieden afgesloten voor recreatie
- Structurele voedseltekorten
- Verlies banen in landbouw/visserij; stijgende armoede
- Meer huishoudens zonder toegang tot water/verkoeling

Socio-economisch

- Oplopende kosten voor technische oplossingen
- Afname ecosysteemdiensten, toename kunstmatige buffering
- Vergroting kloof tussen economische klassen

4.8.3 Eind impact mens en cultuur bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'

Veiligheid

- Incidentele problemen met erosie, worden tijdig herkend en opgevangen
- Tijdige waterberging via overstromingsvlakten voorkomt schade
- Brandrisico afgenomen door herstel natuurfuncties

Drinkwaterkwaliteit

- Efficiënt gebruik RWZI-effluent vermindert belasting op natuur en leidt tot behoud kwaliteit
- Slechts tijdelijke beperkingen bij extreme droogte

Luchtkwaliteit

- Stedelijke vergroening vermindert smog

Waterconflicten

- Conflicten beperkt door ecosysteemgerichte waterverdeling

Levenskwaliteit

- Betere toegang tot gezonde natuur, minder sluitingen
- Verhoogde voedselzekerheid door lokaal robuust voedselbeleid
- Arbeid blijft beschikbaar in landbouw/herstelprojecten

Socio-economisch

- Innovatie verlaagt zuiveringskosten op termijn
- Buffergebieden functioneren als recreatie/natuurzones
- Gelijke toegang tot natuur en verkoeling bevordert

4.8.4 Eind impact mens en cultuur bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'

Veiligheid

- Grootschalige aanpassing ruimtelijke inrichting beperkt schade
- Sommige gebieden onbewoonbaar, geplande verplaatsingen
- Beheersing van branden via bufferzones

Drinkwaterkwaliteit

- Nieuwe bronnen en technieken garanderen basisvoorziening
- Hergebruik en filtering via natuurtechnieken

Luchtkwaliteit

- Stedelijke hitte-eilanden gecompenseerd via groen/blauwnetwerken
- Minder structurele luchtproblematiek dan bij intensiveren

Waterconflicten

- Conflicten geminimaliseerd via adaptieve governance
- Prioritering drinkwater en natuur boven industrie

Levenskwaliteit

- Betere bescherming kwetsbare groepen via klimaatactie
- Nieuwe voedselnetwerken en robuuste teeltstrategieën

Socio-economisch

- Hogere kosten op korte termijn, daling lange termijn door stabiliteit
- Herinrichting levert winsten in leefbaarheid en gezondheid

4.9 Eind impact natuur en milieu

Klimaatverandering leidt tot veranderingen in omgevingsfactoren zoals temperatuur, zuurstofhuishouding en zoutgehalte, met directe en indirecte gevolgen voor soortensamenstelling, ecosysteemprocessen en biodiversiteit. Verlies van inheemse soorten, opmars van exoten en het ontstaan van nieuwe, vaak instabiele evenwichten ondermijnen het doelbereik van beleidskaders als de Kaderrichtlijn Water (KRW) en Natura 2000 (N2000). De omvang van de eindimpact varieert afhankelijk van het scenario, maar kan bij uitblijven van structurele aanpassingen hoog en grotendeels onomkeerbaar zijn.

4.9.1 Eind impact natuur en milieu bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'

De impacts zijn beperkt hoewel lokaal wel effecten zichtbaar zijn. Karakteristieke soorten nemen af door veranderde timing van biologische processen of tijdelijke zuurstoftekorten. De algehele biodiversiteit blijft echter op peil bij gerichte maatregelen voor normhandhaving en waterkwaliteit. Ecosystemen zijn weerbaar tegen vestiging van exoten, en de natuurdoelen binnen KRW en N2000 blijven even haalbaar als nu. Herstel (van extremen) is mogelijk, mits monitoring en adaptief beheer tijdig ingrijpen bij signalen van verslechtering aanvullend op (beperkte) ruimtelijke maatregelen.

4.9.2 Eind impact natuur en milieu bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Intensiveren'

Achteruitgang is hoog en grotendeels onomkeerbaar. Grote delen van de huidige soortgemeenschappen verdwijnen uit Nederland door structurele zuurstofloosheid, toenemende toxiciteit en verlies aan habitatkwaliteit. Nieuwe soorten arriveren met vertraging, terwijl exoten en opportunistische pionierssoorten toenemen. Biodiversiteit neemt af, voedselwebben worden instabieler en ecologische functies verslechteren. KRW- en N2000-doelen komen structureel onder druk te staan. Maatregelen bieden beperkte vertraging van impact, maar geen structurele oplossing.

4.9.3 Eind impact natuur en milieu bij contextscenario 'beperkt risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'

Eindimpact is laag en grotendeels beheersbaar. Door ruimtelijke herinrichting en ecologisch herstel, zoals het stimuleren van beschaduwing en natuurlijke waterberging, blijven systemen functioneel en soortenrijk en treedt er enig herstel op van de eerder opgelopen verstoring. Verschuivingen in soortensamenstelling doen zich wel voor, maar leiden niet tot verlies van ecosysteemfunctionaliteit. KRW- en N2000-doelen komen toenemend binnen bereik dankzij proactieve maatregelen.

4.9.4 Eind impact natuur en milieu bij contextscenario 'sterk risicoverhogend' en adaptatiescenario 'Transformeren'

Eindimpact is matig tot hoog en deels onomkeerbaar. Door ruimtelijke en functionele herinrichting kunnen natuurdoelen op onderdelen worden aangepast aan nieuwe klimaatomstandigheden. Verlies van specifieke soorten is niet te voorkomen, maar systeemfuncties worden behouden door aansturen op klimaat robuuste habitats en het begeleiden van soortverschuivingen via o.a. connectiviteit. Biodiversiteit verschuift kwalitatief, niet uitsluitend negatief. KRW- en N2000-doelen moeten herijkt worden, maar blijven deels bereikbaar bij proactieve aanzet tot herstel.

4.10 Eind impact economie

Indirecte kosten via afname ecosysteem diensten. Mate en daarmee verschillen tussen scenario's zijn lastig te duiden. Onder andere links met:

- Waterveiligheid via afname sponswerking en toename erosie, wat kan leiden tot overstromingen en verdroging.
- Gezondheid via afname weerbaarheid ecosystemen voor plaagdieren en insecten zoals muggen welke ziekten over kunnen dragen, en toename van ziekmakende bacteriën zoals blauwalgen en botulisme.
- Waterbeschikbaarheid via invloed op kwelflux.
- Energietransitie, bijv. zon op water (effecten op watertemperatuur en stratificatie), thermische energie uit oppervlaktewater en koelwaterwinning. Daarnaast effect van waterkwaliteit op drinkwaterwinning

4.11 Waarschijnlijkheid

De waarschijnlijkheid van klimaatverandering is 1, het risico ontwikkelt zich continu via temperatuuroptename, veranderende neerslagpatronen en zeespiegelstijging. Trends in populatie omvang en verschuivingen in soortensamenstelling zijn gaande, evenals veranderingen in seizoensverloop. Sterfte- incidenten treden al op in samenhang met extreme gebeurtenissen zoals hittegolven en droogteperiodes, maar voor ecologische trends is dat alleen relevant als een incident permanente omslagen te weeg brengt.

4.12 Kwaliteitswaarborging

4.12.1 Transparantie, aggregatie en afbakening

Geïntegreerd in 4.12.2 en 4.12.3.

4.12.2 Kennishiaten

De kennis over de uitwerking van klimaatverandering en zeker over de ecologische effecten daarvan in onze wateren is beperkt. Dit is onder meer een gevolg van het nagenoeg ontbreken van langjarige, gedetailleerde meetreeksen van cruciale parameters zoals watertemperatuur, zeker op grotere diepte (demping fluctuaties, stratificatie). Ook is er veel minder informatie over verschuivingen in seizoenpatronen van ecologische parameters dan op land (bijvoorbeeld in start van het voorjaar op basis van aankomst of bloei van soorten). Dat komt omdat de meetprogramma's zich daar niet toe lenen. Het ontstaan van problemen door mismatches in

soortrelaties, effecten van afname van ijsbedekking, verlenging van het groeiseizoen (inclusief waterplanten, algenbloei) zijn niet in beeld. Aanvullende meetprogramma's in combinatie met modellering kunnen hierin verbetering brengen, ook met betrekking tot adaptatie.

De huidige analyse is beperkt tot gemiddelden en extremen in de zomerperiode. Dit gezien het feit dat de verschillende ecologische groepen met name gevoelig zijn voor hittegolven, droogval en verzilting. Andere klimaataspecten, zoals (tekort aan) ijsbedekking en overstromingen kunnen echter ook de ecologische gemeenschap vormgeven. In alle gevallen is de mate van invloed afhankelijk van de frequentie en duur van de verstoring, en de timing. Belangrijke 'kentallen' voor natuur hebben daarom baat bij een gedetailleerde uitwerking per maand omdat seizoenpatronen en fluctuaties tussen maanden/jaren belangrijk zijn om mee te nemen, aangezien ze ingrijpen op belangrijke natuurlijke processen zoals reproductieperiode, groeiseizoenen en rustfases.

Veel van de mitigatiestrategieën, met name voor het adaptatiescenario transformeren, kosten tijd voordat deze (optimaal) effect hebben. Voor efficiënte adaptatie is het dus nodig om tijdig in te grijpen, en mogelijk ook om korte termijn interventies te plegen terwijl lange termijn interventies worden voorbereid. Tot in welke mate dit wenselijk is, en welke combinaties passend zijn, is afhankelijk van de maatregel in kwestie en de schaal van toepassing, en daarmee situatie afhankelijk. Wanneer het gaat om toekomstige maatregelen zijn deze inschattingen nog lastiger om te maken. Om deze redenen is dit aspect niet in de huidige rapportage overwogen.

4.12.3 Onzekerheid en betrouwbaarheid

In de huidige analyses zijn interacties met menselijke drukfactoren als pesticiden, zware metalen en micro- en nanoplastics, die de gevoeligheid kunnen verheven, niet meegenomen. Ook ecologische cascades zijn beperkt overwogen. Vertaling naar impacts 2100 is hierdoor slechts grof te doen.

Door de afhankelijkheid van beschikbare data voor de huidige rapportage zijn enkele variabelen via indicatoren beoordeeld. Hierbij is uitgegaan van een lineair verband tussen debiet en stroomsnelheid en tussen GHG en droogval. Deze variabelen zijn onderhevig aan lokale verschillen in morfologie en kwelflux, wat tot een onderschatting leidt van variantie in impacts binnen watertypen. Een dergelijke onderschatting van variantie geldt ook voor de effecten van temperatuurstratificatie. Er is nog weinig bekend over de exacte mate van stratificatie tussen verschillende waterlichamen en lokale variatie door bijvoorbeeld vermindering van instraling tussen waterplanten. In de huidige analyse is een indicatie gegeven op basis van een gemiddeld temperatuurverschil tussen oppervlak en bodem van 5C.

De huidige beoordeling behandelt geen opeenstapelingen van bijvoorbeeld meerjarige droogte. Hierdoor wordt de achteruitgang meerjarige soorten en uitputting van zaadbank en bronpopulaties mogelijk onderschat.

4.12.4 Expertbeoordeling

NA

Referenties

- AQEM expert consortium 2002 Ecological classifications by AQEM expert consortium www.aqem.de
- Albayrack U. 1995 Megaloptera. In: Moog O. (Ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferungen 1995 2002. Wasserwirtschaftskataster Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft Wien.
- Albayrack U. Waringer J. & Weissmair W. 1995 Neuroptera (authors depending on family). In: Moog O. (Ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferungen 1995 2002. Wasserwirtschaftskataster Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft Wien.
- Banning M. 1990 Der Rheo-Index - eine Möglichkeit zur Berechnung der Auswirkungen des Flußstaus auf die benthische Lebensgemeinschaft. Erweiterte Zusammenfassung der Jahrestagung der DGL in Essen: 186-190.
- Brabec K. Janecek B.F.U. Rossaro B. Spies M. Bitusik P. Syrovatka
- Braukmann U. & Biss R. 2004 Conceptual study - An improved method to assess acidification in German streams by using benthic macroinvertebrates. *Limnologia* 34 (4): 433-450.
- Biggs, R. M. Schlüter, M.L. Schoon (eds). 2015. Principles for Building Resilience - Sustaining Ecosystem Services in Social-Ecological Systems. Cambridge University Press.
- Buitink, J., Tsiokanos, A., Geertsema, T., ten Velden, C., Bouaziz, L., Serna Weiland, F. 2023. Implications of the KNMI'23 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse. Deltareport 11209265-002-ZWS-0003.
- Buffagni A. Armanini D.G. Cazzola M. Alba-Tercedor J. López-Rodríguez M.J. Murphy J. Sandin L. & Schmidt-Kloiber A. 2024 Dataset "Ephemeroptera". www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms
- Buitink, J., Tsiokanos, A., Geertsema, T., ten Velden, C., Bouaziz, L., Serna Weiland, F. 2023. Implications of the KNMI'23 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse. Deltareport 11209265-002-ZWS-0003. Buffagni A. Cazzola M. López-Rodríguez M.J. Alba-Tercedor J. & Armanini D.G. 2009 Distribution and Ecological Preferences of European Freshwater Organisms. Volume 3 - Ephemeroptera. Edited by Schmidt-Kloiber A. & D. Hering. Pensoft Publishers (Sofia-Moscow). 254pp.
- Car M. Mohrig W. Moog O. Oosterbroek P. Reusch H. Wagner R. & Zwick P. 1995 Diptera (except Chironomidae) (authors depending on family). In: Moog O. (Ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferungen 1995
- Chovanec A. Waringer J. Holzinger W.E. Moog O. & Janecek B. 2017 Odonata. In Moog O. & A. Hartmann (Eds.): Fauna Aquatica Austriaca 3. Edition 2017. BMLFUW Wien. (and previous editions)
- CSN 75 (7716)1998 Water quality biological analysis determination of saprobic index. Czech Technical State Standard. Czech Standards Institute Prague 174p.
- DEV (Deutsches Institut für Normung e.V.) 2003 Biologisch-ökologische Gewässeruntersuchung: Bestimmung des Saprobienindex (revidierte Fassung). Deutsche Einheitsverfahren

- Delsman, J., I. America en T. Mulder (2022). Grondwaterverzuiling en watervraag bij een stijgende zeespiegel. Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II. 11208039-001-BGS-0001.
- Dijkstra K.-D.B. Wildermuth H. & Martens A. 2024 Dataset "Odonata". www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).
- Eder E. Hödl W. Moog. O. Neumann H. Pöckl M. & Wittmann K. 1995 Crustacea (authors depending on taxagroup). In: Moog O. (Ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferungen 1995 2002. Wasserwirtschaftskataster Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft
- European Environment Agency (EEA). 2024. European Climate Risk Assessment. Executive Summary. Report 01/2024. DOI: 10.2800/204249
- Graf W. 2020 Update zur Fauna Aquatica Austriaca Edition 2017: Trichoptera.
- Graf W. Grasser U. & Waringer J. 1995 Trichoptera. In: Moog O. (ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferung 1995. Wasserwirtschaftskataster Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Wien.
- Graf W. Grasser U. & Weinzierl A. 1995 Plecoptera. In: Moog O. (ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferung 1995. Wasserwirtschaftskataster Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Wien.
- Graf W. Lorenz A.W. Tierno de Figueroa J.M. Lücke S. López-Rodríguez M.J. & Davies C. 2009 Distribution and Ecological Preferences of European Freshwater Organisms. Volume 2 - Plecoptera. Edited by Schmidt-Kloiber A. & D. Hering. Pensoft Publishers (Sofia-Moscow). 262pp.
- Graf W. Lorenz A.W. Tierno de Figueroa J.M. Lücke S. López-Rodríguez M.J. Murphy J. & Schmidt-Kloiber A. 2024 Dataset "Plecoptera". www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).
- Graf W. Murphy J. Dahl J. Zamora-Muñoz C. & López-Rodríguez M.J. 2008 Distribution and Ecological Preferences of European Freshwater Organisms. Volume 1 - Trichoptera. Edited by Schmidt-Kloiber A. & D. Hering. Pensoft Publishers (Sofia-Moscow). 388pp.
- Graf W. Murphy J. Dahl J. Zamora-Muñoz C. López-Rodríguez M.J. & Schmidt-Kloiber. A. 2024 Dataset "Trichoptera". www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).
- Grenouillet G. & Schmidt-Kloiber. A. 2006 Fish Indicator Database. Euro-limpacs project Workpackage 7 - Indicators of ecosystem health Task 4. accessed via <http://www.freshwaterecology.info> - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).
- Halle M. Müller A. & Sundermann A. 2016 Ableitung von Temperaturpräferenzen des Makrozoobenthos für die Entwicklung eines Verfahrens zur Indikation biozoologischer Wirkungen des Klimawandels in Fließgewässern. KLIWA- Berichte Heft 20 (www.kliwa.de).
- Hershkovitz Y. Dahm V. Lorenz A.W. & Hering D. 2014 A multi-trait approach for the identification and protection of European freshwater species that are potentially vulnerable to the impacts of climate change. Ecological Indicators 50: 150–160.
- Huemer P. & Tarmann G. 1995 Lepidoptera. In: Moog O. (Ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferungen 1995 2002. Wasserwirtschaftskataster Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft Wien.

- Huemer P. & Tarmann G. 2017 Lepidoptera. In Moog O. & A. Hartmann (Eds.): Fauna Aquatica Austriaca 3. Lieferung 2017. BMLFUW Wien.
- Janecek B.F.U. Moog O. & Waringer J. 1995 Odonata. In: Moog O. (Ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferungen 1995 2002. Wasserwirtschaftskataster Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft Wien.
- Janecek B.F.U. Moog O. Moritz C. Orendt C. & Saxl R. 2002 Chironomidae (authors depending on subfamily). In: Moog O. (Ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferung 2002. Wasserwirtschaftskataster Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft Wien.
- Marcoci I. 1984 Analiza biologica a apelor (Biological analysis of waters). - Romanian Academy Bucharest.
- Materia, S., Ardilouze, C., Prodhomme, C., Donat, M. G., Benassi, M., Doblas-Reyes, F. J., Peano, D., Caron, L.-P., Ruggieri, P., & Gualdi, S. (2022). Summer temperature response to extreme soil water conditions in the Mediterranean transitional climate regime. *Climate Dynamics*, 58(7–8), 1943–1963.
<https://doi.org/10.1007/s00382-021-05815-8>
- Mens, M., Hunink, J., Delsman, J., Pouwels, J., Schasfoort, F. 2020. Geactualiseerde knelpuntenanalyse voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II. Deltares rapport 11203734-003-ZWS-0003.
- Mens, M., Pouwels, J., Weiler, O., Delsman, J., Huismans, Y., 2024. De zoetwaterbalans van laag Nederland in een warmer klimaat. Deltares rapport 11210362-000-ZWS-0001.
- Mihaljevic Z., 2011, Revizija hrvatskog indikatorskog sustava (Revision of Croatian indicator system). In: Mihaljević Z (ed.) Testiranje bioloških metoda ocjene ekološkog stanja (Okvirna direktiva o vodama 2000/60/EC) u reprezentativnim slivovima panonske i dinaridske ekoregije (Testing of biological methods for ecological status assessment (Water Framework Directive 2000/60/EC) in representative river basins of the Pannonian and Dinaric ecoregions). Studija Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu (In Croatian).
- Moog O. 1995 Functional-Feeding Guilds - Family/Genus Level. Fauna Aquatica Austriaca Lieferungen 1995. Wasserwirtschaftskataster Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft Wien.
- Moog O. & Hartmann A. (Eds.), 2017, Diptera. In Moog O. & A. Hartmann (Eds.): Fauna Aquatica Austriaca 3. Lieferung 2017. BMLFUW Wien.
- Nesemann H. & Moog O., 1995, Hirudinea. In: Moog O. (Ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferungen 1995 2002. Wasserwirtschaftskataster Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft Wien.
- Nesemann H. & Moog O., 2017, Hirudinea. In Moog O. & A. Hartmann (Eds.): Fauna Aquatica Austriaca 3. Lieferung 2017. BMLFUW Wien.
- Nesemann H. & Reischütz P.L., 1995, Gastropoda. In: Moog O. (Ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferungen 1995 2002. Wasserwirtschaftskataster Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft Wien.
- Nesemann H. & Reischütz P.L., 1995, Bivalvia. In: Moog O. (Ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferungen 1995 2002. Wasserwirtschaftskataster Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft Wien.

- Nesemann H. & Reischütz P.L., 1995, Gastropoda. In: Moog O. (Ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferungen 1995 2002. Wasserwirtschaftskataster Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft Wien.
- Noordhuis, S. de Rijk, G. van Geest, M. Maarse, S. Vergouwen & A. Boon (2019). Klimaatscan. Rapport 11203733-000-ZWS-0006, Deltares, Utrecht.
- Noordhuis R., L. van der Heijden en A. de Jong. (2021) Effecten van temperatuur toename op de grote wateren. Een literatuurstudie met data-overzicht. Rapport 11205270-005-ZWS-0003, Deltares, Utrecht.
- Kramer, N., Mens, M., Beersema, J. and Kielen, N.(2019) Hoe extreem was de droogte van 2018?, H2O-Online. Available from: <https://www.h2owaternetwerk.nl/vakartikelen/hoe-extreem-was-de-droogte-van-2018> (Accessed 1 April 2023)
- Pall, K., Plachy, B., Pall, S., 2024, Dataset Macrophytes. www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms, version 8.0 (accessed on 16.11.2024).
- Pöckl M. Borza P. Nesemann H.F. & Moog. O. 2017 Crustacea: Amphipoda Isopoda Decapoda. In Moog O. & A. Hartmann (Eds.): Fauna Aquatica Austriaca 3. Lieferung 2017. BMLFUW Wien.
- Pouwels, J. I. America, J. Delsman en M. Mens (2021). Stresstest voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II. Het effect van nieuwe inzichten op knelpunten in de zoetwatervoorziening. Deltares rapport 11206829-002-ZWS-0001.
- Reischütz A. Reischütz P.L. Moog O. & Nesemann H.F. 2017 Mollusca: Gastropoda. In Moog O. & A. Hartmann (Eds.): Fauna Aquatica Austriaca 3. Lieferung 2017. BMLFUW Wien.
- Reischütz A. Reischütz P.L. Moog O. & Nesemann H.F. 2017 Mollusca: Bivalvia. In Moog O. & A. Hartmann (Eds.): Fauna Aquatica Austriaca 3. Lieferung 2017. BMLFUW Wien.
- Schmedtje U. & Colling M. 1996 Ökologische Typisierung der aquatischen Makrofauna. Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft 4/96 543 pp.
- Schmidt-Kloiber A. & Hering D. 2015 www.freshwaterecology.info - an online tool that unifies standardises and codifies more than 20000 European freshwater organisms and their ecological preferences. Ecological Indicators 53: 271-282. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.02.007
- Schmidt-Kloiber A. & Hering D. (eds.) 2024 www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).
- Schinegger R. Friedrich T. & Meulenbroek P. 2024 Dataset "Fish". www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).
- Sporka F. (ed.) 2003. Vodne bezstavovce (makrovertebrata) Slovenska supis druhov a autekologicke charakteristiky. Slovak Aquatic Macrovertebrates Checklist and Catalogue of Autecological Notes. Slovensky hydrometeorologicky ustav Bratislava 590p.
- Stowa (2016). 'Habitat Suitability', an Ecological Key Factor in standing waters. 2016-W-02.
- ter Maat, J., Asselman, N., Mens, M., Penning, E., & Sperna Weiland, F. (2024). Hoe verandert het afvoerregime van de Rijn in de toekomst, en welke impact heeft dit op zoetwaterbeschikbaarheid, waterveiligheid, natuur en bevaarbaarheid? (Hackaton Nos. 11210275-004-BGS-0001). Deltares.

- Van der Hoek W.F. & Verdonschot P.F.M. 1994 Functionele karakterisering van aquatische ecotootypen. IBN rapp 072: 1-81.
- Verdonschot P.F.M. 1990 Ecological characterization of surface waters in the province of Overijssel (The Netherlands). Thesis Wageningen: 255p.
- Moog, O 1995 Bryozoa. In: Moog O. (Ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferungen 1995 2002. Wasserwirtschaftskataster Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft Wien.
- Moog, O 2017 Bryozoa. In Moog O. & A. Hartmann (Eds.): Bryozoa. In: Moog O. (Ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferungen 1995 2002.
- Wiberg-Larsen P. & Karsholt O. 1999 The traffic of adult Trichoptera above the city Copenhagen (Denmark). Entomologiske Meddelelser 67(4): 123-136.
- Wittmann K. 2017 Crustacea: Mysida. In Moog O. & A. Hartmann (Eds.): Fauna Aquatica Austriaca 3. Lieferung 2017. BMLFUW Wien.
- Working group Aquatic Ecology (University Duisburg-Essen) 2016 Classifications for groundwater influence (expert judgement).
- Working group Aquatic Ecology (University Duisburg-Essen) 2024 Dataset "Oligochaeta". www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).
- Working group Aquatic Ecology (University Duisburg-Essen) 2024 Dataset "Crustacea". www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).
- Working group Aquatic Ecology (University Duisburg-Essen) 2024 Dataset "Bryozoa". www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).
- Working group Aquatic Ecology (University Duisburg-Essen) 2024 Dataset "Oligochaeta". www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).
- Working group Aquatic Ecology (University Duisburg-Essen) 2024 Dataset "Gastropoda". www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).
- Working group RHEOPHYLAX (BOKU Vienna) 2020 New biological traits and ecological preferences of European freshwater organisms for freshwaterecology.info.
- Working group RHEOPHYLAX (BOKU Vienna) 2024 Dataset "Gastropoda". www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).
- Working group RHEOPHYLAX (BOKU Vienna) 2024 Dataset "Odonata". www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).
- Working group RHEOPHYLAX (BOKU Vienna) 2024 Dataset "Ephemeroptera". www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).

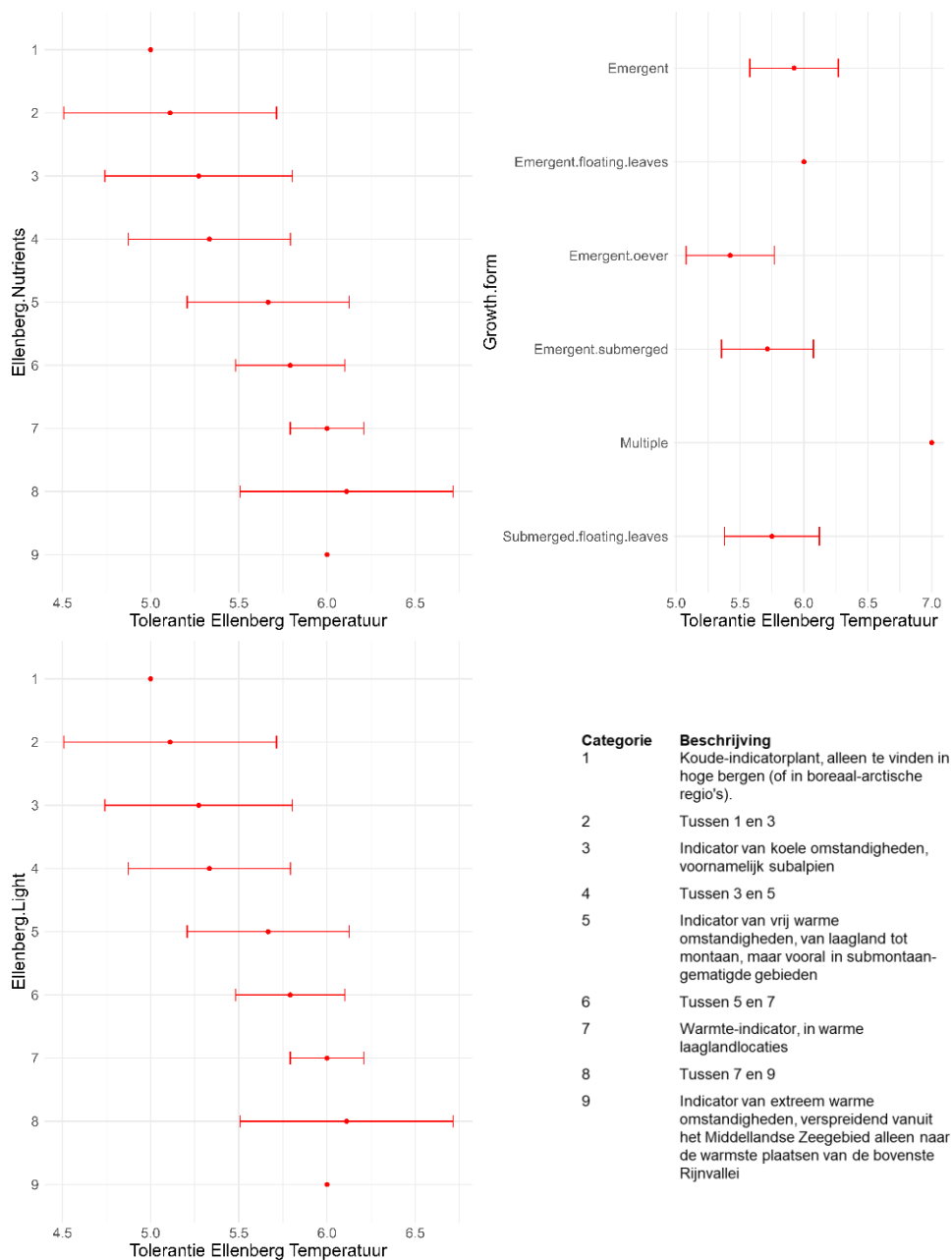
Working group RHEOPHYLAX (BOKU Vienna) 2024 Dataset "Bivalvia". www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).

Zettel H. 1995 Heteroptera. In: Moog O. (Ed.): Fauna Aquatica Austriaca Lieferungen 1995 2002. Wasserwirtschaftskataster Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft Wien.

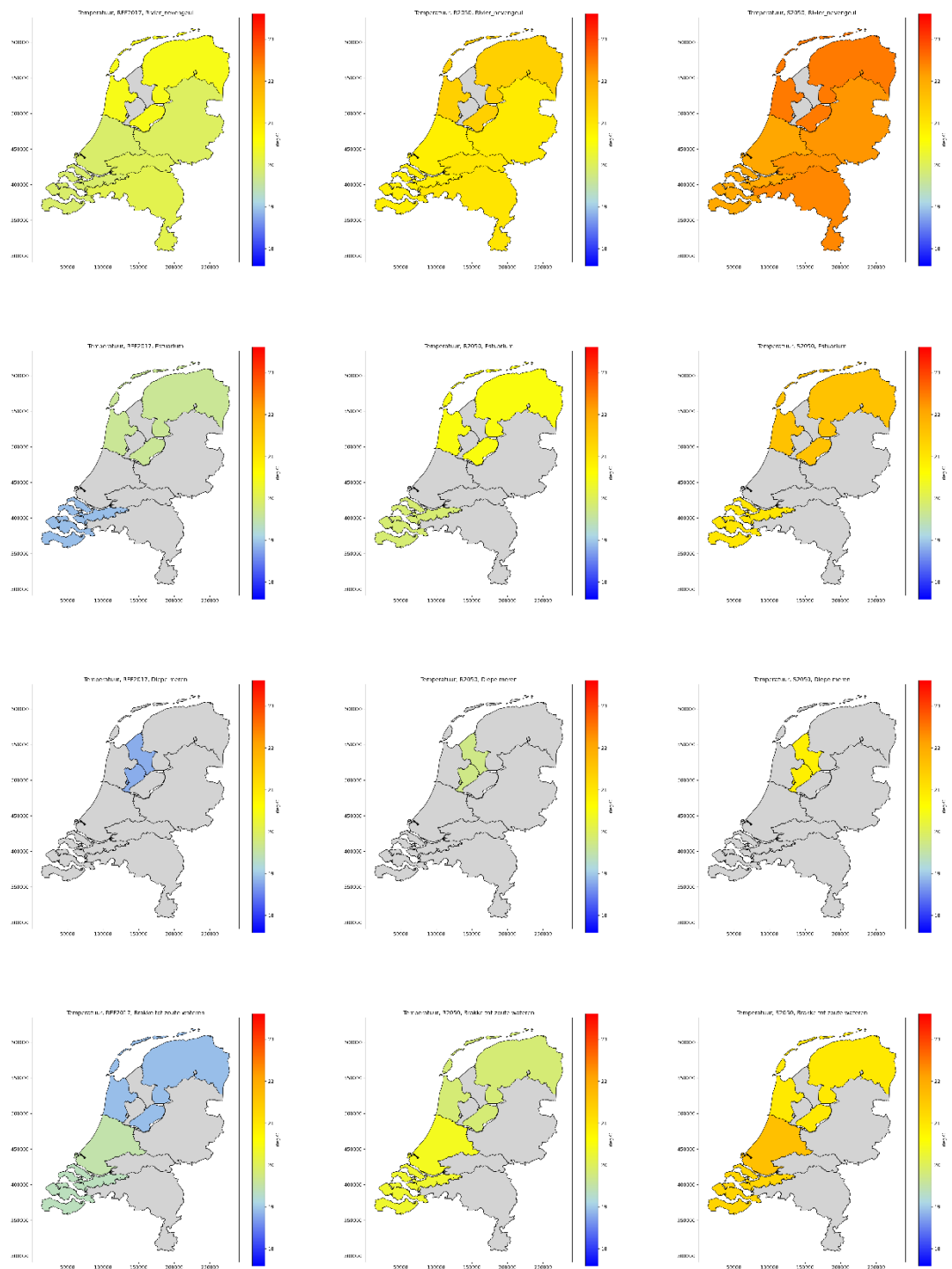
Zettel H. & Rabitsch W. 2017 Heteroptera. In Moog O. & A. Hartmann (Eds.): Fauna Aquatica Austriaca 3. Lieferung 2017. BMLFUW Wien. 2024 Dataset "Chironomidae". www.freshwaterecology.info - the taxa and autecology database for freshwater organisms version 8.0 (accessed on 16.11.2024).

5 Appendices

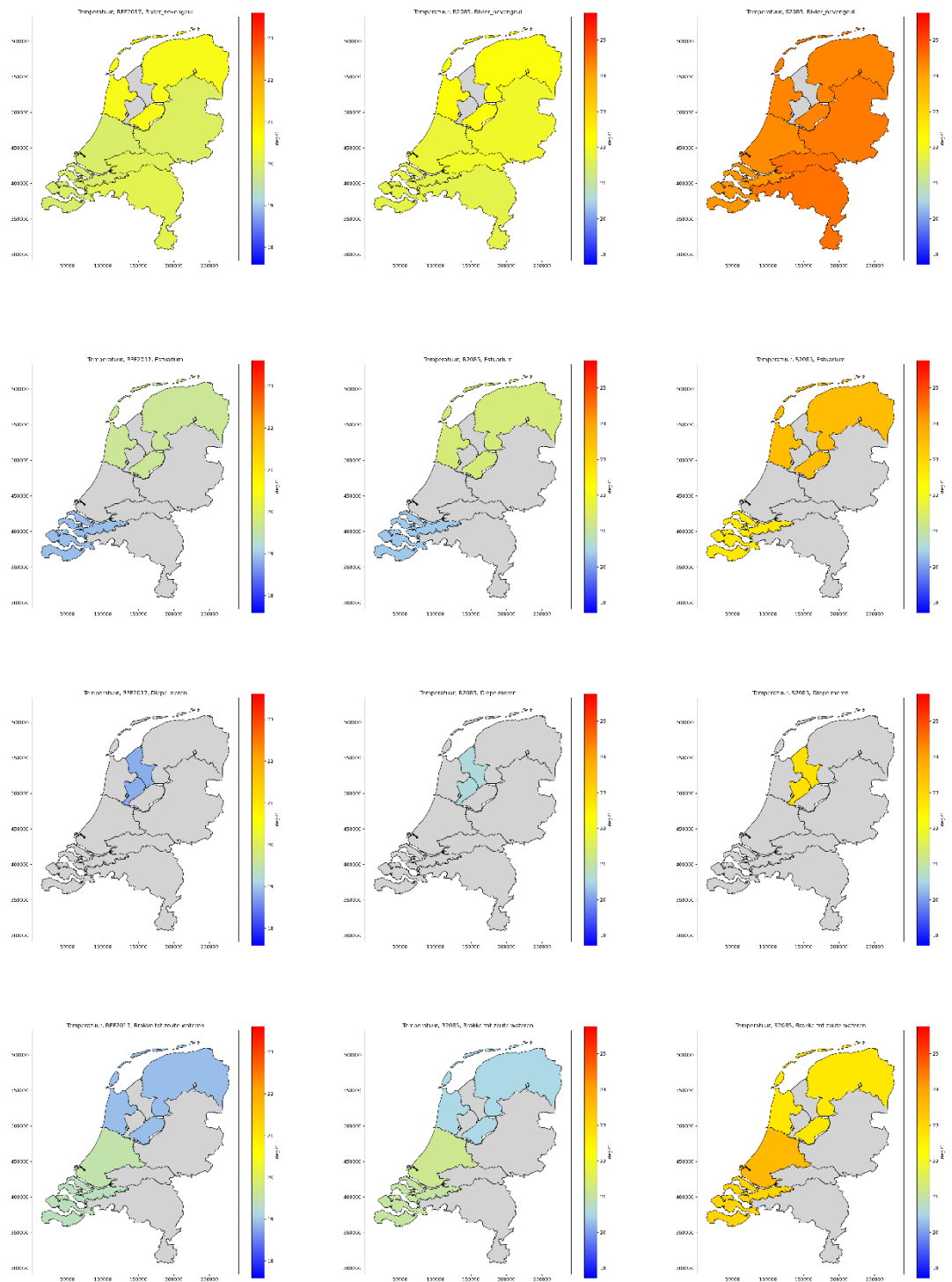
5.1 Appendix A Aanvullende functionele eigenschappen macrofyten



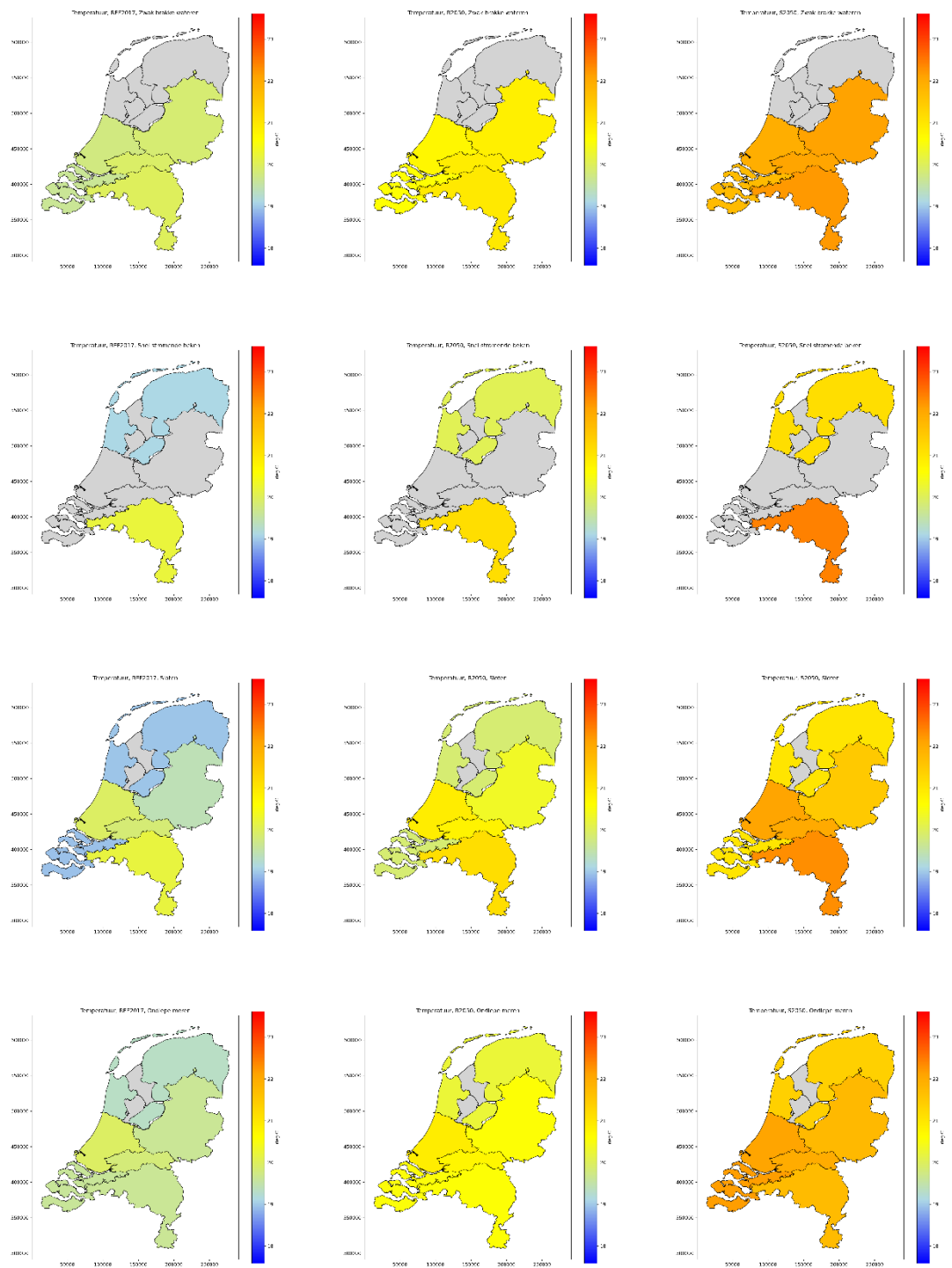
Figuur S1 Maximum temperatuurtolerantie (95% betrouwbaarheidsinterval) functionele planten groepen op basis van a) voorkeur eutrofie, b) groeivorm ten opzichte van waterstand of c) voorkeur voor lichtsterkte. Het rode interval geeft de verdeling van maximumtoleranties aan. Bij temperaturen hoger dan het begin (links) van het maximuminterval zal een deel van de soorten binnen de gilde niet voor kunnen komen.



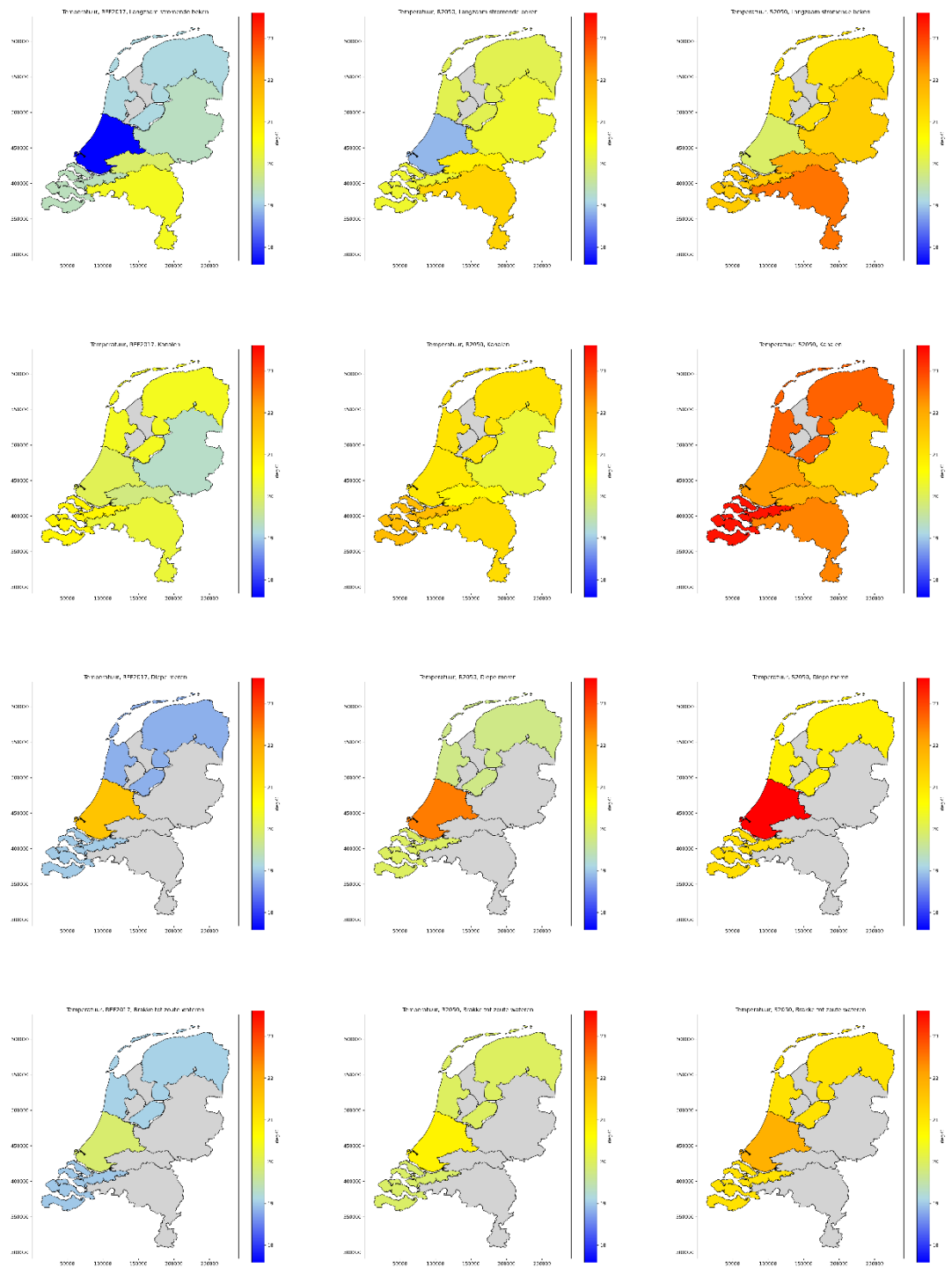
Figuur S2a Gemiddelde zomertemperaturen (°C) Rijkswateren v.l.n.r. scenario's referentie (2017), rust (2050) en stoom (2050), v.b.n.o. watercluster nevengeul, estuarium, diepe meren, brakke tot zoute wateren. De temperaturen liggen tussen de 18 en 23 graden Celsius.



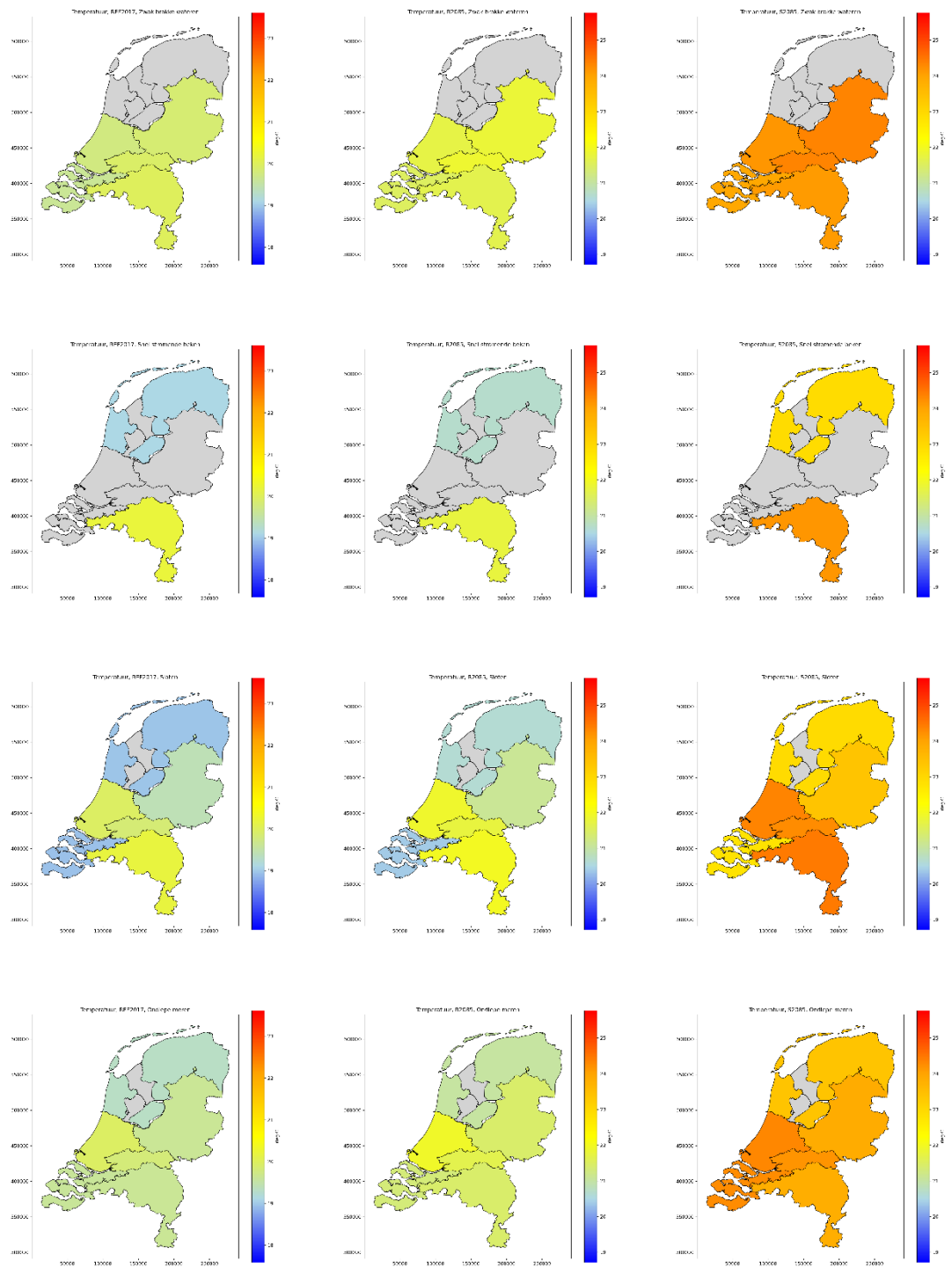
Figuur S2b Gemiddelde zomertemperaturen (°C) Rijkswateren v.l.n.r. scenario's referentie (2017), rust (2085) en stoom (2085), v.b.n.o. watercluster nevengeul, estuarium, diepe meren, brakke tot zoute wateren. De temperaturen liggen tussen de 18 en 23 graden Celsius.



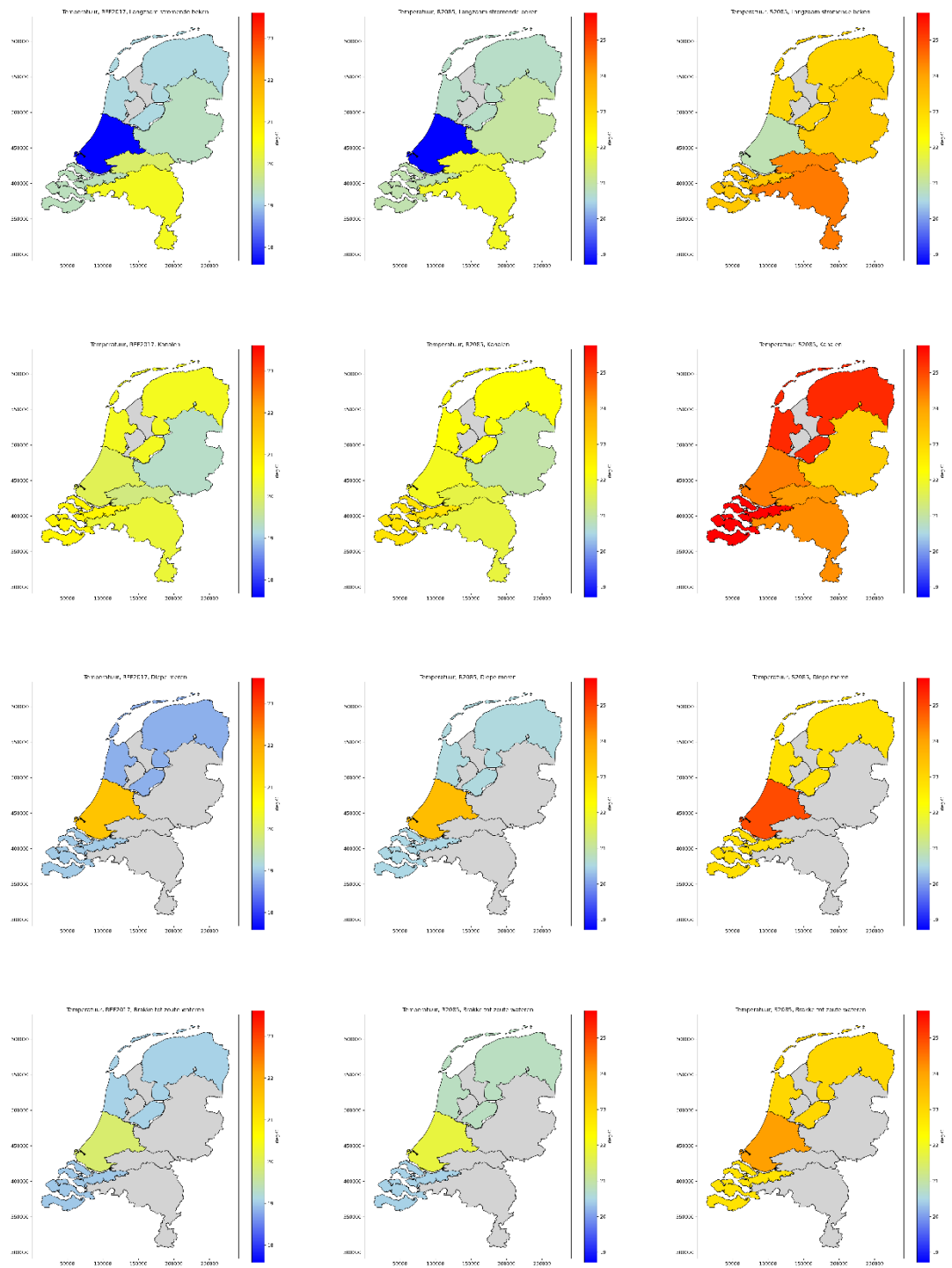
Figuur S3a Gemiddelde zomertemperaturen (°C) Regionale wateren v.l.n.r. scenario's referentie (2017), rust (2050), stoom (2050), v.b.n.o. zwak brakke wateren, snelstromende beken, sloten en ondiepe meren. De temperaturen liggen tussen de 18 en 23 graden Celsius.



Figuur S3b Gemiddelde zomertemperaturen (°C) Regionale wateren v.l.n.r. scenario's referentie, rust (2050), stoom (2050), v.b.n.o. langzaam stromende beken, kanalen, diepe meren en brakke tot zoute wateren. De temperaturen liggen tussen de 18 en 23 graden Celsius.

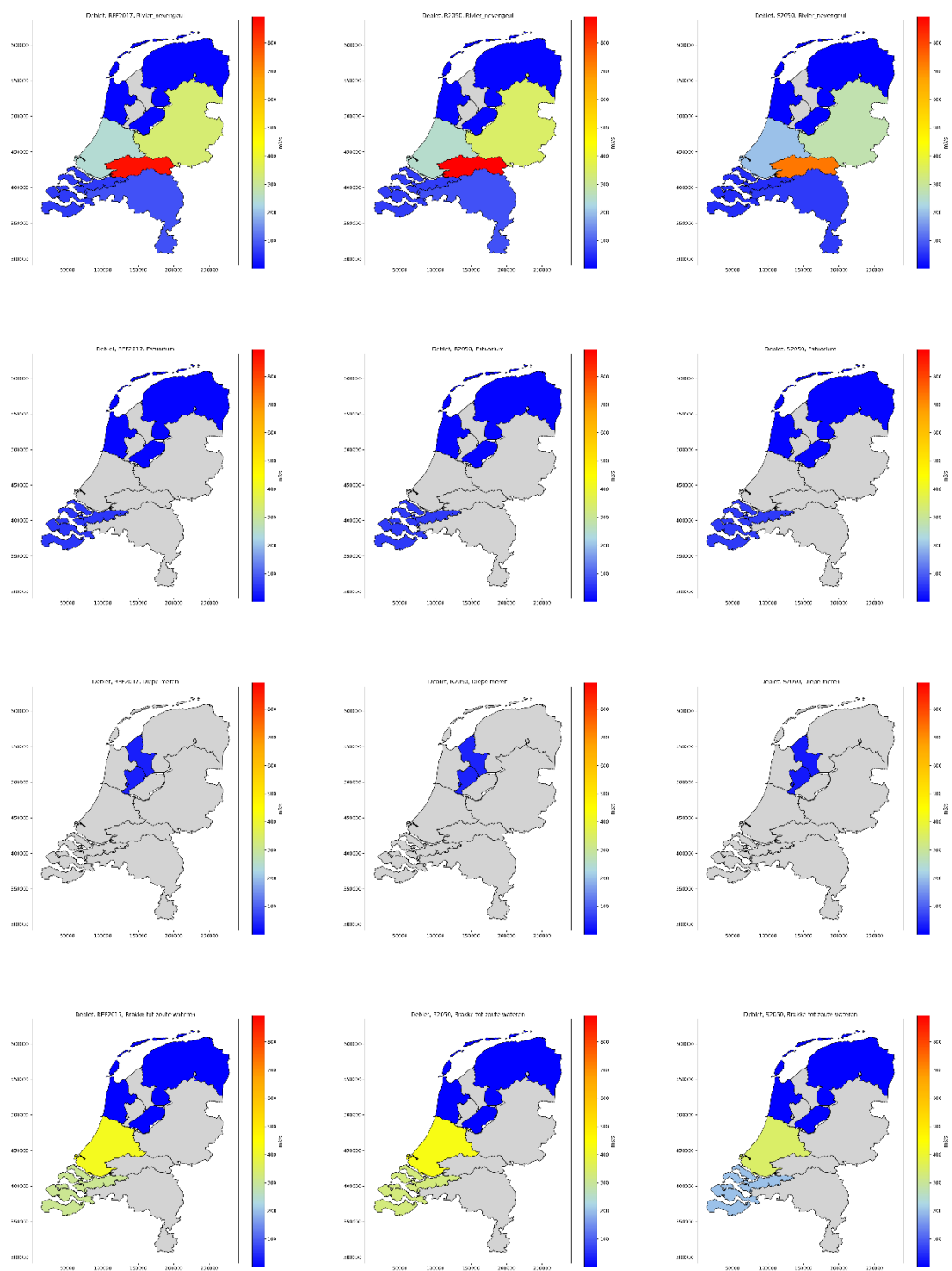


Figuur S3c Gemiddelde zomertemperaturen (°C) Regionale wateren v.l.n.r. scenario's referentie (2017), rust (2085), stoom (2085), v.b.n.o. zwak brakke wateren, snelstromende beken, sloten en ondiepe meren. De temperaturen liggen tussen de 18 en 23 graden Celsius.

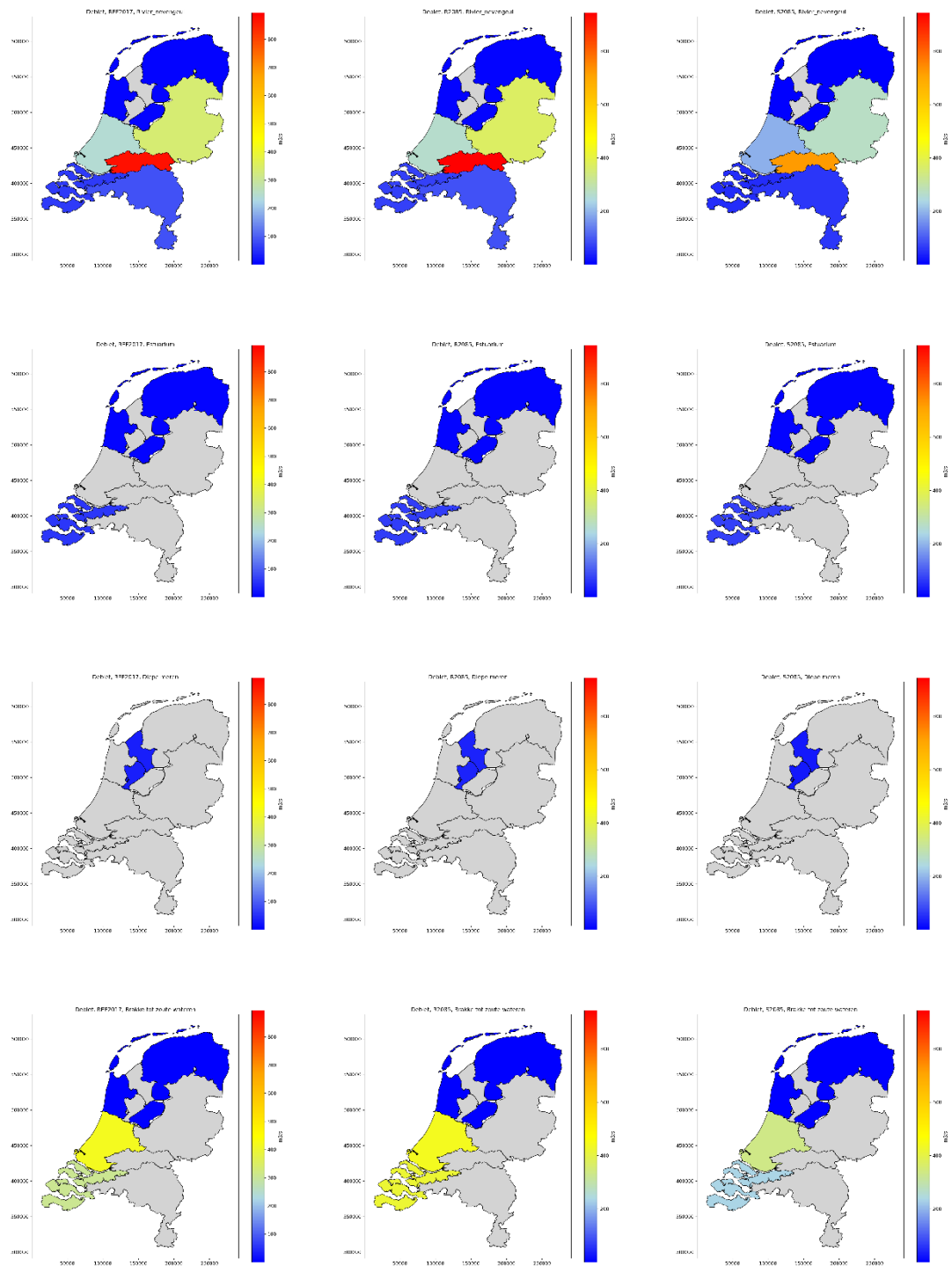


Figuur S3d Gemiddelde zomertemperaturen (°C) Regionale wateren v.l.n.r. scenario's referentie, rust (2085), stoom (2085), v.b.n.o. langzaam stromende beken, kanalen, diepe meren en brakke tot zoute wateren. De temperaturen liggen tussen de 18 en 23 graden Celsius.

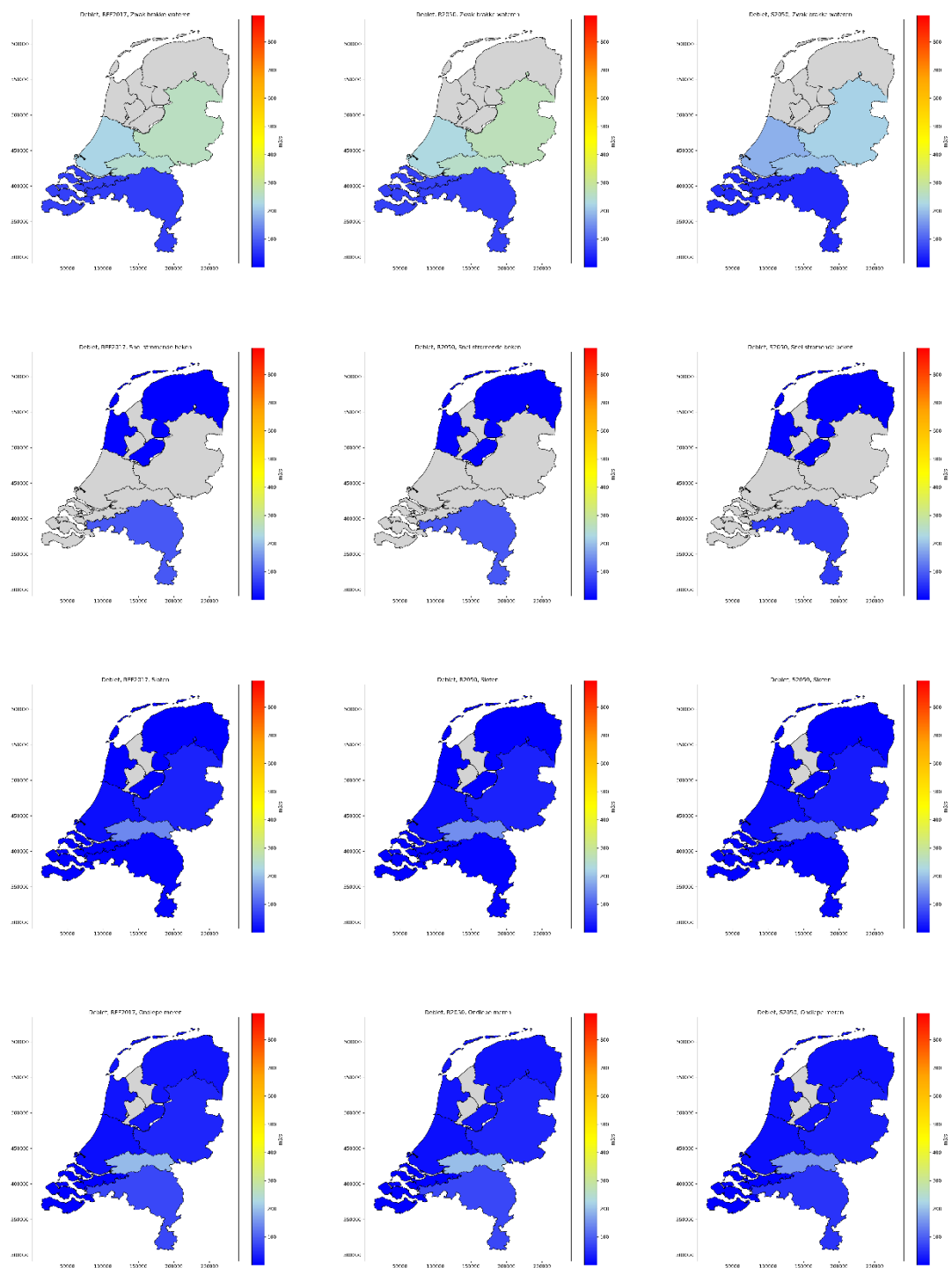
5.4 Appendix D Gemiddeld zomer debiet oppervlaktewater Rijkswateren



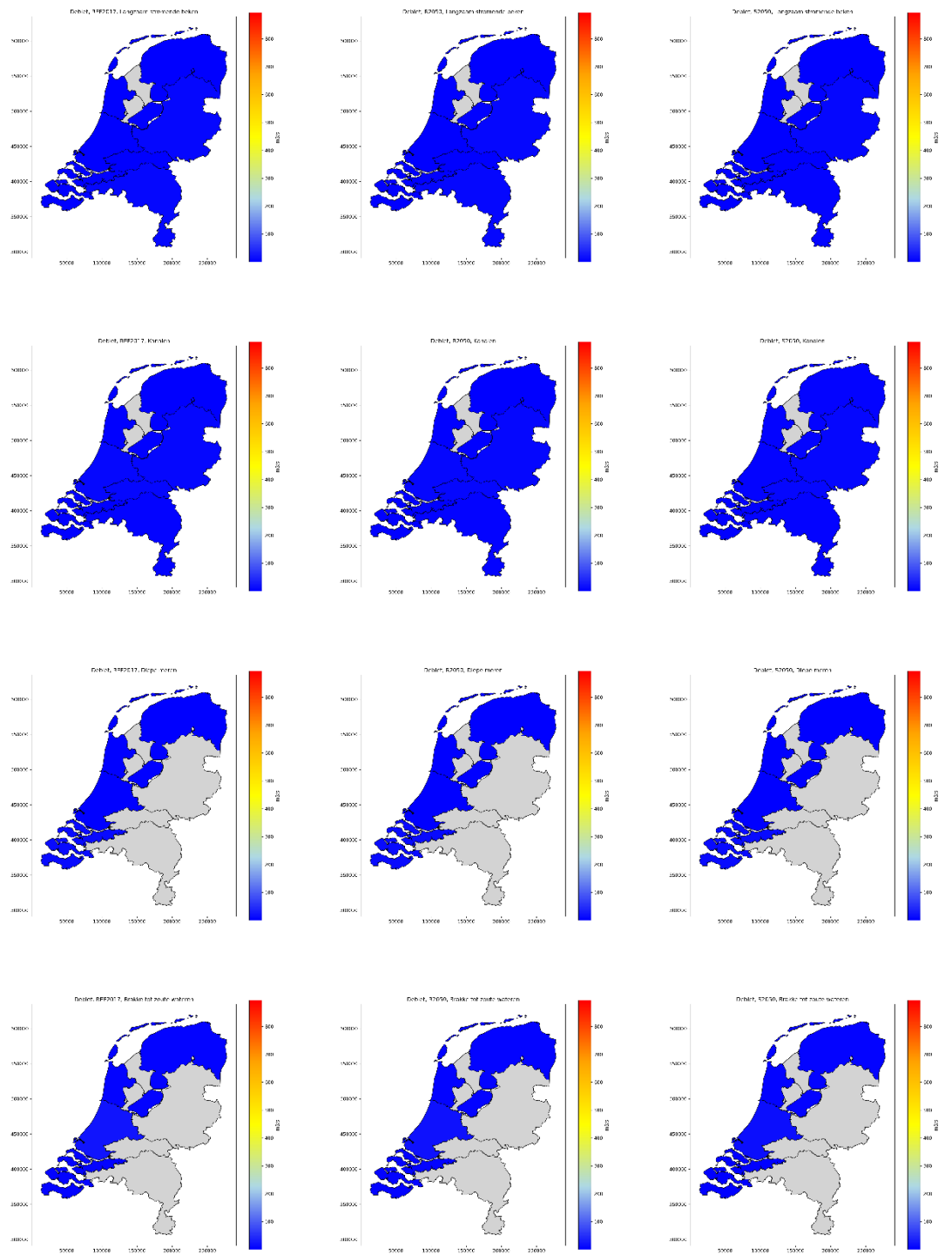
Figuur S3a Gemiddeld zomerdebiet (m^3/s) Rijkswateren v.l.n.r. scenario's referentie (2017), rust (2050) en stoom (2050), v.b.n.o. watercluster nevengeul, estuarium, diepe meren, brakke tot zoute wateren. De debieten liggen tussen de 100 en 800 m^3/s .



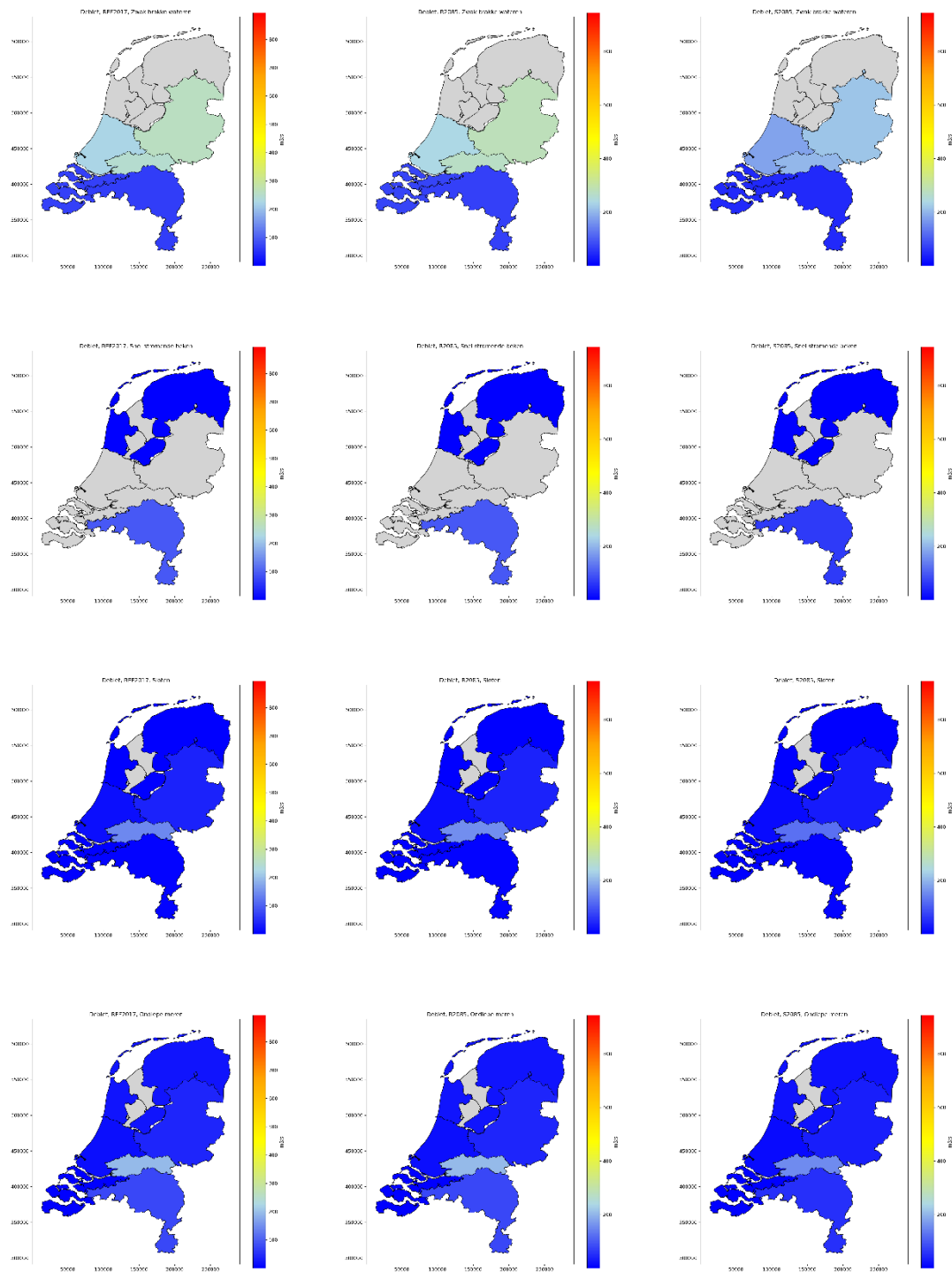
Figuur S3b Gemiddeld zomerdebiet (m^3/s) Rijkswateren v.l.n.r. scenario's referentie (2017), rust (2085) en stoom (2085), v.b.n.o. watercluster nevengeul, estuarium, diepe meren, brakke tot zoute wateren. De debieten liggen tussen de 200 en 800 m^3/s .



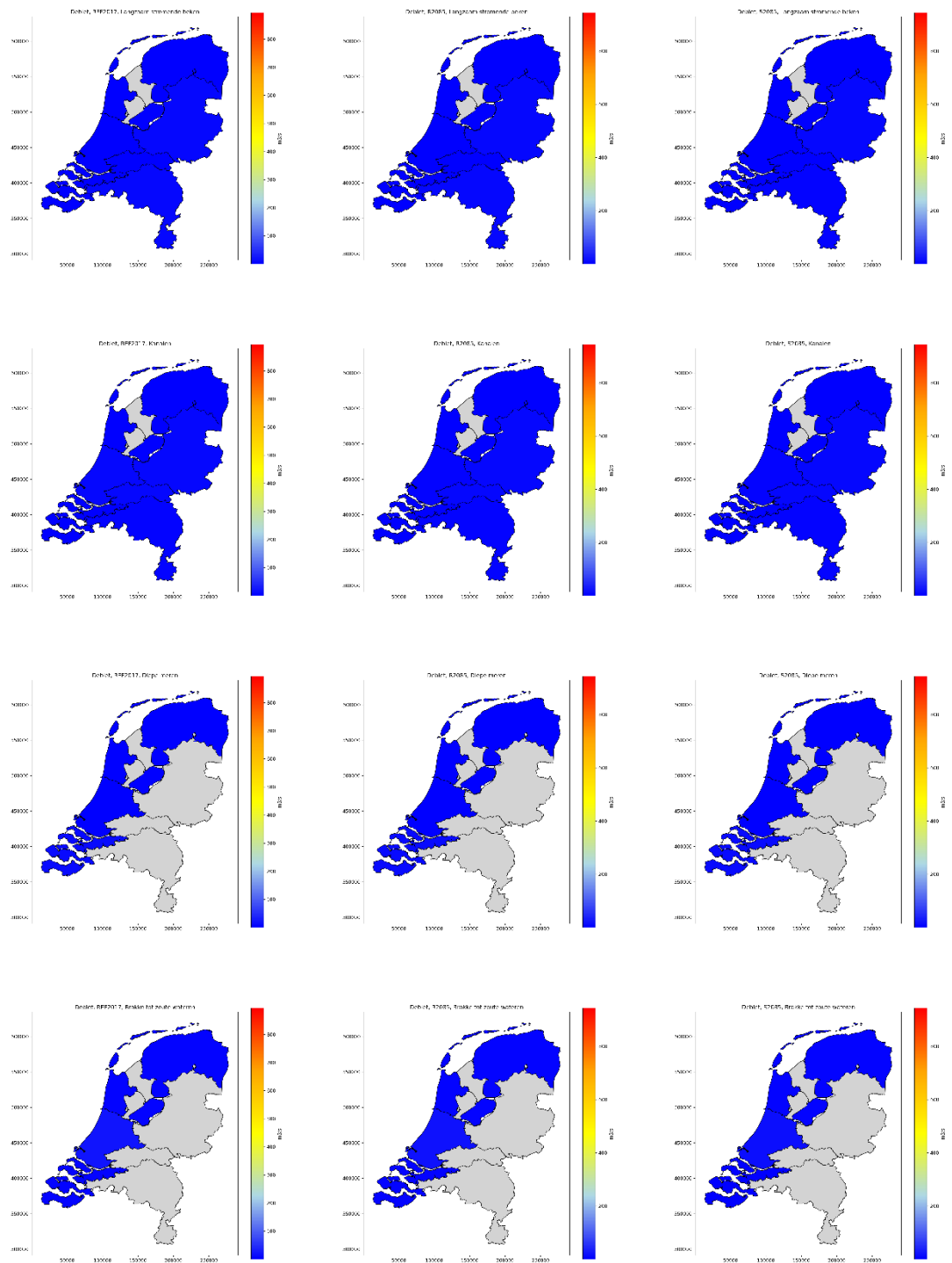
Figuur S5a Gemiddeld zomerdebiet (m^3/s) Regionale wateren v.l.n.r. scenario's referentie (2017), rust (2050), stoom (2050), v.b.n.o. zwak brakke wateren, snelstromende beken, sloten en ondiepe meren. De debieten liggen tussen de 100 en 800 m^3/s .



Figuur S5b Gemiddeld zomerdebiet (m^3/s) Regionale wateren v.l.n.r. scenario's referentie, rust, stoom, v.b.n.o. langzaam stromende beken, kanalen, diepe meren en brakke tot zoute wateren. De debieten liggen tussen de 100 en 800 m^3/s .



Figuur S5c Gemiddeld zomerdebiet (m^3/s) Regionale wateren v.l.n.r. scenario's referentie (2017), rust (2085), stoom (2085), v.b.n.o. zwak brakke wateren, snelstromende beken, sloten en ondiepe meren. De debieten liggen tussen de 100 en 800 m^3/s .



Figuur S5d Gemiddeld zomerdebiet (m^3/s) Regionale wateren v.l.n.r. scenario's referentie, rust (2085), stoom (2085), v.b.n.o. langzaam stromende beken, kanalen, diepe meren en brakke tot zoute wateren. De debieten liggen tussen de 100 en 800 m^3/s .

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl