

stowa

OVER DE INVLOED VAN KLIMAATVERANDERING OP DE AQUATISCHE  
ECOLOGIE EN HOE JE DE NEGATIEVE EFFECTEN KUNT TEGENGAAN

# EEN FRISSE BLIK OP WARMER WATER



2011  
20



Rijkswaterstaat  
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

watermozaïek

**stowa**

OVER DE INVLOED VAN KLIMAATVERANDERING OP DE AQUATISCHE  
ECOLOGIE EN HOE JE DE NEGATIEVE EFFECTEN KUNT TEGENGAAN

# EEN FRISSE BLIK OP WARMER WATER



Rijkswaterstaat  
*Ministerie van Infrastructuur en Milieu*

**watemozaïek**

*Klimaatverandering heeft ook gevolgen  
voor de waterkwantiteit*

---

# COLOFON

---

## COLOFON

---

Amersfoort, oktober 2011

### Uitgave

Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, Postbus 2180, 3800 CD Amersfoort  
Rijkswaterstaat Waterdienst, Postbus 17, 8200 AA Lelystad

**Auteurs** Sarian Kosten (Wageningen Universiteit). Box 2 is een bijdrage van Sebastiaan Schep (Witteveen + Bos)

**Begeleidingscommissie** Bas van der Wal (STOWA), Fons Smolders (B-Ware), Gerard ter Heerdt (Waternet), Theo Claassen (Wetterskip Fryslân), Ellen Raadschelders (Waterdienst), Miguel Dionisio Pires (Deltares)

**Eindredactie** Bert-Jan van Weeren

**Fotografie** Cover: Istockphoto (water en blauwalgen) en Jan Vink (droge bodem en gasuittoot).

Grote foto's: Jelger Herder (blz. 08), Istockphoto (blz. 02 en 12), Willem Kolvoort (blz. 102 en 116), RWS/  
Waterdienst (Gerlinda Boekhoud-de Graaf) (blz. 20), Vildaphoto (blz. 26, 70 en 110) en Jan Vink (blz. 36 en 48).

**Vormgeving** Shapeshifter, Utrecht

**Druk** Libertas, Bunnik

**STOWA-rapportnummer** 2011-20

**ISBN** 978.90.5773.524.0

**Copyright** De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar. De eventuele kosten die STOWA voor publicaties in rekening brengt, zijn uitsluitend kosten voor het vormgeven, vermenigvuldigen en verzenden.

**Disclaimer** Dit rapport is gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteurs en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit dit rapport.

Dit rapport is CO<sub>2</sub> neutraal geproduceerd.



---

## TEN GELEIDE

---

De waterbeheerders - waterschappen en Rijkswaterstaat - voeren allerlei maatregelen uit om de waterkwaliteit in Nederland te verbeteren. Natuurlijke beeklopen worden hersteld en oevers worden natuurvriendelijker gemaakt. Vispassages maken het migreren van trekvisseren weer mogelijk. In het rivierengebied zorgen nevengeulen niet alleen voor extra veiligheid bij hoog water, maar bieden ze ook kansen voor natuur en ecologie. Met de aanleg van vooroevers worden ondiepere zones gecreëerd die functioneren als leef- en paaigebied voor dieren en planten. Deze inrichtingsmaatregelen zijn een aanvulling op de aanpak van de bronnen van waterverontreiniging, zoals de aanscherping van het meststoffenbeleid en het verder zuiveren van afvalwater.

Het is belangrijk te weten of de genoemde maatregelen klimaatbestendig zijn en in welke mate klimaatverandering invloed heeft op het kunnen bereiken van doelen voor waterkwaliteit, zoals die in het licht van de Europese Kaderrichtlijn Water zijn afgesproken. Vooral veranderingen in neerslag en temperatuur, maar ook hydrologische veranderingen in de afvoer van de rivieren, hebben effect op chemie en ecologie.

Dit rapport bundelt de belangrijkste kennis over mogelijke invloeden van klimaatverandering op zoete aquatische ecosystemen en geeft waterbeheerders handvaten hoe ze rekening kunnen houden met de effecten van klimaatverandering bij het uitvoeren van hun taken.

Met de kennis uit dit rapport kunnen waterbeheerders een optimaal (effectief) pakket aan maatregelen samenstellen om de waterkwaliteit te verbeteren. Daarnaast kunnen ze bij inrichting en beheer goed rekening houden met de effecten van klimaatverandering. Het rapport ondersteunt daarmee het opstellen van de tweede generatie stroomgebiedbeheersplannen, die in 2015 gereed moeten zijn.

Dit rapport is tot stand gekomen in een samenwerkingsverband van STOWA, Rijkswaterstaat Waterdienst, een aantal waterschappen en Wageningen Universiteit. Deze samenwerking staat wat ons betreft model voor de samenwerking tussen Rijkswaterstaat en de waterschappen. De sterke verwevenheid van het hoofdwater-

---

stelsel en de regionale systemen vraagt om kennisuitwisseling en kennisdeling. STOWA en Rijkswaterstaat Waterdienst hebben veel overeenkomstige kennisvragen geïdentificeerd en zullen gezamenlijk werken aan het beantwoorden van deze vragen. Dit draagt bij aan de vergroting van de doelmatigheid in het waterbeheer, één van de speerpunten in het Bestuursakkoord Water van april 2011.

**DR. ROELAND ALLEWIJN,**

Directeur Water en Gebruik,  
Rijkswaterstaat Waterdienst

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'R. Allewijn', written over a horizontal line.

**JACQUES LEENEN,**

Directeur STOWA

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Jacques Leenen', written over a horizontal line.



---

## IN HET KORT

---

### STOWA

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA) - opgericht in 1971 - is het kenniscentrum van regionale waterbeheerders in Nederland. STOWA ontwikkelt, verzamelt en implementeert kennis die nodig is om de opgaven waar zij voor staan, goed uit te voeren. Denk aan goede afvalwaterzuivering, klimaatadaptatie, het halen van chemische en ecologische waterkwaliteitsdoelstellingen en veilige regionale waterkeringen. De kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch en sociaal-wetenschappelijk gebied.

STOWA werkt veelvuldig samen met andere partijen om onderzoek op elkaar af te stemmen, of gezamenlijk uit te voeren. Onder meer met KWR Watercycle Research Institute, stichting Rioned en Rijkswaterstaat Waterdienst. STOWA zoekt ook internationaal naar samenwerking. Bijvoorbeeld binnen de Global Water Research Coalition, een wereldwijd onderzoeksplatform op waterketengebied. Verder participeert de stichting in grote kennisprogramma's als 'Kennis voor Klimaat'. De redenen voor samenwerking zijn grotere wetenschappelijke slagkracht, synergie en financiële voordelen.

Naast het ontwikkelen en bijeenbrengen van kennis, werkt STOWA actief aan het ontsluiten, verspreiden, delen en verankeren ervan. Deelnemers aan STOWA zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, provincies en Rijkswaterstaat. Gezamenlijk brengen zij het benodigde geld bijeen voor het werk van de stichting. In 2010 bedroeg het totale budget ruim 10,5 miljoen euro. Zo'n 7 miljoen daarvan bestond uit bijdragen van de STOWA-deelnemers. De resterende gelden kwamen binnen via subsidies en bijdragen van derden in projecten.



### DE MISSIE VAN STOWA

**Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften en kennisleemten op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen en verankeren van de benodigde kennis.**

---

---

## **RIJKSWATERSTAAT WATERDIENST**

Rijkswaterstaat werkt aan de vlotte en veilige doorstroming van het verkeer, aan een veilig, schoon en gebruikersgericht landelijk watersysteem en aan de bescherming tegen overstromingen. Daarvoor beheert Rijkswaterstaat het nationale rijks-wegennetwerk (3260 km), het rijksvaarwegennetwerk (1686 km kanalen, rivieren en 6165 km vaarweg in open water) en het landelijke watersysteem (65.250 km<sup>2</sup>).

De Waterdienst is één van de vijf landelijke diensten van Rijkswaterstaat. Andere diensten zijn data-ICT dienst, Dienst Infrastructuur, Dienst verkeer en Scheepvaart en de Corporate Dienst. De adviseurs en projectleiders van de Waterdienst zijn actief betrokken bij landelijke en regionale projecten en leveren kennis en expertise voor de waterprojecten van Rijkswaterstaat. De Waterdienst heeft een brugfunctie tussen beleid, beheer, uitvoering, toezicht en kennis op watergebied.

De Waterdienst werkt binnen Rijkswaterstaat door de inzet van kennis en expertise aan een betrouwbaar, schoon en veilig hoofdwatersysteem in Nederland. Dit zorgt voor efficiënt en effectief waterbeheer, voor nu en in de toekomst.



*Meervallen profiteren mogelijk  
van warmere omstandigheden*

---

# INHOUDSOPGAVE



---

	<b>TEN GELEIDE</b>	04
	<b>IN HET KORT - STOWA EN RIJKSWATERSTAAT WATERDIENST</b>	06
	<b>SAMENVATTING</b>	12
<b>1</b>	<b>INLEIDING: WAAROM DIT BOEK?</b>	20
1.1	Reikwijdte	22
1.2	Leeswijzer	24
<b>2</b>	<b>KLIMAATVERANDERING IN EEN NOTENDOP</b>	26
<b>3</b>	<b>DE INVLOED VAN KLIMAATVERANDERING OP DE FYSISCHE ASPECTEN VAN AQUATISCHE SYSTEMEN</b>	36
3.1	Temperatuur	37
3.1.1	<i>Watertemperatuur</i>	37
3.1.2	<i>Stratificatie</i>	37
3.1.3	<i>IJsbedekking</i>	42
3.2	Hydrologie	43
3.2.1	<i>Runoff</i>	44
3.2.2	<i>Waterpeil, inlaatbehoefte en debiet</i>	45
3.3	Synthese fysische aspecten	46

---

## **4 DE INVLOED VAN KLIMAATVERANDERING OP DE BIOGEOCHEMISCHE ASPECTEN VAN AQUATISCHE SYSTEMEN** **48**

4.1	Zuurstof	49
4.2	Fosfor	51
4.2.1	<i>Interne P-belasting</i>	51
4.2.2	<i>Externe P-belasting</i>	53
4.3	Stikstof	54
4.3.1	<i>Interne N-belasting</i>	55
4.3.2	<i>Externe N-belasting</i>	57
4.4	Zwavel	57
4.4.1	<i>Interne S-belasting</i>	58
4.4.2	<i>Externe S-belasting</i>	59
4.5	Koolstof	60
4.5.1	<i>Anorganisch koolstof</i>	62
4.5.2	<i>Organisch koolstof</i>	63
4.6	Chloride	63
4.6.1	<i>Inlaatwater</i>	64
4.6.2	<i>Zoute kwel</i>	65
4.6.3	<i>Indamping</i>	65
4.7	Synthese biogeochemische aspecten	66

---

## **5 DE INVLOED VAN KLIMAATVERANDERING OP DE BIOLOGISCHE ASPECTEN VAN AQUATISCHE SYSTEMEN** **70**

5.1	Fytoplankton	71
5.1.1	<i>Biomassa</i>	71
5.1.2	<i>Soortensamenstelling</i>	74
5.1.3	<i>Fenologie</i>	76
5.2	Zoöplankton	76
5.2.1	<i>Biomassa</i>	76
5.2.2	<i>Soortensamenstelling</i>	77
5.2.3	<i>Fenologie</i>	78
5.3	Fytobenthos	79
5.4	Macrofauna	81
5.4.1	<i>Dichtheden</i>	81

---

5.4.2	<i>Soortensamenstelling</i>	81
5.4.3	<i>Fenologie</i>	83
5.5	Waterplanten	84
5.5.1	<i>Bedekking</i>	84
5.5.2	<i>Soortensamenstelling</i>	87
5.5.3	<i>Fenologie</i>	89
5.6	Vis	89
5.6.1	<i>Dichtheden</i>	89
5.6.2	<i>Soortensamenstelling</i>	91
5.6.3	<i>Fenologie</i>	92
5.7	Exoten	93
5.8	Synthese biologische aspecten	96

---

**6** **SYNTHESE KLIMAATINVLOEDEN** 102

---

<b>7</b>	<b>KLIMAATVERANDERING EN MAATREGELEN TER VERBETERING VAN DE WATERKWALITEIT</b>	<b>110</b>
7.1	Het beperken van de negatieve effecten van klimaatverandering in stilstaande wateren	111
7.2	Het beperken van de negatieve effecten van klimaatverandering in stromende wateren	114

---

**REFERENTIES** 116



*Klimaatverandering versterkt de eutrofiëring van oppervlaktewateren,  
wat in kleiner water kan leiden tot een volledige kroosbedekking*

---

## SAMENVATTING

---

In Nederland, maar ook wereldwijd, wordt veel geïnvesteerd in het verbeteren van de kwaliteit van het oppervlaktewater. Het is belangrijk dat daarbij rekening wordt gehouden met de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit. Vooral veranderingen in neerslag en temperatuur kunnen aanzienlijk effect hebben op het functioneren van aquatische ecosystemen en daarmee de effectiviteit van waterkwaliteitsmaatregelen beïnvloeden.

Dit rapport bundelt de belangrijkste kennis over mogelijke invloeden van klimaatverandering op zoete aquatische ecosystemen. Het geeft inzicht in de mate waarin waterkwaliteitsmaatregelen die waterbeheerders nemen 'klimaatrobust' zijn en wat waterbeheerders meer of anders kunnen doen om rekening te houden met de gevolgen van klimaatverandering. Daarbij kan gedacht worden aan het prioriteren van voorgenomen maatregelen, of het anders inrichten of beheren.

---

**Kader**      **KLIMAATVERANDERING IN HET KORT**

Volgens de KNMI'06 scenario's zullen de winters zachter worden en de zomers warmer. De hoeveelheid neerslag neemt toe in de winter en in de lente. Of de zomer- en herfstneerslag toe dan wel af zullen nemen, is sterk afhankelijk van de toekomstige luchtstroming. Extreme situaties qua temperatuur en neerslag zullen vaker voorkomen.

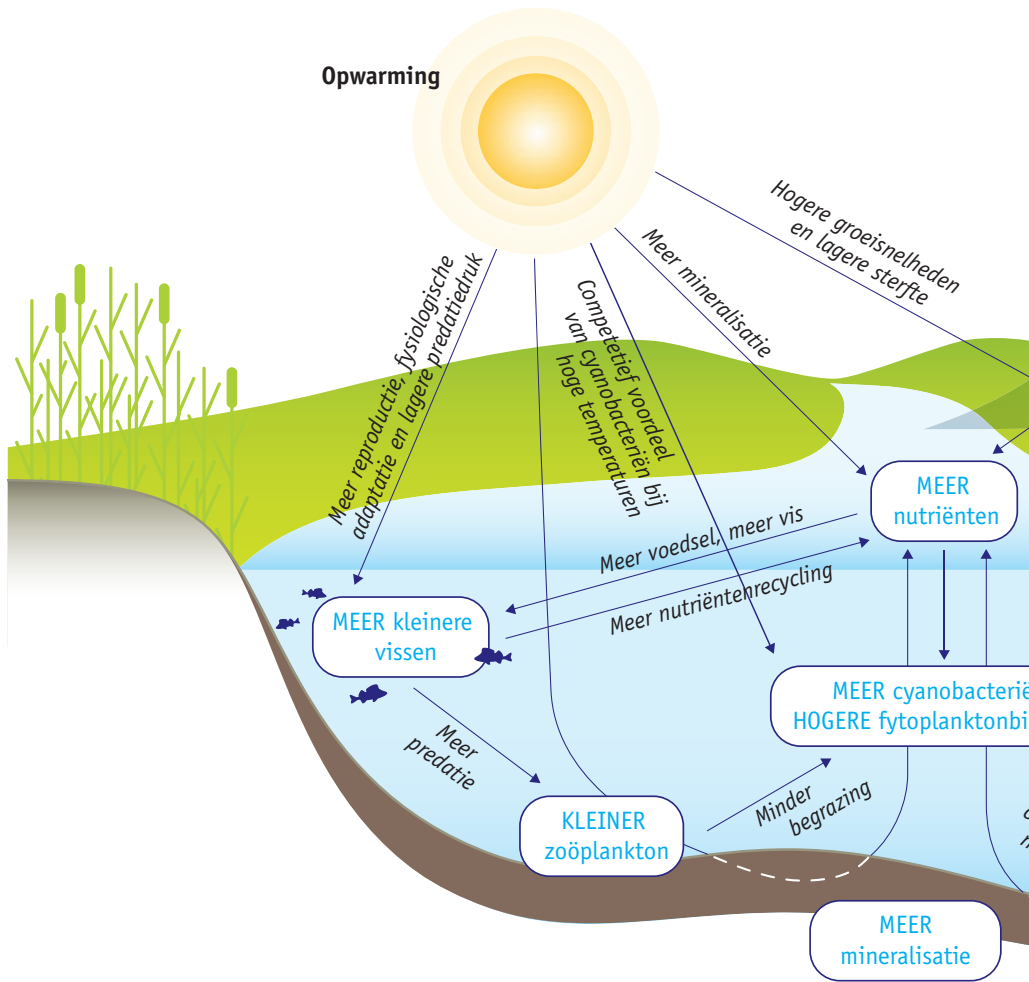
---

Klimaatverandering beïnvloedt zowel de fysische, de biogeochemische als de biologische toestand van zoete aquatische systemen. De aquatische ecologie wordt bovendien niet alleen direct beïnvloed door een toename in temperatuur en een verandering in neerslagpatroon, maar ook indirect door de mens die zich aanpast aan het veranderende klimaat. Zo kan klimaatverandering leiden tot een andere gewaskeuze of een ander moment van bemesten. Dit heeft invloed op de nutriëntenaftroming naar het oppervlaktewater. Deze indirecte gevolgen van klimaatverandering kunnen zelfs groter zijn dan de directe gevolgen (zie [tabel 1](#)).

De invloed van klimaatverandering is het duidelijkst waarneembaar en voorspelbaar voor de fysische toestand van zoete wateren: minder ijsbedekking, stijging van de watertemperatuur en een sterkere en langere temperatuurstratificatie. Ook de invloed op de biogeochemie van het water (aanwezigheid van, en interactie tussen de elementen zuurstof, fosfor, stikstof, zwavel, koolstof en chloride) is duidelijk aanwezig.

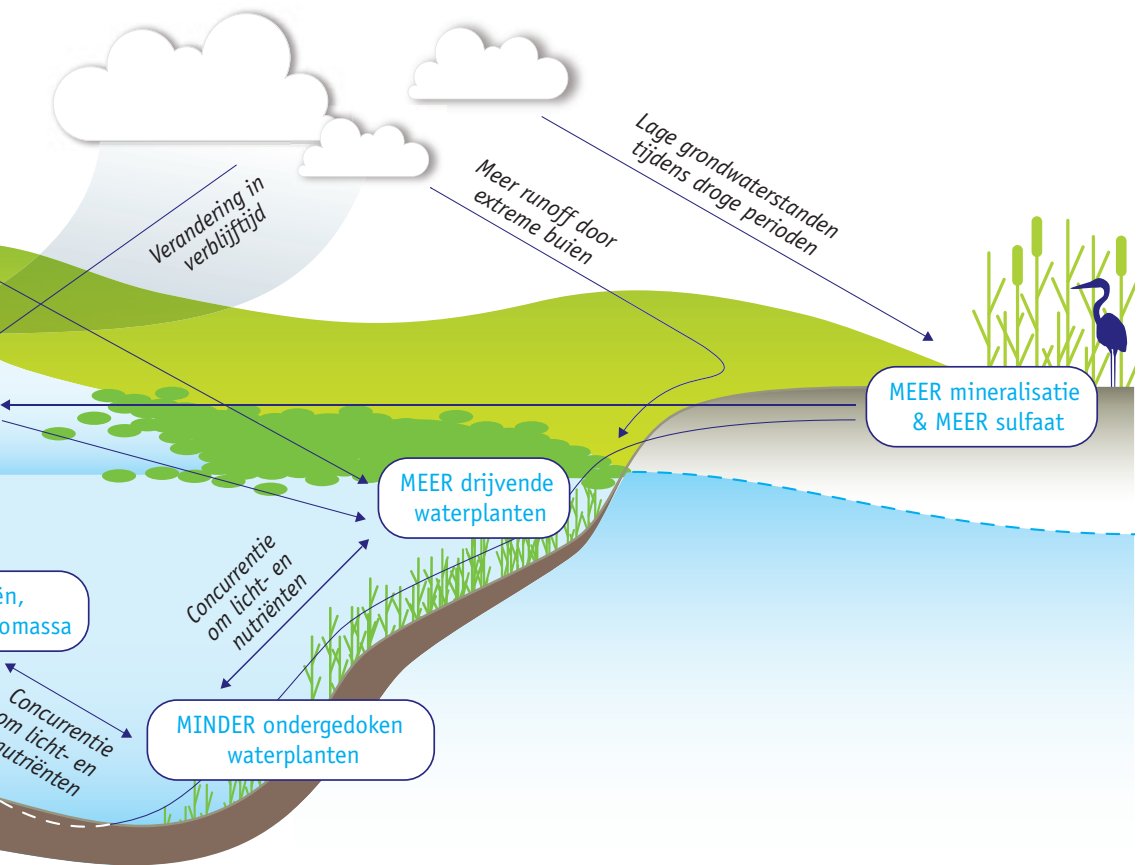
**Fig 1 BELANGRIJKSTE EFFECTEN VAN KLIMAATVERANDERING**

Conceptuele weergave van de belangrijkste effecten van klimaatverandering op eutrofiëring en eutrofiëringseffecten [naar 19].





## Verandering in neerslag



---

De biologische effecten zijn het lastigst te voorspellen door de complexe interacties binnen aquatische ecosystemen. Ondanks dat én met inachtneming van onzekerheden in de klimaatscenario's en lokale verschillen in het optreden van effecten, kan met voldoende zekerheid een centrale conclusie worden getrokken:

### **Klimaatverandering versterkt de eutrofiëring van oppervlaktewateren.**

In beken heeft klimaatverandering bovendien tot gevolg dat steeds vaker sprake zal zijn van afvoerextremen - droogval en sterke afvoerpieken - wat ongunstig is voor de ecologie van beeksystemen. Organismen sterven door uitdroging, raken geïsoleerd, of spoelen weg naar lager gelegen delen. Dit geldt in zekere mate ook voor rivieren, waar veranderingen in de afvoer effect zullen hebben op de waterkwaliteit en ecologie in nevengeulen en ondiepe vooroevers.

Deze conclusies zijn gebaseerd op een groot aantal recente studies waarbij vergelijkingen zijn gemaakt tussen rivieren en meren in verschillende klimaatzones, tussen meetgegevens in rivieren en meren in verschillende jaren en tussen beken met natuurlijke temperatuurverschillen. Ook zijn er gecontroleerde experimenten uitgevoerd in veldsituaties, in mesocosms (kleinschalige nabootsing van de veldsituatie in proefopstellingen) en in laboratoria. Daarnaast zijn de effecten van klimaatverandering gesimuleerd met computermodellen.

De symptomen van eutrofiëring variëren. Er kan sprake zijn van een toename van algen, van - soms toxische - drijfvlagen van cyanobacteriën ('blauwalgen') of drijvende planten, maar ook van verlies van ondergedoken waterplanten, zuurstofloosheid en veranderingen in de visgemeenschap. In [figuur 1](#) worden de verschillende processen samengevat die ten grondslag liggen aan de door klimaatverandering veroorzaakte extra nutriëntenbelasting en de door klimaatverandering versterkte effecten van eutrofiëring.

Het tegengaan van de negatieve effecten van klimaatverandering op de aquatische ecologie zal voor een aanzienlijk deel moeten bestaan uit het verder terugdringen van de nutriëntenbelasting. In stromende wateren zijn bovendien extra maatregelen nodig die een sterk verminderde afvoer tegengaan. Specifiek voor beken zijn maatregelen nodig die afvoerpieken en droogval bestrijden.

**Tabel 1 BELANGRIJKSTE EFFECTEN VAN KLIMAATVERANDERING**

*Belangrijkste effecten van klimaatverandering - met name veranderingen in temperatuur en neerslag - op de aquatische ecologie.*

	DIRECTE EFFECTEN VAN KLIMAATVERANDERING	EFFECTEN VAN DE MENSELIJKE AANPASSING AAN KLIMAATVERANDERING
<b>Fysisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hogere watertemperatuur en minder ijsbedekking</li> <li>• Langere stratificatieperiode (eerdere start en latere men-ging) in diepe systemen</li> <li>• Ondiepere spronglaag in diepe systemen</li> <li>• Tijdelijke stratificatie in ondiepe systemen</li> <li>• Toename runoff</li> <li>• Toename piekafvoeren en erosie in stromende wateren</li> <li>• Afname afvoer/droogval van stromende wateren</li> <li>• Peilverlaging/droogval of grotere behoefte aan inlaatwater.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Het vasthouden en bergen van water om perioden van droogte door te komen leidt tot een verandering van de watertempe-ratuur (inclusief eventuele stra-tificatie van de waterkolom)</li> <li>• Peilhandhaving leidt tot zoetwa-tertekorten</li> <li>• Veranderingen in gewaskeuze en landbewerking veranderen de hoeveelheid en kwaliteit van het afstromende en ont-vangende oppervlaktewater.</li> </ul>
<b>Biogeo-chemisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hogere temperaturen - eventueel in combinatie met een lagere afvoer - leiden tot grotere dag-nachtfluctuaties in zuurstofcon-centraties</li> <li>• Kans op perioden met een zeer lage zuurstofconcentratie neemt toe</li> <li>• Hogere interne fosfor- en stik-stofbelastingen als gevolg van door opwarming verhoogde na-levering vanuit het sediment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intensiever hergebruik van water verhoogt de concentratie van moeilijk afbreekbare toxische stoffen</li> <li>• Verandering in (timing van) mestgebruik beïnvloedt de nutriëntenvracht naar het op-pervlaktewater</li> </ul>

- 
- Hogere externe fosfor- en stikstofbelasting door veranderingen in het neerslagregime en de hiermee samenhangende hoeveelheden runoff, inlaat en uitlaat
  - Versnelde denitrificatie als gevolg van hogere temperaturen
  - Verhoogde zwavelbelasting door hoge grondwaterstanden in zwavelhoudende bodems in natte winters en door een toename in brakke of zoute kwel
  - Toename CO<sub>2</sub>-concentraties in het water
  - Mogelijk toename broeikasgasemissie vanuit het water
  - Stijging chlorideconcentratie door verdamping, brakke kwel en de inlaat van chloriderijk water tijdens droogte

---

### **Biologisch**

- Door toename nutriëntenbelasting hogere fytoplanktonbiomassa's
- Langer groeiseizoen van fytoplankton, hierdoor in voor- en najaar hogere fytoplanktonbiomassa's
- Bij gelijkblijvende nutriëntenbelasting geen eenduidige toename in maximale zomerbiomassa van fytoplankton
- Aandeel aan cyanobacteriën in totale fytoplankton-biovolume neemt toe
- Een langer groeiseizoen kan leiden tot veranderingen in gewascycli en gebruik van pesticiden en mest, wat negatieve gevolgen heeft voor de waterkwaliteit
- Een langer groeiseizoen vergt een grotere inspanning bij het schonen van met waterplanten begroeide watergangen
- Het verwijderen van obstakels om de waterafvoer te vergroten en het in verbinding brengen van verschillende wateren om de wateraan- of afvoer te kun-

- 
- Afmeting en biomassa van zoöplankton nemen af waardoor de graasdruk op fytoplankton afneemt
  - Uitspoeling macrofauna door piekafvoeren
  - Soortensamenstelling van waterplanten verandert door zachtere winters (met minder ijs)
  - In kleine wateren vergrote kans op dominantie door drijvende planten
  - Bij opwarming kleinere kans op hoge bedekkingen met ondergedoken waterplanten
  - De karakteristieke waterplanten uit zachte wateren worden bedreigd door een stijging in CO<sub>2</sub>
  - Door opwarming verandert visgemeenschap: minder koud stenotherme soorten en mogelijk meer benthische soorten
  - Langere paaitijd van vissen, waardoor er gedurende een langere periode kleine zoöplanktivore vis aanwezig is
  - Klimaatverandering is vaak niet de belangrijkste factor bij de verspreiding en immigratie van nieuwe soorten. Wel kan klimaatverandering voor sommige soorten de vestiging faciliteren en kan het de abundantie van exoten sterk beïnvloeden, waarbij zachtere winters tot hogere abundanties leiden.
- nen regelen, vergroot het risico op de verspreiding van exoten.

*Hogere temperaturen kunnen leiden  
tot meer cyanobacteriën*

---

# H1 INLEIDING:WAAROM DIT BOEK?

---

*Monitoringgegevens en klimaatscenario's leveren duidelijke bewijzen voor het feit dat zoetwatersystemen kwetsbaar zijn en potentieel sterk beïnvloed worden door klimaatverandering, wat verstrekende gevolgen zal hebben voor de samenleving en voor ecosystemen.*

Uit: IPCC, Climate Change and Water [26].

Het klimaat is van invloed op het functioneren van aquatische systemen. Klimaatverandering leidt tot veranderingen in deze systemen. Naast de effecten van klimaatverandering op de waterkwantiteit, krijgen ook de effecten op de waterkwaliteit steeds meer aandacht. Zo is in het klimaatakkoord tussen de Unie van Waterschappen en het Rijk opgenomen dat er zal worden gestreefd naar watersystemen die de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit kunnen opvangen ([box 1](#)).

Ook op Europees niveau is er aandacht voor dit onderwerp. In december 2009 verscheen een handreiking over klimaatverandering in relatie tot de Kaderrichtlijn Water, de Hoogwaterrichtlijn en de Mededeling 'Waterschaarste en droogte' [28]. Hierin wordt gesteld dat klimaatverandering in de tweede generatie stroomgebiedsbeheerplannen (2015) volledig geïntegreerd moet zijn. Dit betekent dat lidstaten moeten aangeven hoe klimaatverandering is meegenomen bij de druk- en impactanalyse, in het monitoringprogramma en bij de keuze van maatregelen.

De waterbeheerders zijn al op verschillende manieren bezig klimaatadaptatiemaatregelen te nemen [29]. Ook hebben diverse waterschappen op basis van hun monitoringgegevens al onderzoek gedaan naar mogelijk klimaatgerelateerde veranderingen in hun watersystemen [30-33]. Recent zijn verschillende kennisoverzichten verschenen over uiteenlopende facetten van klimaatverandering en waterkwaliteit [34-39]. Tevens worden de laatste jaren veel resultaten gepubliceerd van onderzoeken naar de impact van het klimaat op aquatische systemen.

De kennis over de invloed van het klimaat op waterkwaliteit en aquatische ecologie is binnen Nederland sterk verspreid aanwezig. Dit rapport bundelt de belangrijkste kennis over mogelijke invloeden van klimaatverandering op zoete aquatische ecosystemen en geeft informatie over extra maatregelen die nodig zullen zijn om de ecologische kwaliteit te behouden of te verbeteren. Het geeft tevens inzicht in de 'klimaatrobuustheid' van maatregelen die waterbeheerders nu al nemen.



**5.1**    **Klimaatbestendige watersystemen en waterkeringen**

**5.**    **Thema Snijvlak adaptatie en mitigatie**

Een van de kerntaken van de waterschappen is het tijdig aanpassen van de watersystemen en waterkeringen aan de steeds veranderende omstandigheden (adaptatie). In de Nationale Adaptatiestrategie 'Maak Ruimte voor Klimaat' is beschreven hoe we als overheden Nederland klimaatbestendig willen maken. In het Nationaal Bestuursakkoord Water Actueel zijn afspraken gemaakt hoe we in het waterbeheer rekening houden met en anticiperen op klimaatverandering. In aanvulling op de afspraken over klimaatadaptatie in het Nationaal Waterplan en het NBW Actueel spreken de waterschappen af:

- 1**    Hun kennis en inzichten rond klimaatverandering samen te brengen in een klimaatvisie om op en begrijpelijke manier de gevolgen van klimaatverandering voor het waterbeheer binnen hun beheersgebied te beschrijven. Daarbij wordt aangegeven wat de verwachte klimaatveranderingen zijn, wat de consequenties voor het waterbeheer zullen zijn en hoe er op de verwachte veranderingen kan worden geanticipeerd;
  
- 2**    Voor 2027 te streven naar robuuste watersystemen die ook de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit (hogere watertemperatuur, droogte en watertekort, toenemende verzilting, overstortingen vanuit rioleringsysteem, versnelde decompositie, invloed exoten) kunnen opvangen;

---

Het is een praktijkgericht document, bestemd voor gebruik door waterbeheerders en andere belangstellenden. Bij het opstellen is gebruik gemaakt van Nederlandse en buitenlandse literatuur voor zover deze relevant was voor Nederlandse oppervlaktewateren. De focus ligt op alle zoete systemen, variërend van beken en rivieren tot meren en vennen.

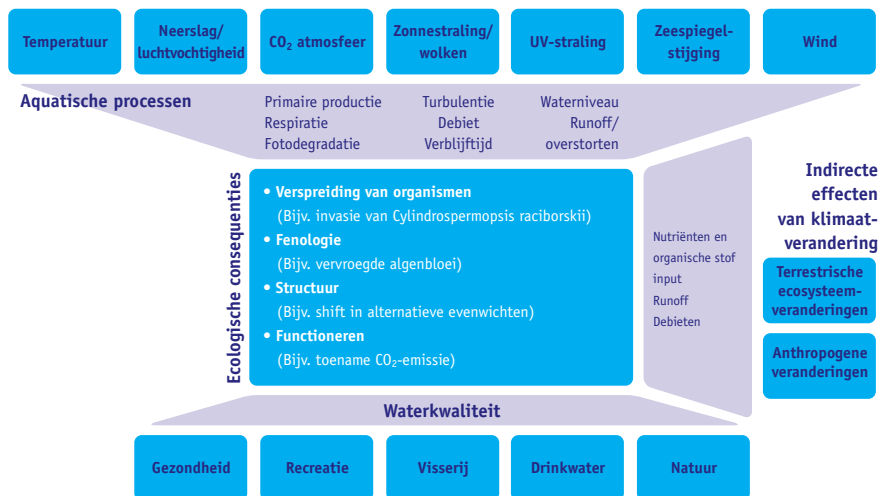
**1.1**    **REIKWIJDTE**

Veranderingen in temperatuur, neerslag, atmosferische CO<sub>2</sub>-concentratie en lichtklimaat, maar ook veranderende windsnelheden en zeespiegelstijging, zijn allemaal facetten van klimaatverandering die van invloed kunnen zijn op het

functioneren van aquatische ecosystemen (figuur 1.1). Doordat al deze facetten een scala aan processen beïnvloeden en doordat de veranderingen zich voordoen in een zeer dynamisch en grillig patroon, is het vaak lastig causale verbanden te vinden tussen klimaatverandering en waargenomen veranderingen in waterkwaliteit. Dit wordt nog eens extra bemoeilijkt doordat tegelijkertijd veel niet-klimaatgerelateerde veranderingen plaatsvinden, zoals de invoering van nieuw mestbeleid, het saneren van overstorten vanuit het riool en de aanleg van overstroomgebieden.

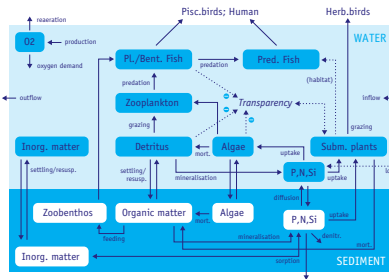
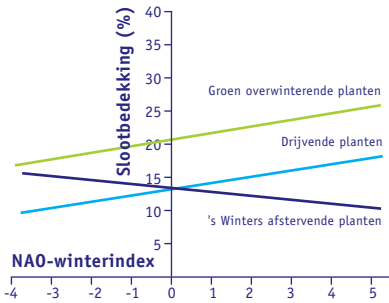
Desalniettemin is het duidelijk dat de fysische aspecten van aquatische systemen veranderen door klimaatveranderingen [40]. Het effect van klimaatverandering op de aquatische ecologie en de waterkwaliteit is lastiger aan te tonen. Toch zijn er op basis van verschillende typen onderzoek wel degelijk relaties te leggen. Onderzoek naar de effecten van klimaatverandering op aquatische ecosystemen wordt gedaan met behulp van verschillende, complementaire onderzoeksmethoden zoals analyses van lange-termijnmonitoringdata, vergelijkingen tussen aquatische systemen in verschillende klimaatzones, temperatuurgereguleerde experimenten *in situ* en in mesocosms, laboratoriumexperimenten en modelleren (figuur 1.2).

**Fig 1.1 DE INVLOED VAN KLIMAATVERANDERING OP AQUATISCHE SYSTEMEN [NAAR 41]**



**Fig 1.2 ONDERZOEKSMETHODEN INVLOED KLIMAATVERANDERING**

Verschillende methoden om de invloed van klimaatverandering op de waterkwaliteit te onderzoeken: trendanalyses [naar 42], verwarmde mesocosms, modellen [naar 43], laboratorium-experimenten.



**1.2 LEESWIJZER**

Omdat klimaatverandering veel processen beïnvloedt die in vrijwel alle wateren plaatsvinden, is er in dit document voor een indeling in fysische, biogeochemische en biologische aspecten gekozen en niet voor een indeling in type watersystemen. Veel processen die in meren plaatsvinden, bijvoorbeeld verminderde zuurstofoplosbaarheid door hogere temperaturen, spelen ook in andere watertypen. Waar nodig worden gevolgen van klimaatverandering die specifiek zijn voor bepaalde watertypen, zoals het vaker droogvallen van beken door veranderingen in neerslag, apart genoemd.

Indien mogelijk wordt aangegeven in welke richting het aquatisch ecosysteem onder invloed van klimaatverandering naar alle waarschijnlijkheid zal veranderen.

---

De kwantitatieve effecten zijn echter sterk systeemafhankelijk. Ze kunnen met modellen zoals PCDitch of PCLake [43, 45] wel worden ingeschat, maar zijn, met name wat betreft de ecologie, nog met veel onzekerheden omgeven.

Voor de beschrijving van verschillende typen watersystemen en limnologische processen wordt verwezen naar de STOWA-rapporten 'Beken stromen' [46], 'Van helder naar troebel... en weer terug' [47] en 'Een heldere kijk op diepe plassen' [48].

In de hoofdstukken wordt ingegaan op de invloed van klimaatverandering op achtereenvolgens de fysische, biogeochemische en biologische toestand van zoete aquatische systemen. De focus ligt hierbij zowel op de directe gevolgen van klimaatverandering - met name opwarming en de gevolgen van veranderingen in neerslagpatroon - als op de gevolgen van klimaatverandering die worden veroorzaakt omdat de mens zich aanpast aan het veranderende klimaat [28, 44]. Zo wordt het waterkwantiteitsbeheer, zoals de zoetwaterverdeling, sterk gestuurd door de hoeveelheid neerslag wat directe gevolgen heeft voor de waterkwaliteit. Ook kan klimaatverandering de gewaskeuze of het moment van bemesten beïnvloeden, wat vervolgens invloed heeft op de nutriëntenafstroming naar het oppervlaktewater (zie ook [figuur 1.1](#)). De gevolgen van klimaatadaptatie kunnen daarmee mogelijk grotere gevolgen hebben voor de waterkwaliteit dan de directe gevolgen van opwarming of verandering in neerslag [28].



*De kans op extreme weersomstandigheden,  
zoals langdurige droogte, zal toenemen*

## H2 KLIMAATVERANDERING IN EEN NOTENDOP

---

Wereldwijd verandert het klimaat<sup>1</sup> en dat is ook in Nederland waarneembaar. Antropogene invloeden - zoals de uitstoot van CO<sub>2</sub> - hebben een belangrijke invloed op het klimaat, maar ook niet-antropogene invloeden spelen een belangrijke rol ([box 2](#)). Hoe het klimaat in Nederland verder zal veranderen, is vooral afhankelijk van de wereldwijde temperatuurstijging en van de hiermee samenhangende veranderingen in de luchtstromingspatronen in West Europa [49]. De mate waarin de wereldtemperatuur en de luchtstromingspatronen zullen wijzigen, is nog onzeker. Bij de ontwikkeling van de meest recente klimaatscenario's voor Nederland, de KNMI'06 scenario's, is rekening gehouden met deze onzekerheid [49] ([figuur 2.1](#) en [tabel 2.1](#)).

Volgens de KNMI'06 scenario's [49] en de in 2009 gepubliceerde aanvullingen hierop [50] zullen, kort samengevat, de volgende veranderingen in het Nederlandse klimaat optreden:

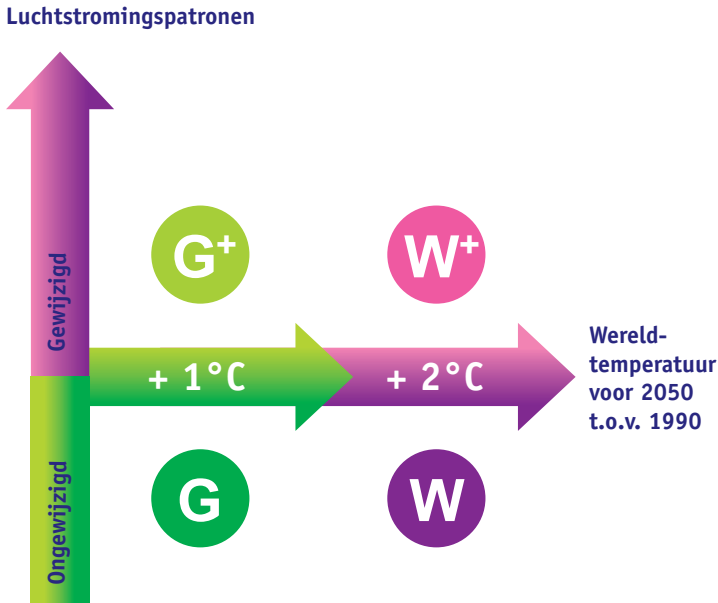
- De opwarming zet door. Hierdoor komen zachte winters en warme zomers vaker voor;
- De winters worden gemiddeld natter en ook de extreme neerslaghoeveelheden nemen toe;
- De hevigheid van extreme regenbuien in de zomer neemt toe, maar het aantal zomerse regendagen wordt juist minder;
- Perioden met langdurige droogte nemen toe;
- De veranderingen in het windklimaat zijn klein ten opzichte van de natuurlijke grilligheid, er zijn geen aanwijzingen voor meer of sterkere winden;
- De zeespiegel blijft stijgen;
- De huidige regionale variatie binnen Nederland wordt versterkt, dit geldt met name voor de neerslaghoeveelheid en de neerslagintensiteit, wat bijvoorbeeld voor de kuststrook inhoudt dat een combinatie van droogte en (korte) perioden met extreme neerslag erg waarschijnlijk is.

Het KNMI werkt momenteel aan nieuwe klimaatscenario's die de KNMI'06 scenario's opvolgen. Deze worden verwacht in 2013.

---

<sup>1</sup> Het klimaat van een bepaald gebied is het gemiddelde weer, dus het gemiddelde over langere tijd van meteorologische grootheden zoals temperatuur, neerslag, vochtigheid, zonneshijn en wind. Ook de extremen van dergelijke verschijnselen vallen onder het klimaat (KNMI).

Fig 2.1 SCHEMATISCH OVERZICHT VAN DE VIER KNMI'06 KLIMAATSCENARIO'S



CODE	NAAM	TOELICHTING
<b>G</b>	Gematigd	1°C temperatuurstijging op aarde in 2050 t.o.v. 1990 geen verandering in luchtstromingspatronen West Europa
<b>G+</b>	Gematigd+	1°C temperatuurstijging op aarde in 2050 t.o.v. 1990 + winters zachter en natter door meer westenwind + zomers warmer en droger door meer oostenwind
<b>W</b>	Warm	2°C temperatuurstijging op aarde in 2050 t.o.v. 1990 geen verandering in luchtstromingspatronen West Europa
<b>W+</b>	Warm+	2°C temperatuurstijging op aarde in 2050 t.o.v. 1990 + winters zachter en natter door meer westenwind + zomers warmer en droger door meer oostenwind



























Tabel

SCENARIOTABELLEN VOOR DE KNMI'06 SCENARIO'S

2.1

Weergegeven is de klimaatverandering in Nederland rond 2050 ten opzichte van het basisjaar 1990 [50].

					
Wereldwijde temperatuurstijging		+1°C	+1°C	+2°C	+2°C
Verandering in luchtstromingspatronen		nee	ja	nee	ja
					
WINTER	gemiddelde temperatuur	+0,9°C	+1,1°C	+1,8°C	+2,3°C
	koudste winterdag per jaar	+1,0°C	+1,5°C	+2,1°C	+2,9°C
	warmste winterdag per jaar	+0,8°C	+0,9°C	+1,6°C	+1,7°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+4%	+7%	+7%	+14%
	aantal natte dagen (≥ 0,1mm)	0%	+1%	0%	+2%
	10-daagse neerslaghoeveelheid die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+4%	+6%	+8%	+12%
	hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	0%	+2%	-1%	+4%
					
LENTE	gemiddelde temperatuur	+0,9°C	+1,2°C	+1,8°C	+2,6°C
	koudste lentedag per jaar	+1,0°C	+1,4°C	+2,0°C	+2,8°C
	warmste lentedag per jaar	+1,0°C	+1,5°C	+2,0°C	+2,9°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+3%	+1%	+6%	+3%
	aantal natte dagen (≥ 0,1mm)	-1%	-3%	-2%	-5%
	dagelijkse neerslaghoeveelheid die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+9%	+5%	+18%	+11%
	10-daagse neerslaghoeveelheid die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+6%	+3%	+12%	+7%
					
ZOMER	gemiddelde temperatuur	+0,9°C	+1,4°C	+1,7°C	+2,8°C
	koudste zomerdag per jaar	+0,9°C	+1,1°C	+1,7°C	+2,3°C
	warmste zomerdag per jaar	+1,0°C	+1,9°C	+2,1°C	+3,8°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+3%	-10%	+6%	-19%
	aantal natte dagen (≥ 0,1mm)	-2%	-10%	-3%	-19%
	dagelijkse neerslaghoeveelheid die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+13%	+5%	+27%	+10%
	referentie verdamping	+3%	+8%	+7%	+15%
					
HERFST	gemiddelde temperatuur	+0,9°C	+1,3°C	+1,8°C	+2,7°C
	koudste herfstdag per jaar	+1,0°C	+1,3°C	+2,0°C	+2,6°C
	warmste herfstdag per jaar	+1,0°C	+1,8°C	+2,0°C	+3,6°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+3%	-3%	+6%	-6%
	aantal natte dagen (≥ 0,1mm)	-1%	-5%	-1%	-11%
	dagelijkse neerslaghoeveelheid die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+9%	+6%	+18%	+12%
	10-daagse neerslaghoeveelheid die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+6%	+3%	+12%	+5%
					
ZEESPIEGEL	absolute stijging	15-25 cm	15-25 cm	20-35 cm	20-35 cm

---

**Box 2** **INTERNE EN EXTERNE INVLOEDEN OP HET KLIMAAT**

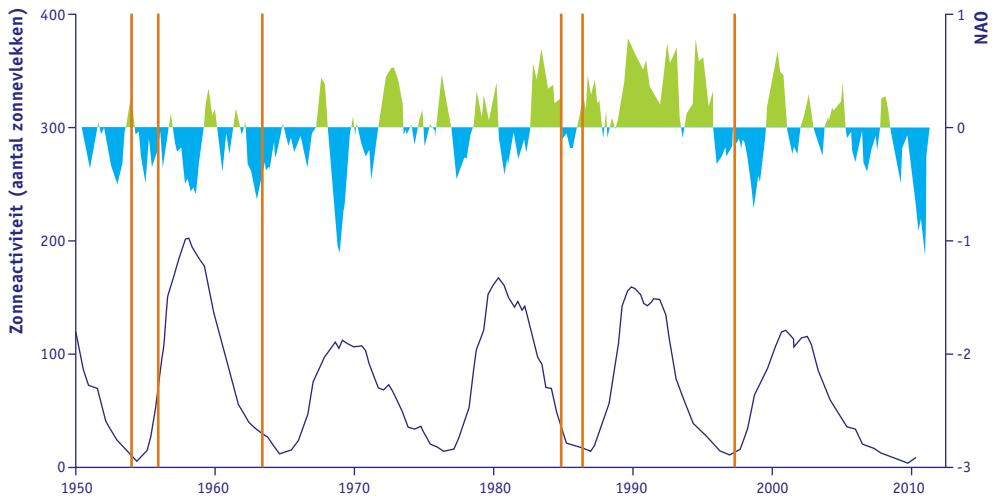
Het klimaat is het resultaat van complexe, veelal cyclische en onafhankelijke processen. Als we uitgaan van het systeem aarde kunnen we onderscheid maken tussen externe processen (de zon die het klimaat van buiten beïnvloedt) en interne processen (processen die onderdeel uitmaken van het systeem aarde en deels beïnvloed worden door humane activiteiten).

Het klimaat op aarde wordt hoofdzakelijk bepaald door de zon. Onderstaande externe onafhankelijke processen zijn hierbij van belang. Tussen haakjes is de herhalingsperiode aangegeven om een indruk te krijgen van de tijdschaal waarop de processen plaatsvinden:

- Baan van de aarde rond de zon (~ 100.000 en 400.000 jaar): ijstijden en interglacialen worden bepaald door de excentriciteit van de baan van de aarde rond de zon (de mate waarin de baan afwijkt van een cirkel). De excentriciteit varieert van 1 tot 6°.
- Stand van de aardas (~ 41.000 jaar): de stand van de aardas ten opzichte van de zon (obliquiteit of tilt) bepaalt hoe groot het temperatuurverschil is tussen zomers en winters. De hoek varieert tussen 22 en 24,5°.
- Tolbeweging (~ 23.000 jaar): de lengte van zomers en winters is afhankelijk van de tolbeweging (of precessie) van de aardas. De as wijst nu naar de ster Polaris (Poolster) en rond 7530 naar de ster Adlramin. De kortste en langste dagen vallen niet exact op 21 juni en 21 december, maar een paar dagen eerder of later. Deze zomer duurt op het noordelijk halfrond nu zeven dagen langer dan de winter.
- Zonnecyclus (~ 11 jaar): variaties in zonneactiviteit zorgen voor wisselende temperaturen. De 11-jarige cyclus is het meest bekend, maar er zijn ook andere cycli met frequenties van gemiddeld 87 jaar en 210 jaar. De Kleine IJstijd (bekend van schilderijen van bijvoorbeeld Hendrick Avercamp) van de vijftiende tot de negentiende eeuw was waarschijnlijk het gevolg van een lange periode met een lage zonneactiviteit (Sporer Minimum en Maunder's Minimum). In de warme Middeleeuwen was de zonneactiviteit juist hoog. Ook de twintigste eeuw (en met name de periode 1950-2000) kenmerkt zich door een hoge zonneactiviteit. Opvallend is dat na 1950 vrijwel alle Elfstedentochten samenvallen met een lage zonneactiviteit (zie [figuur](#) hiernaast).

**Fig MAANDGEMIDDELTE ZONNEACTIVITEIT EN NAO VANAF 1950**

Maandgemiddelde zonneactiviteit (linker as, blauwe lijn) en NAO (rechter as, groen NAO+, lichtblauw NAO-) vanaf 1950. Opvallend is de relatie tussen Elfstedentochten (de oranje lijnen) en zonneactiviteit en de recent lage zonneactiviteit en negatieve NAO. Zie voor toelichting NAO pag. 32.



Van de bovengenoemde externe processen is, gezien de tijdschaal, alleen de zonnecyclus relevant. Verder zijn onder andere de volgende interne onafhankelijke processen van belang:

- Vulkanen: grote uitbarstingen in de tropen kunnen voor een tijdelijke temperatuurverlaging zorgen doordat het vulkanische stof hoog in de atmosfeer zonlicht reflecteert. In West-Europa zijn winters als gevolg van de uitbarstingen vaak juist natter en zachter. De uitbarsting in 2010 van de vulkaan op IJsland heeft geen effect gehad, omdat het vulkaanstof betrekkelijk laag in de atmosfeer bleef [51].
- Broeikasgassen: het opstoken van de voorraad fossiele brandstoffen die in de afgelopen miljoenen jaren is opgebouwd, zorgt voor een toename van broeikasgassen in de atmosfeer. Sinds de jaren vijftig is de CO<sub>2</sub>-uitstoot als gevolg hiervan vervijfvoudigd. De wereldwijde toename van temperatuur die toegeschreven kan worden aan de uitstoot

---

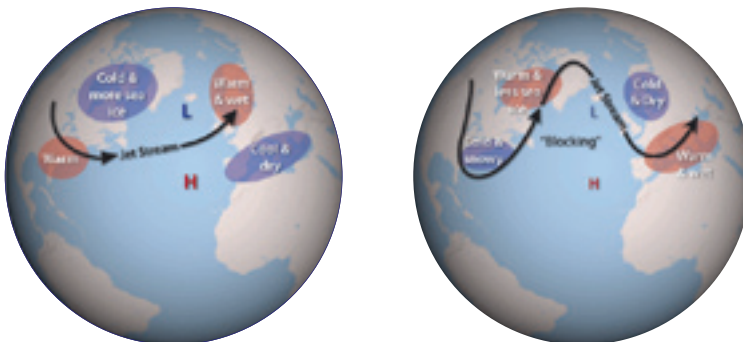
van broeikasgassen, is op dit moment 0,5°C tot 1°C. Verwacht wordt dat de bijdrage in 2100 oploopt naar 1 tot 6°C. Als we alle fossiele brandstoffen 'benutten' zal de temperatuur op aarde met 9°C toenemen (met een optimum rond het jaar 3000).

- Het verloop van de opwarming hangt af van allerlei zogenoemde feed back mechanismen, zoals veranderende oceaanstromen, wolkenvorming en smeltende ijsmassa's. Deze vallen buiten de scope van dit document. Een uitzondering vormt de overheersende windrichting. Deze bepaalt naast de zonneactiviteit in sterke mate het weer in Nederland.
- De overheersende windrichting in West-Europa wordt grotendeels bepaald door het verschil in atmosferische druk rond IJsland en de Azoren (zie [figuur](#) hieronder). Dit drukverschil wordt aangeduid met de term 'North Atlantic Oscillation Index' (NAO). De NAO is positief als de atmosferische druk rond de Azoren veel hoger is dan rond IJsland. Als het verschil gering is, is de NAO negatief. Een negatieve NAO gaat in Nederland gepaard met aanvoer van koude lucht. Koude luchtstromen uit het oosten dringen dan verder door.
- Recent onderzoek laat zien dat de overheersende windrichting in Europa beïnvloed wordt door de zonneactiviteit [52]. Bij een lage zonneactiviteit is de kans op een negatieve NAO groter. De NAO varieert sterk. Zo was de NAO in het begin van de winter van 2010/2011 sterk negatief (wat gepaard ging met zeer lage temperaturen voor de tijd van het jaar), maar in februari weer positief (zie [figuur](#) hiernaast).

---

**Fig**      **RELATIE TUSSEN NAO EN KLIMAAT IN WEST-EUROPA**

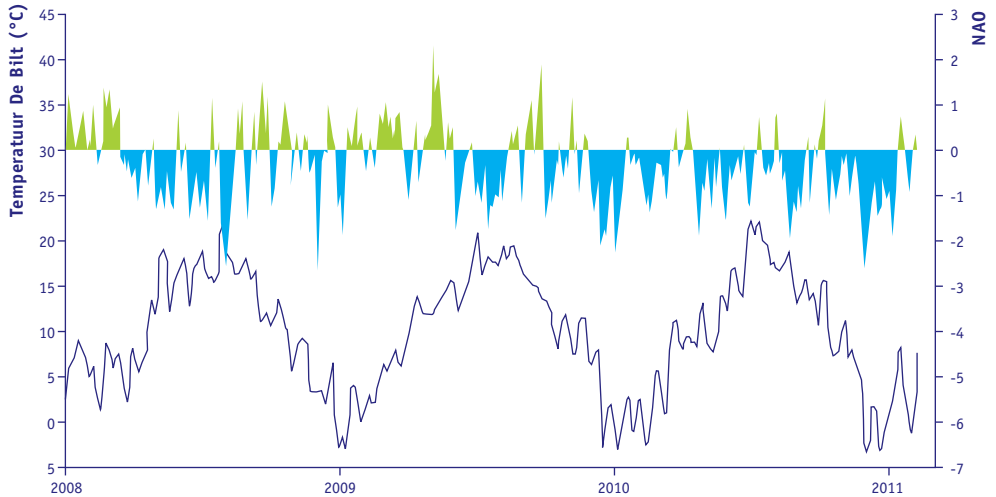
*Links positieve NAO, rechts negatieve NAO.*



Fig

### RECENT VERLOOP VAN DE TEMPERAATUUR TEN OPZICHT VAN DE NAO

Recent verloop van de temperatuur (linker as, blauwe lijn, 7 dagen zwevend gemiddelde) ten opzichte van de NAO op dagbasis (rechter as, groen NAO+, lichtblauw NAO-). Let op het verband tussen lage temperaturen in de winters (jaarwisseling 2008/2009, december 2009, januari 2010 en december 2010) en negatieve NAO.

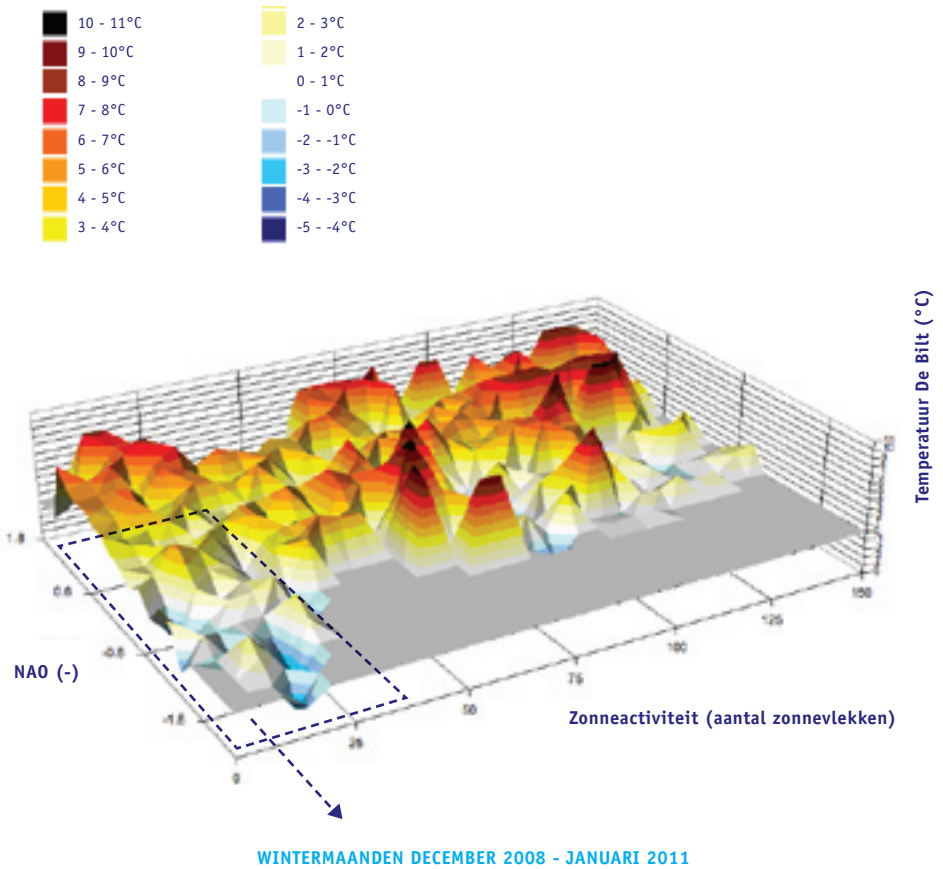


Ook wereldwijd is de temperatuur (zowel de luchttemperatuur als oceaantemperatuur) de afgelopen tien jaar niet toegenomen (zie [figuur](#) op pag. 35). De opwarming van de aarde als gevolg van de uitstoot van broeikasgassen is in deze periode gecompenseerd door de lage zonneactiviteit [51]. De koude winters van de afgelopen jaren zijn te verklaren door de lage zonneactiviteit en daarmee samenhangend de overwegend negatieve NAO (zie [figuur](#) op pag. 34).

Van groot belang is dat zonnefysici op basis van zwakkere magnetische velden van zonnevlekken een nieuwe langdurige periode met een zeer lage zonneactiviteit voorspellen [53]. Deze periode zou ingaan na de nieuwe 11-jarige cyclus die in 2010 is ingezet. Het gevolg zou kunnen zijn dat de mondiale opwarming als gevolg van de uitstoot van broeikasgassen net als de afgelopen 10 jaar tijdelijk teniet wordt gedaan. Voor de liefhebbers van Elfstedentochten is dit goed nieuws. Aan het eind van deze periode zal de temperatuur weer sterk toenemen, tenzij de uitstoot van broeikasgassen in de tussentijd flink gereduceerd is.

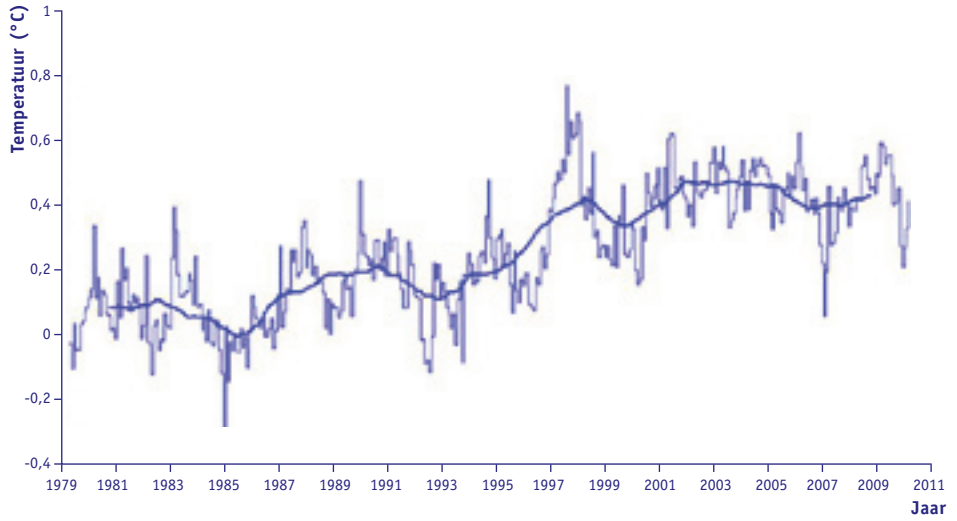
**Fig**      **RELATIE TUSSEN ZONNEACTIVITEIT, NAO EN TEMPERatuur**

Relatie tussen zonneactiviteit (x-as), NAO (z-as) en temperatuur (y-as) in januari, februari en maart voor de periode december 1999 - januari 2011 (alles 7 dagen zwevend gemiddelde). De laatste jaren onderscheiden zich door een lage zonneactiviteit, een lage NAO en een lage temperatuur.



**Fig VERANDERING MONDIALE TEMPERATUUR**

Bron: [www.climate4you.com](http://www.climate4you.com).





*De ijsbedekking zal als gevolg  
van klimaatverandering afnemen*

---

# H3 DE INVLOED VAN KLIMAAT- VERANDERING OP DE FYSISCHE ASPECTEN VAN AQUATISCHE SYSTEMEN

---

De meest duidelijk waarneembare gevolgen van klimaatverandering voor aquatische systemen zijn veranderingen in watertemperatuur, ijsbedekking, waterpeilen en debieten. Naast deze fysieke veranderingen in het watersysteem, is ook de mogelijke toename van *runoff* een belangrijk gevolg van klimaatverandering.

### 3.1 TEMPERATUUR

Onder invloed van klimaatverandering zal de watertemperatuur toenemen en de ijsbedekking afnemen. Tevens neemt de periode waarin een diep meer gestratificeerd is, toe (eerdere start temperatuurstratificatie en latere menging). Verder wordt het epilimnion (de warme bovenlaag) in diepe meren dunner en zullen ook ondiepe stilstaande wateren tijdelijk stratificeren. Hieronder lichten we deze effecten kort toe.

#### 3.1.1 Watertemperatuur

Wereldwijd wordt er parallel aan de stijging van de luchttemperatuur, een stijging van de jaargemiddelde oppervlaktewatertemperatuur waargenomen. Zowel kleine als grote wateren warmen op. Zelfs het diepste en meest volumineuze meer ter wereld, het Baikalmeer, is de laatste decennia in temperatuur gestegen [54].

Ook Nederlandse wateren zijn warmer geworden [30, 32, 55-57] ([figuur 3.1](#)). De orde grootte van de jaargemiddelde stijging van de watertemperatuur ligt rond de 0.5 graad per decennium. De temperatuurtoename is het hoogst in de winter en in de lente [22, 57].

Naast de gemiddelde temperatuur, zijn ook de extremen, zoals hittegolven, ecologisch relevant (zie [hoofdstukken 4 en 5](#)). Naar verwachting zal de frequentie van hittegolven, zoals die van 2003, sterk toenemen [58, 59]. Een recent voorbeeld zijn ook de extreem zachte aprilmaanden in 2007 en 2011, die het warmst waren sinds het begin van de regelmatige waarnemingen in 1706.

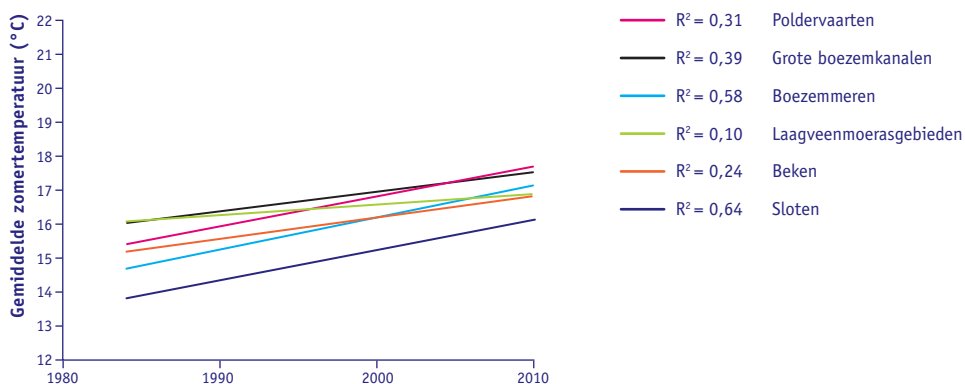
#### 3.1.2 Stratificatie

In diepe meren kan er temperatuurstratificatie optreden, waarbij het warme oppervlaktewater (het epilimnion) niet mengt met het koudere, zwaardere en diepere water (hypolimnion). De twee lagen worden gescheiden door een zogenoemde spronglaag (thermocline) waarin een sterke temperatuurgradiënt, en hierdoor ook een waterdichtheidsgradiënt, optreedt (vaak meer dan 1°C/m).

Fig 3.1 COMPILATIE VAN TEMPERATUURVERLOOP IN VERSCHILLENDE WATEREN

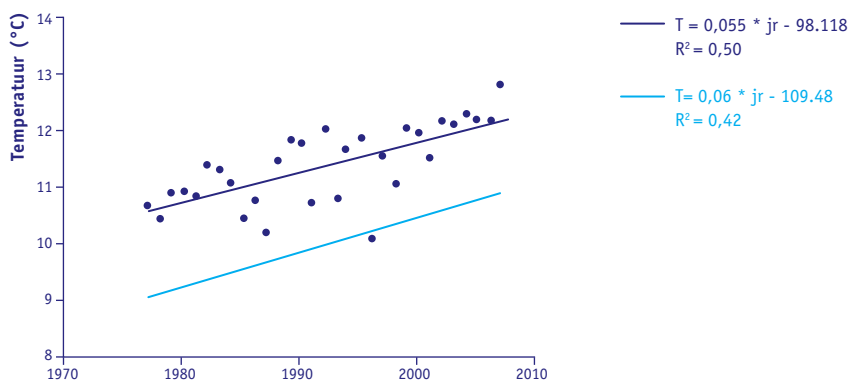
### A Gemiddelde zomertemperatuur in Friese wateren

Bron: Wetterskip Fryslân.

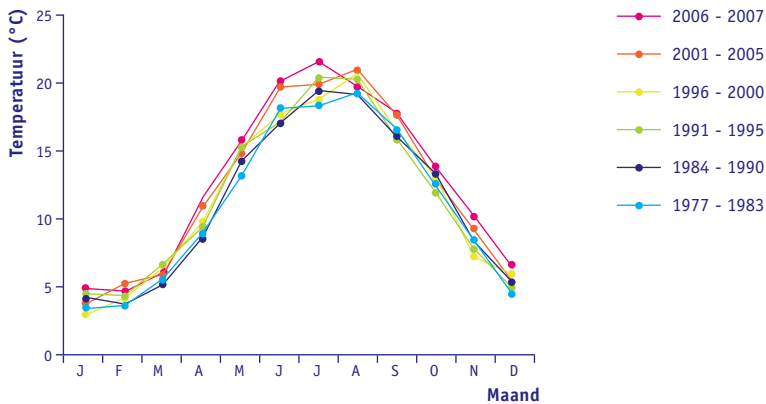


### B Jaargemiddelde watertemperatuur oppervlaktewateren Hollands Noorderkwartier

Jaargemiddelde watertemperatuur van oppervlaktewateren in het beheergebied van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (donkerblauwe lijn) en trend in de luchttemperatuur in De Bilt [32].

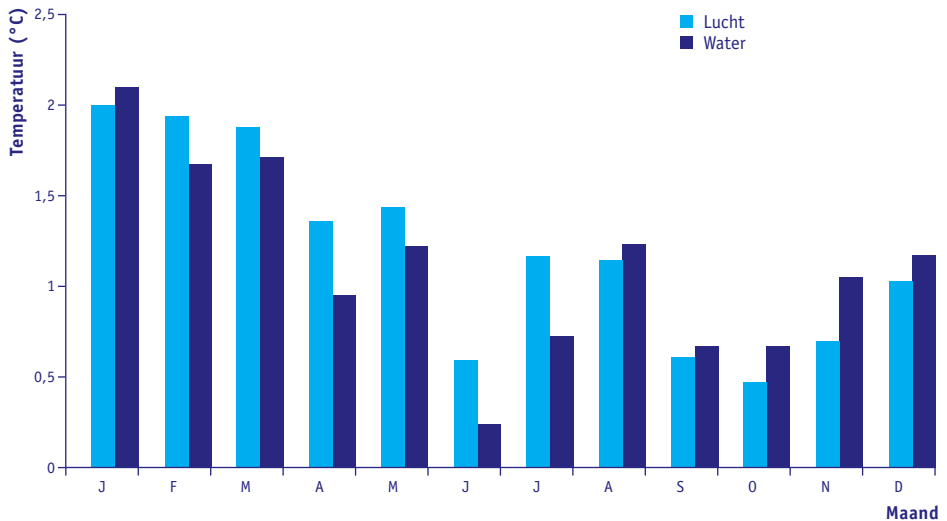


**C Maandgemiddelde watertemperatuur oppervlaktewateren Hollands Noorderkwartier**  
*Maandgemiddelde watertemperatuur van oppervlaktewateren in het beheergebied van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier [32].*



**D Gemiddelde toename in temperatuur**

*Gemiddelde toename in temperatuur in de periode 1988-2006 t.o.v. 1887-1961, de toename in luchttemperatuur is gebaseerd op waarnemingen in De Bilt (KNMI) en de toename in watertemperatuur is gebaseerd op berekende watertemperaturen in het IJsselmeer (W. Mooij) [57].*



---

Of een meer stratificeert, hangt af van de weervariabelen instraling, luchttemperatuur en windsnelheid, maar ook van de karakteristieken van het meer, zoals oppervlakte, diepte, de kleur van het water en de beschutting voor wind [zie ook 48].

Een warm voorjaar leidt tot een eerdere start van de stratificatieperiode. In warme zomers kan de stratificatie langer aanhouden. De totale periode van stratificatie kan hierdoor met wel vijftig dagen toenemen [60].

De stratificatie heeft tot gevolg dat het epilimnion opwarmt, terwijl de temperatuur in het hypolimnion redelijk constant is en niet of minder sterk wordt beïnvloed door klimaatverandering. In meren die niet volledig mixen, is er mogelijk wel sprake van een geleidelijke temperatuurverhoging in het hypolimnion over de jaren heen [40].

Hoe dik het epilimnion is, hangt voornamelijk af van het oppervlak van het meer. Maar ook de troebelheid van het water en de luchttemperatuur zijn van invloed ([box 3](#)). Doordat een hogere luchttemperatuur leidt tot een hogere watertemperatuur in het epilimnion terwijl de temperatuur in het hypolimnion vrij constant blijft, neemt het temperatuurverschil in de waterkolom toe. Dit heeft tot gevolg dat onder warme omstandigheden het water minder makkelijk mengt en het epilimnion dunner wordt ([figuur 3.2](#)) [60].

---

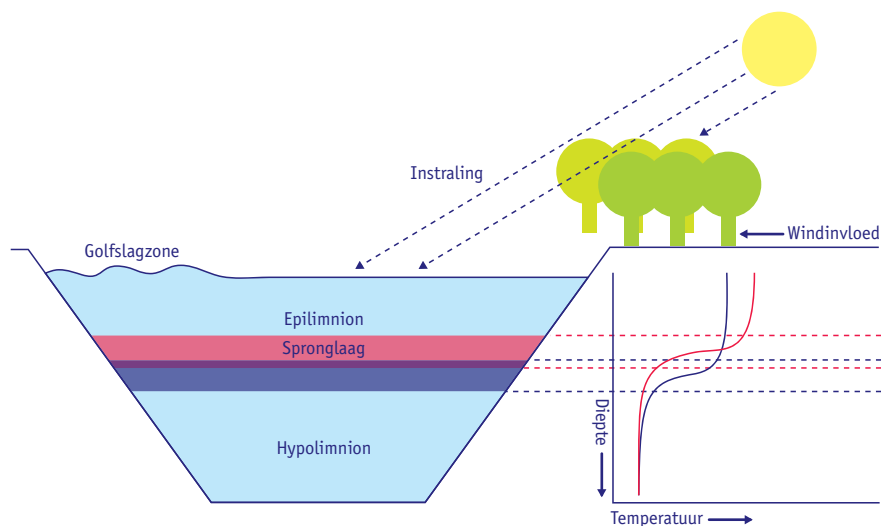
### **BOX 3** KLIMAATINVLOED OP DE DIKTE VAN HET EPILIMNION

De dikte van het epilimnion wordt beïnvloed door de luchttemperatuur, maar ook de eigenschappen van het meer zijn van belang. Om de ordegrootte van de verschillende eigenschappen weer te geven, zijn hieronder enkele voorbeelden gegeven [naar 60].

- Een stijging van de luchttemperatuur van 17 °C naar 20 °C leidt tot een verdunning van het epilimnion met 1 meter.
- Een meer met een oppervlakte van 2 ha heeft een 7 meter dikker epilimnion dan een meer van 1700 ha.
- Een troebel meer (lichtuitdovingscoëfficiënt van 2,4/m) heeft een 2 meter dunner epilimnion dan een helder meer (lichtuitdovingscoëfficiënt van 0,5/m).

**Fig 3.2 DE KLIMAATINVLOED OP DE STRATIFICATIE VAN EEN KLEIN DIEP MEER**

Schematische weergave van de klimaatinvloed op de stratificatie van een klein diep meer. In donkerblauw de referentiesituatie en in rood de situatie tijdens warme zomers.



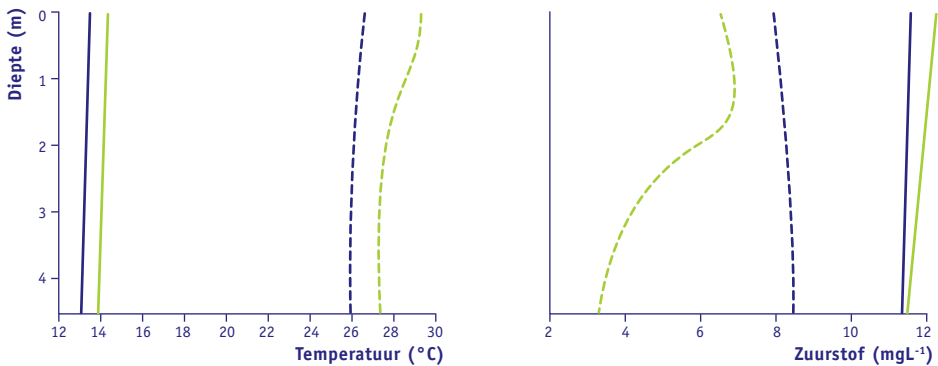
Ook in ondiepere wateren kunnen hogere temperaturen in combinatie met weinig wind leiden tot sterkere stratificatie. Slechts een klein temperatuurverschil tussen de bovenste en de onderste waterlaag kan in warme wateren al leiden tot stratificatie. Dit is een direct gevolg van de temperatuursafhankelijkheid van de waterdichtheid [61]. De stratificatie in warme ondiepe wateren is het meest stabiel wanneer het water troebel is. Dit heeft te maken met de relatief sterke warmteabsorptie in de bovenste waterlaag in troebel water (figuur 3.3).

In tropische ondiepe meren komt tijdelijke stratificatie, die met name 's nachts regelmatig wordt opgeheven, veel voor. Ook in koelere streken wordt dit tijdens warme perioden echter waargenomen [bijvoorbeeld in Alberta, Canada: 62, en in Zuid-Finland: 63]. Zelfs in Nederlandse sloten van maar twintig centimeter diep, stratificeert de waterkolom tijdens warme zomerdagen. Het temperatuurverschil tussen de bodem en het wateroppervlak kan hierbij wel oplopen tot tien graden Celsius. Als 's avonds de bovenste laag afkoelt mengt de waterkolom zich vervolgens weer. Dit wordt ook wel micro-stratificatie genoemd.



### Fig 3.3 DE VERSCHILLEN IN STRATIFICATIE TUSSEN VIER ONDIEPE WATEREN

Schematisch voorbeeld van de verschillen in stratificatie tussen vier ondiepe wateren aan de hand van verticale temperatuur- en zuurstofprofielen: twee ondiepe wateren onder koude condities (doorgetrokken lijnen) en twee ondiepe wateren onder warme condities (gestippelde lijnen). De blauwe lijnen representeren heldere wateren, de groene troebele wateren. Wat opvalt is de sterke verticale gradiënt in zuurstofconcentratie in het troebele warme water, terwijl er slechts een gering temperatuurverschil is tussen de bovenste en onderste waterlaag [naar 41].



Het is aannemelijk dat in gematigde streken zoals Nederland, de frequentie en de duur van stratificatie in ondiepe wateren zullen toenemen als gevolg van klimaatverandering. Zo zijn tijdens recente hittegolven in een Duits ondiep meer al stratificatieperioden met de duur van een week tot zelfs twee maanden waargenomen [64]. Deze afwisseling tussen volledige menging en stratificatie heeft, evenals de eerder genoemde klimaatgerelateerde veranderingen in stratificatie in diepere wateren, belangrijke gevolgen voor de biochemie en de ecologie.

#### 3.1.3 Ijsbedekking

Een ander duidelijk zichtbaar gevolg van klimaatverandering is de verkorting van de periode waarin wateren door ijs zijn bedekt. Gemiddeld genomen is de ijsbedekking op het noordelijk halfrond de laatste decennia aanzienlijk verkort. Met name meren bevriezen later (6,5 dagen per 100 jaar) en ontdooien eerder (5,8 dagen per 100 jaar) [65].

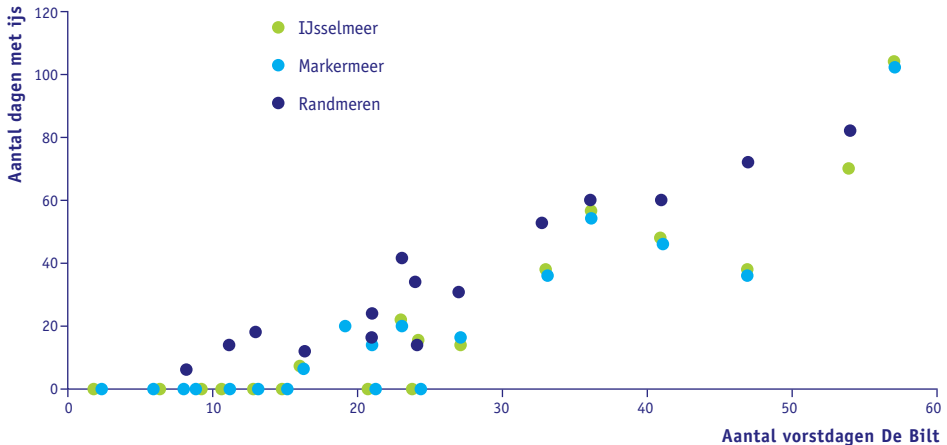
De duur van de ijsbedekking is sterk gerelateerd aan het aantal vorstdagen ([figuur 3.4](#)). Het aantal vorstdagen per winter (dagen met een etmaalgemiddelde temperatuur onder nul graden Celsius) varieert sterk in de tijd. Maar over een langere periode is er een duidelijk dalende lijn te zien ([figuur 3.5](#) en [box 2](#)). De KNMI'06 scenario's voorspellen warmere winters ([tabel 2.1](#)), waardoor de frequentie en de duur van de ijsbedekking naar verwachting nog verder af zullen nemen. Net zoals de verhoging van de watertemperatuur heeft de afwezigheid van ijs belangrijke gevolgen voor de aquatische ecologie (zie [hoofdstuk 4 en 5](#)).

### 3.2 HYDROLOGIE

Onder invloed van klimaatverandering neemt de runoff toe. In stromende wateren nemen piekafvoeren en erosie toe, maar zal het debiet afnemen. In kleine stromende wateren treedt vaker droogval op. In stilstaande wateren zakt het peil uit, treedt droogval op en zal een grotere behoefte aan het inlaten van water ontstaan. Hieronder lichten we deze effecten kort toe.

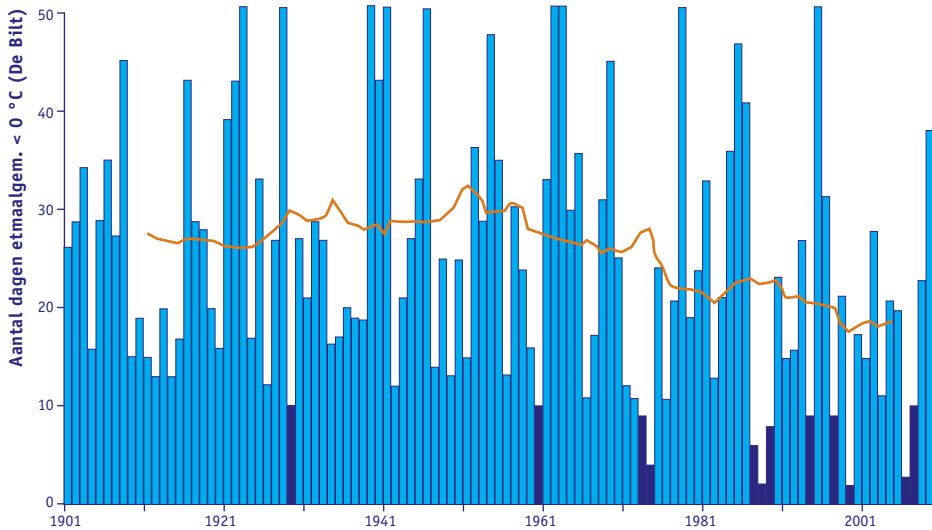
**Fig 3.4 AANTAL VORSTDAGEN PER WINTER**

Aantal vorstdagen per winter (KNMI) in relatie tot het aantal dagen met ijs op het IJsselmeer, Markermeer en de Randmeren (RIZA) [57].



### Fig 3.5 AANTAL ETMALEN MET EEN ETMAALGEMIDDELTE TEMPERatuur ONDER NUL

Aantal etmalen met een etmaalgemiddelde temperatuur onder nul (aangegeven jaar is dat van het najaar) vanaf 1901 (KNMI) met lopend gemiddelde over 25 jaar (oranje lijn). Winters met tien of minder ijsdagen zijn donkerblauw gemarkeerd [57].



#### 3.2.1 Runoff

Alle KNMI'06 scenario's geven aan dat het aantal intense (cluster)buien verspreid over het hele jaar toe zal nemen ([tabel 2.1](#)). De gevolgen hiervan voor de waterkwaliteit zullen over het algemeen negatief zijn door een toename van de hoeveelheid ondergrondse afstroming, runoff en plaatselijk ook door riooloverstorten [26].

De extra waterstroom naar het oppervlaktewater gaat gepaard met een toename van de organische-stofbelasting en nutriëntenbelasting. Het moment waarop de intense buien vallen, is van grote invloed op de mate waarin negatieve effecten van extra ondergrondse afstroming en runoff optreden. Zo zal de toename in nutriëntenvrachten het sterkst zijn als de buien vallen wanneer landbouwgrond niet begroeid en pas bemest is.

De mate waarin het aantal overstortingen vanuit rioolssystemen toeneemt, hangt sterk af van de mate waarin deze systemen in de nabije toekomst worden aan-

---

gepast, maar een landelijke quickscan duidt op een emissietoename van veertig procent [66]. Mogelijk heeft klimaatverandering wel een positief effect op het zuiveringsrendement van rioolwaterzuiveringsinstallaties. Tijdens langdurige koude winters is het rendement laag, warmere winters kunnen dus tot een lagere belasting van het oppervlaktewater leiden.

### 3.2.2 Waterpeil, inlaatbehoefte en debiet

De KNMI'06 scenario's geven aan dat de hoeveelheid neerslag in de winter en in de lente toe zal nemen. De hoeveelheid neerslag in de zomer zal daarentegen, in de KNMI'06 scenario's G+ en W+, sterk dalen ([tabel 2.1](#)). De afname van zomerneerslag in combinatie met de verwachte toename in verdamping kan, afhankelijk van het watersysteem, in de zomer leiden tot een grotere behoefte aan inlaatwater vanuit de grote rivieren of het IJsselmeer, daling van de (grond)waterpeilen, toename van de verblijftijd en een afname in debiet [67]. Voor de winter- en lenteperiode geldt het tegenovergestelde.

Fluctuatie van het waterpeil door veranderingen in het netto neerslagpatroon, treedt op in geïsoleerde wateren zoals vennen, duinplassen en uiterwaardplassen. Tijdens droogte neemt door het uitzakken van het waterpeil en verdamping de concentratie van stoffen toe [68, 69]. Dat kan leiden tot volledige (tijdelijke) droogval, maar het kan mogelijk ook positieve gevolgen hebben voor de nutriëntenhuishouding (zie [hoofdstuk 4](#)).

Veel stilstaande Nederlandse wateren worden op peil gehouden door een gecontroleerd in- en uitlaatregime. De extra benodigde inlaat tijdens droogte heeft tot gevolg dat de waterkwaliteit van het stagnante watersysteem sterker zal gaan lijken op die van het inlaatwater. Het toestaan van hogere waterstanden in de winter kan de inlaatbehoefte in de zomer verminderen.

In stromende wateren wordt 's winters een toename in waterpeil en debiet verwacht, terwijl deze in de zomer af zullen nemen [70]. De peilverlaging en de vermindering van het debiet in de zomer hebben niet alleen diverse biogeochemische en ecologische consequenties, maar veranderen ook de structuur van de stroombedding. Zo zal er meer fijn materiaal bezinken als de stroomsnelheid afneemt. Hierdoor kan de diversiteit aan habitats afnemen. Dit heeft vaak negatieve gevolgen voor de levensgemeenschappen van stromende wateren [71].

---

De toename in de frequentie van extreem droge en extreem natte omstandigheden zal leiden tot een toename in piekafvoeren en overstromingen. In beken zorgen de piekafvoeren in de winter voor sterke erosie. Dit wordt beschouwd als zeer schadelijk voor het natuurlijke bronsysteem, omdat macrofauna kan worden uitgespoeld [71]. Ook zullen beken naar verwachting 's zomers vaker droogvallen [37].

Volledige droogval treedt in de grotere rivieren niet op doordat het water door stuwen en sluizen wordt vastgehouden. De sterke daling van het debiet heeft echter wel tot gevolg dat de omstandigheden in de rivieren beginnen te lijken op die van stilstaande wateren, wat kan leiden tot hoge fytoplanktondichtheden [72, 73]. Zie ook [paragraaf 4.6 en 5.1](#).

### 3.3 SYNTHESE FYSISCH ASPECTEN

De met klimaatverandering gepaard gaande veranderingen in temperatuur en neerslag zullen aquatische systemen het sterkst fysisch beïnvloeden. Ook wind is een belangrijke klimaatdriver, maar we laten dit hier verder buiten beschouwing, omdat het windklimaat naar verwachting nagenoeg niet zal veranderen (zie [hoofdstuk 2](#)).

De belangrijkste effecten van veranderingen in temperatuur en neerslag op de fysische aspecten zijn, kort samengevat:

- \* De watertemperatuur zal toenemen en de ijsbedekking zal afnemen;
- \* De periode waarin een diep meer gestratificeerd is, zal toenemen (eerdere start stratificatie en latere menging);
- \* Het epilimnion in diepe meren zal dunner worden;
- \* Ondiepe stilstaande wateren zullen tijdelijk stratificeren;
- \* De runoff zal toenemen;
- \* De frequentie van piekafvoeren en erosie in stromende wateren zal toenemen;
- \* Het debiet in stromende wateren zal afnemen en kleine stromende wateren zullen frequenter droogvallen;
- \* In stilstaande wateren zal het peil uitzakken, droogval optreden en een grotere behoefte aan inlaatwater ontstaan.

De fysische veranderingen hebben uiteenlopende biogeochemische en biologische gevolgen. Hierop gaan we in de volgende twee hoofdstukken dieper in.

.....



*Hogere temperaturen kunnen leiden  
tot meer gasuitstoot door oppervlaktewateren*

---

## **H4 DE INVLOED VAN KLIMAAT- VERANDERING OP DE BIOGEOCHEMISCHE ASPECTEN VAN AQUATISCHE SYSTEMEN**

---

Zuurstof, fosfor, stikstof, zwavel, koolstof en chloride zijn sleutelementen in het aquatisch milieu. In dit hoofdstuk wordt de klimaatinvloed op de verschillende elementencycli voor de duidelijkheid afzonderlijk besproken, maar in werkelijkheid zijn de verschillende cycli nauw met elkaar verbonden (Zie ook [figuur 4.9](#) in de synthese). Klimaatverandering beïnvloedt de aquatische biogeochemie zowel via veranderingen in het neerslagpatroon als via veranderingen in temperatuur. Veranderingen in neerslag hebben een sterke invloed op de belasting van het systeem. Opwarming veroorzaakt versnelling van biologische en chemische reacties. Tevens veroorzaakt het een vermindering van het oplossend vermogen van gassen in water, kan het de diffusiesnelheid van gassen in het water doen toenemen en beïnvloedt het de mengingspatronen (stratificatie; zie ook [subparagraaf 3.1.2](#)).

#### 4.1 ZUURSTOF

Hogere watertemperaturen - eventueel in combinatie met een lagere afvoer - leiden tot grotere dag-nachtfluctuaties in zuurstofconcentraties. Door de hogere temperaturen neemt tevens de kans op zuurstofloosheid toe.

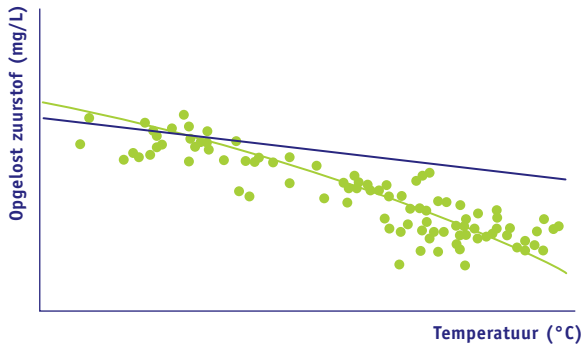
De zuurstofconcentratie wordt in grote mate bepaald door de watertemperatuur. Dit komt enerzijds doordat de oplosbaarheid van zuurstof afneemt als het water opwarmt (zie de blauwe lijn in [figuur 4.1](#)), anderzijds doordat het metabolisme van alle in het water en in het sediment aanwezige organismen toeneemt. Dit gaat zowel op voor de primaire productie, die overdag plaatsvindt en waarbij zuurstof wordt geproduceerd, als voor de respiratie, waarbij overdag en 's nachts zuurstof wordt geconsumeerd. Over het algemeen neemt de respiratie sterker toe dan de productie [74-76], waardoor de zuurstofconcentratie in het water daalt.

De differentiële temperatuursafhankelijkheid heeft verschillende oorzaken. Zo kan de primaire productie gelimiteerd worden door bijvoorbeeld licht of nutriënten, waardoor een temperatuurverhoging geen invloed heeft op de productiesnelheid. Respiratie wordt minder snel gelimiteerd, waardoor netto de zuurstofconcentratie afneemt. Dit verklaart ook het feit dat onder warmere omstandigheden de zuurstofconcentraties in oppervlaktewateren vaak lager zijn dan je op grond van de zuurstofoplosbaarheid zou verwachten ([figuur 4.1](#)). Doordat het effect van temperatuur op de zuurstofconcentratie snel verloopt, kunnen extreme situaties zoals hittegolven, met name in ondiepe wateren met een organische bodem al snel leiden tot zuurstofloosheid.

---

**Fig 4.1 TEMPERATUURSAFHANKELIJKHEID VAN ZUURSTOFCONCENTRATIES IN SLOTEN**

De blauwe lijn geeft de zuurstofverzadigingsconcentratie aan. De stippen geven aan wat de gemiddelde zuurstofconcentratie was in 3100 sloten die zijn gemeten in de jaren 1980-2005. De groene lijn geeft aan welke zuurstofconcentraties er worden verwacht op basis van een eenvoudig model waarbij bij opwarming respiratie sterker toeneemt dan fotosynthese. De gemiddelden zijn gebaseerd op maandgemiddelden van april-juli [77].



---

Gestratificeerde wateren zijn relatief kwetsbaar voor het optreden van zuurstofloosheid: door afbraakprocessen in het sediment neemt de zuurstofconcentratie in het hypolimnion af, terwijl aanvulling door atmosferisch zuurstof wordt belemmerd. Klimaatverandering kan deze situatie verergeren, doordat in diepe meren de stratificatieperiode langer wordt en het epilimnion dunner zal worden (zie [subparagraaf 3.1.2](#)). Een dunner epilimnion, of een groter hypolimnion, heeft tot gevolg dat een groter gedeelte van het sediment in het litoraal wordt blootgesteld aan zuurstofarme condities.

Onder invloed van klimaatverandering zal ook de frequentie van stratificatie in ondiepe systemen toenemen. Terwijl in diepe systemen de temperatuur bij het sediment als gevolg van klimaatverandering niet of nauwelijks toe zal nemen, gebeurt dit naar verwachting in ondiepe systemen wel (zie [paragraaf 3.1](#)). Dit zal in ondiepe systemen leiden tot een grotere afbraaksnelheid van organisch materiaal. Wanneer er veel organisch materiaal in het sediment aanwezig is, wat veelal het geval is in eutrofe systemen, kan dit leiden tot zuurstofloosheid nabij het sediment en een versterkte nalevering van fosfor naar de waterlaag (zie [paragraaf 4.2](#)).

---

Klimaatverandering heeft door de sterke afname in het zomerdebiet een sterke invloed op de zuurstofhuishouding van grote rivieren. Door het lage debiet neemt de fytoplanktonbiomassa toe ([paragraaf 5.1](#)) wat zorgt voor grote dag-nachtfluctuaties in zuurstof. Zo daalde tijdens de hittegolf van 1996 het zuurstofgehalte in de Maas 's nachts tot een minimum van 1 à 3 mg/l [73]. Klimaatverandering kan de zuurstofhuishouding ook beïnvloeden door een toename van de organische belasting van het watersysteem. De verwachte toename van extreme buien en de extremere afwisseling van droge en natte perioden kunnen vooral in veengebieden leiden tot een toename van de belasting met opgelost organisch materiaal. Tevens kunnen de extreme buien, zonder technische aanpassingen, ertoe leiden dat het riool vaker over zal storten op het oppervlaktewater. Dit leidt vervolgens tot een grotere zuurstofvraag en mogelijk zuurstofloosheid, zeker als de overstorten plaatsvinden in een warme zomer.

## 4.2 FOSFOR

Klimaatverandering leidt naar alle waarschijnlijkheid tot een hogere interne en externe fosforbelasting. De hogere interne fosforbelasting wordt vooral veroorzaakt door de als gevolg van opwarming versnelde mineralisatie. Hierbij komt fosfor vrij. Doordat ook de zuurstofconcentratie afneemt, kan er bovendien aan ijzer gebonden fosfor vrijkomen.

De hogere externe fosforbelasting wordt voornamelijk veroorzaakt door veranderingen in het neerslagregime en de hiermee samenhangende hoeveelheden runoff, inlaat en uitlaat. De veranderingen in de interne en externe fosforbelasting worden hieronder nader beschreven.

### 4.2.1 Interne P-belasting

Hogere temperaturen versnellen de afbraak van organisch materiaal in de waterkolom en in het sediment. Als organisch materiaal wordt afgebroken komt er fosfor vrij. Als het warmer wordt, neemt de interne fosforbelasting dus toe. Als gevolg van klimaatverandering zal met name in ondiepe systemen de temperatuur nabij het sediment toenemen. Een temperatuurverhoging van ongeveer vijf graden kan in sommige gevallen de fosforbelasting vanuit het sediment al meer dan doen verdubbelen [69, 78, zie ook [figuur 4.2](#)]. Hoe lang de toename in fosforbelasting vanuit het sediment als gevolg van opwarming aanhoudt, hangt af van de historische belasting van het systeem en de hiermee samenhangende dikte van de sedimentlaag.

---

Bij hogere temperaturen neemt de kans dat de toplaag van het sediment zuurstofloos wordt, toe. Hierdoor kan de fosforbelasting vanuit het sediment fors toenemen. Dit wordt veroorzaakt door verschillende processen. Met name ijzergebonden fosfor kan onder zuurstofloze condities vrijkomen, zeker als er door sulfaatreductie ijzersulfides gevormd worden (zie ook [figuur 4.5](#)). IJzer heeft namelijk een veel sterkere affiniteit voor zwavel dan voor fosfor, waardoor de fosforbindende capaciteit afneemt [79].

Daarnaast werkt de zogenaamde ijzerval niet meer op het moment dat de overgang van de waterlaag naar het sediment anaeroob wordt. Deze ijzerval ontstaat doordat gereduceerd ijzer uit het sediment wordt geoxideerd op de overgang naar de aerobe waterlaag. Dit geoxideerde ijzer heeft een hoge affiniteit voor fosfaat waarmee het precipiteert [79]. Hierdoor wordt de fosfaatnalevering tegengegaan zolang er voldoende ijzer is opgelost in het sediment en de waterlaag aerob blijft.

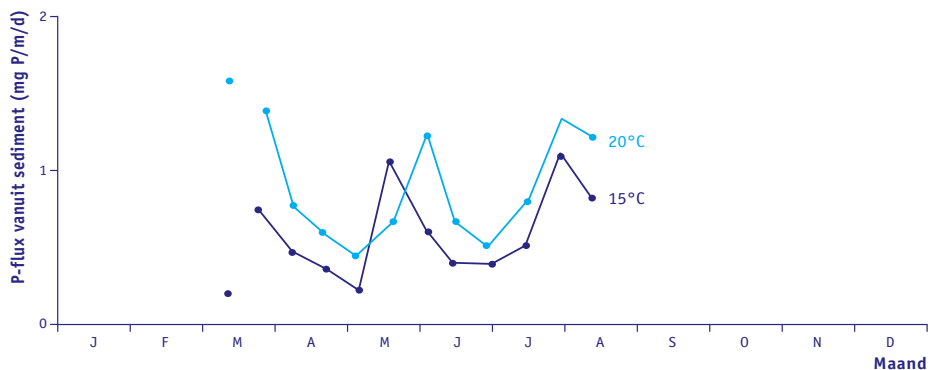
In sommige wateren speelt tevens de vorming van gasbellen in het sediment een belangrijke rol bij de fosforbelasting vanuit het sediment. Wanneer het onder anaerobe omstandigheden gevormde methaan in de vorm van gasbelletjes uit het sediment opstijgt, kan het sedimentdeeltjes en opgelost fosfor meenemen naar de waterkolom [80].

De klimaatinvloed op de interne fosforbelasting in ondiepe systemen is tijdens recente hittegolven duidelijk zichtbaar geworden. In het Duitse ondiepe meer Müggelsee gingen perioden van stratificatie gepaard met zuurstofloosheid in het hypolimnion. Hierdoor kwam er veel fosfor vrij uit het sediment wat zich in het hypolimnion ophoopte. Toen de stratificatie werd opgeheven en het meer weer volledig gemengd werd, zorgde de fosforpuls voor een intense fytoplanktongroei [64]. Deze door opwarming gestimuleerde toename in interne fosforbelasting wordt gezien als één van de belangrijkste factoren die de eutrofiëring in (opwarmende) ondiepe systemen in stand houdt [26, 69, 81].

Ook in diepe meren kan klimaatverandering voor een grotere interne fosforbelasting zorgen, wanneer de langere stratificatieperiode en het grotere hypolimnion (zie [subparagraaf 3.1.2](#)) leiden tot meer zuurstofloosheid nabij het sediment. Tijdens de stratificatie hoopt het fosfor zich op in het epilimnion. Wanneer het meer mengt, komt het fosfor beschikbaar voor algengroei.

**Fig 4.2 FOSFORFLUX**

Fosforflux vanuit het sediment van de Loosdrechtse plassen naar de waterkolom bij een temperatuur van 15°C en 20°C [78].



#### 4.2.2 Externe P-belasting

De grootste binnenlandse bron van fosfor naar het oppervlaktewater in Nederland is landbouwgrond [circa 45 procent van de totale binnenlandse bronnen; 82]. Veranderingen in temperatuur en neerslag beïnvloeden de af- en uitspoeling van landbouwgronden direct, maar ook indirect. Bijvoorbeeld via veranderingen in gewaskeuze, het tijdstip van oogsten [83] en het tijdstip van bemesting [84].

Door de verwachte toename in intense buien en de verwachte neerslagtoename in de winter (tabel 2.1) zal de fosforvrucht door ondergrondse afstroming en runoff toenemen. Dit komt enerzijds door de toename van erosie, anderzijds doordat de fosforverzadiging in agrarische gebieden vaak het hoogst is in de toplaag. In natte perioden zullen hogere grondwaterstanden dus tot hogere fosforconcentraties leiden in het water dat afstroomt naar het oppervlaktewater [38]. Tijdens droge zomers kan de uitspoeling van fosfor afnemen [69]. Als de zomerse droogte echter wordt gecompenseerd door extra inlaatwater uit de grote rivieren of het IJsselmeer, kan dit ook voor een extra fosforbelasting zorgen. Dit wordt nog eens versterkt door het feit dat de waterkwaliteit in de grote rivieren ook verslechtert tijdens droge perioden.

De uiteindelijke fosforconcentratie wordt mede bepaald door de verblijftijd van het water. Klimaatverandering beïnvloedt deze verblijftijd: bij minder neerslag



---

neemt de verblijftijd toe, tenzij het systeem met inlaatwater wordt doorgespoeld, bij meer neerslag neemt de verblijftijd af.

De klimaatinvloed op de uiteindelijke fosforconcentratie in het water is complex en de uitkomst zal per systeem verschillen. Er zijn weinig kwantitatieve gegevens over de uiteindelijke klimaatinvloed op fosforconcentraties, maar modelberekeningen voor oppervlaktewateren in het veenweidegebied [67] en in Deense meren [69] laten zien dat de concentratie in veel gevallen af zal nemen doordat particulier fosfor sedimenteert. Bij deze berekeningen is echter geen rekening gehouden met de toename van de interne fosforbelasting, terwijl deze aanzienlijk kan zijn [85].

Een andere fosforbron die met name in laag Nederland een rol speelt, is kwelwater. In de kustprovincies is de fosforconcentratie in veelal brak kwelwater hoog [86]. Klimaatgerelateerde veranderingen in kwel brengen hierdoor veranderingen in fosforvruchten met zich mee. In veengebieden kan ook een toename van de mineralisatie van het veen, als gevolg van verder wegzakkende freatische grondwaterstanden in de zomer, leiden tot een extra externe fosforbelasting.

De complexe samenhang tussen interne en externe fosforbelasting leidt ertoe dat de fosforbelasting per jaar sterk kan fluctueren. Een bekend voorbeeld van dit fenomeen is de situatie in de ondiepe plas Botshol. Hier leiden natte winters tot een verhoging van het grondwaterpeil tot boven het oppervlaktewaterpeil. Hierdoor stroomt er fosfor af richting het meer waar het wordt opgeslagen in de oevers en in het sediment. Als het sediment in het voorjaar en in de zomer opwarmt, komt het fosfor vrij en kan het voor algenbloei zorgen. Natte winters en warme zomers zorgen hier dus voor een sterk eutrofiërend effect [87].

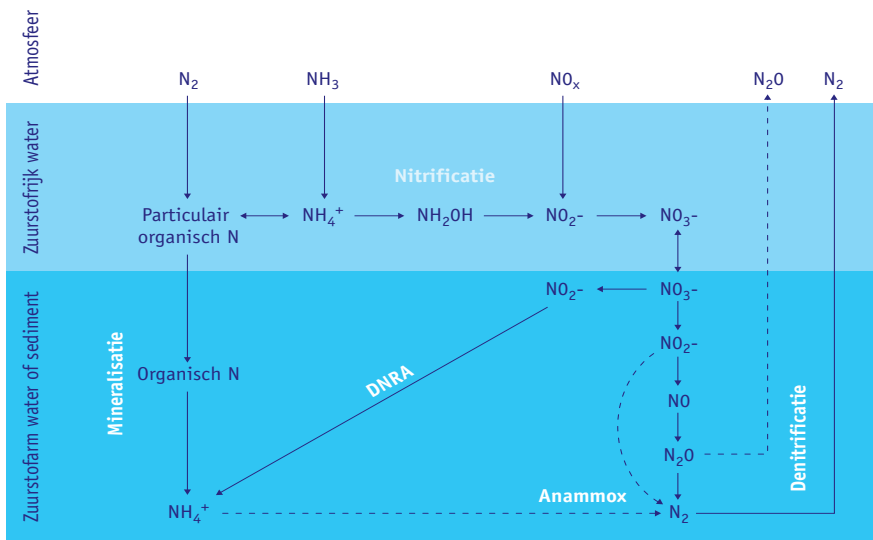
### 4.3 STIKSTOF

Klimaatverandering leidt naar alle waarschijnlijkheid tot een hogere stikstofbelasting, maar hogere temperaturen kunnen ook leiden tot meer stikstofverwijdering door denitrificatie. De hogere interne stikstofbelasting wordt vooral veroorzaakt door de door opwarming versnelde mineralisatie. Hierbij komt stikstof vrij. De hogere externe stikstofbelasting wordt voornamelijk veroorzaakt door veranderingen in het neerslagregime en de hiermee samenhangende hoeveelheden runoff, inlaat en uitlaat.

Evenals voor de fosforcyclus geldt voor de stikstofcyclus dat die sterk beïnvloed wordt door het neerslagregime en de temperatuur. Het grootste verschil tussen de fosfor- en de stikstofcyclus is dat stikstof, in tegenstelling tot fosfor, in verschillende verbindingen in de gasfase aanwezig is in de atmosfeer. Het gasvormige distikstof ( $N_2$ ) kan vanuit de atmosfeer het water in diffunderen waar het door stikstoffixeerders zoals verschillende soorten cyanobacteriën, kan worden omgezet in biomassa. Luchtverontreiniging heeft tot gevolg dat er stikstofdepositie in de vorm van stikstofoxides ( $NO_x$ ) en ammonium ( $NH_3$ ) plaatsvindt. Aquatische systemen kunnen ook stikstof uitstoten naar de atmosfeer (figuur 4.3).

**Fig 4.3 VEREENVOUDIGDE WEERGAVE VAN DE STIKSTOFCYCLUS IN AQUATISCHE SYSTEMEN**

DNRA is Dissimilatieve Nitraat Reductie naar Ammonium. De gestippelde lijnen geven reacties aan die onder normale omstandigheden minder snel verlopen [naar 77].



### 4.3.1 Interne N-belasting

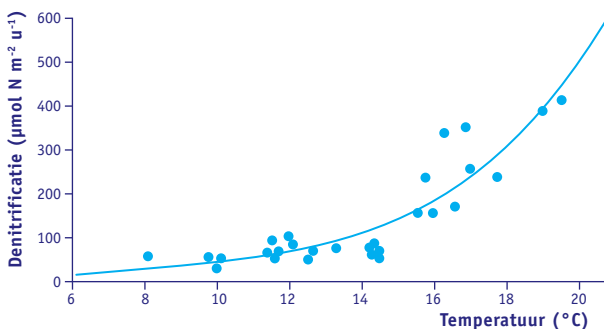
De hogere temperaturen die leiden tot hogere decompositiesnelheden van organisch materiaal in de waterkolom en in het sediment, zorgen niet alleen voor het sneller vrijkomen van fosfor, maar ook van stikstof. Dit heeft tot gevolg dat de hoe-

veelheid detritus afneemt en de hoeveelheid stikstof in de waterkolom toeneemt (zie ook [figuur 4.9](#)). Het vrijgekomen stikstof kan worden opgenomen door fytoplankton of waterplanten, maar kan ook worden gedenitrificeerd door bacteriën. Bij nitrificatie wordt nitraat ( $\text{NO}_3^-$ ) via verschillende tussenstappen gereduceerd tot het gasvormige distikstof (atmosferisch stikstof,  $\text{N}_2$ ). Eén van de tussenproducten is het sterke broeikasgas  $\text{N}_2\text{O}$ . Beide gassen ( $\text{N}_2$  en  $\text{N}_2\text{O}$ ) kunnen door aquatische systemen worden uitgestoten.

Denitrificatie is sterk temperatuurafhankelijk. Metingen in Nederlandse sloten hebben uitgewezen dat  $1^\circ\text{C}$  temperatuurverhoging al kan leiden tot 28 procent meer denitrificatie ([figuur 4.4](#)). Voorwaarde is wel dat er voldoende nitraat en organische stof aanwezig zijn. De sterke toename in denitrificatie heeft twee oorzaken: 1) het metabolisme van denitrificerende bacteriën versnelt als het warmer wordt en 2) door de stijging in temperatuur neemt de zuurstofconcentratie af en ook dit versnelt de denitrificatie [77].

Als de zuurstofconcentratie in het gehele watersysteem laag wordt, kan  $\text{NH}_4^+$  niet meer worden geoxideerd tot  $\text{NO}_3^-$ . De gekoppelde nitrificatie-denitrificatie reacties worden dan geremd en de concentratie  $\text{NH}_4^+$  loopt op [88, zie ook [figuur 4.3](#)]. Bij een hoge pH kan  $\text{NH}_4^+$  worden omgezet in het toxische  $\text{NH}_3$ . Deze omzetting wordt versterkt door hoge temperaturen. Deze combinatie van factoren kan ervoor zorgen dat de  $\text{NH}_3$ -concentraties sterk toenemen tijdens zonnige warme dagen met een hoge primaire productie.

**Fig 4.4 DENITRIFICATIE IN NEDERLANDSE SLOTEN BIJ VERSCHILLENDE TEMPERATUREN**  
[77].



---

### 4.3.2 Externe N-belasting

De externe stikstofbelasting is net als de fosforbelasting sterk afhankelijk van het neerslagregime. Bij een toename in neerslag neemt ook de stikstofbelasting toe [89, 90]. Met name de door klimaatverandering verwachte toename aan intense buien en de hiermee gepaard gaande afspoeling kan een sterke toename van de stikstofvracht veroorzaken [91].

Indirect beïnvloedt ook temperatuur de externe stikstofbelasting. Bij hogere temperaturen neemt de stikstofmineralisatie in de bodem aanzienlijk toe [92]. Het gemineraliseerde stikstof kan vervolgens met het regenwater afstromen naar het oppervlaktewater. De ordegrrootte van deze stikstof flux is sterk grondsoortafhankelijk. Met name in veengebieden kan de opeenvolging van extreme warme droge perioden gevolgd door extreem natte perioden - een situatie die zich als gevolg van klimaatverandering naar verwachting vaker zal voordoen - tot een sterke toename van de stikstofvracht leiden.

### 4.4 ZWAVEL

Klimaatverandering kan de zwavelbelasting verhogen door lagere grondwaterstanden in zwavelhoudende bodems in droge zomers en door een toename in brakke of zoute kwel. Hogere zwavelconcentraties kunnen leiden tot een hogere interne fosforbelasting. Bij hogere temperaturen neemt de bacteriële sulfaatreductie sterk toe waarbij het toxische sulfide gevormd kan worden en de sulfaatgestuurde eutrofiëring toe zal nemen.

De sulfaatconcentraties ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) in het oppervlakte- en grondwater zijn de laatste decennia sterk gestegen door atmosferische zwaveldepositie en uitspoeling uit agrarische gebieden. Sulfaat kan ook in het water terecht komen door de oxidatie van ijzer-zwavelverbindingen ( $\text{FeS}_x$ ) die van nature vaak in de grond aanwezig zijn. Wanneer  $\text{FeS}_x$  wordt geoxideerd door bijvoorbeeld uitzakkende grondwaterspiegels of door de infiltratie van nitraatrijk water, ontstaat er sulfaat [93].

De sulfaatcyclus is op verschillende manieren gekoppeld aan de stikstof- en fosfaatcycli. Bij de sulfaatreductie wordt dood organisch materiaal afgebroken, waarbij stikstof en fosfor vrijkomen. Daarnaast bindt het bij de sulfaatreductie gevormde sulfide met ijzerverbindingen in het sediment. Hierdoor is minder ijzer beschikbaar om fosfaat te binden en kan de fosfaatbeschikbaarheid toenemen.

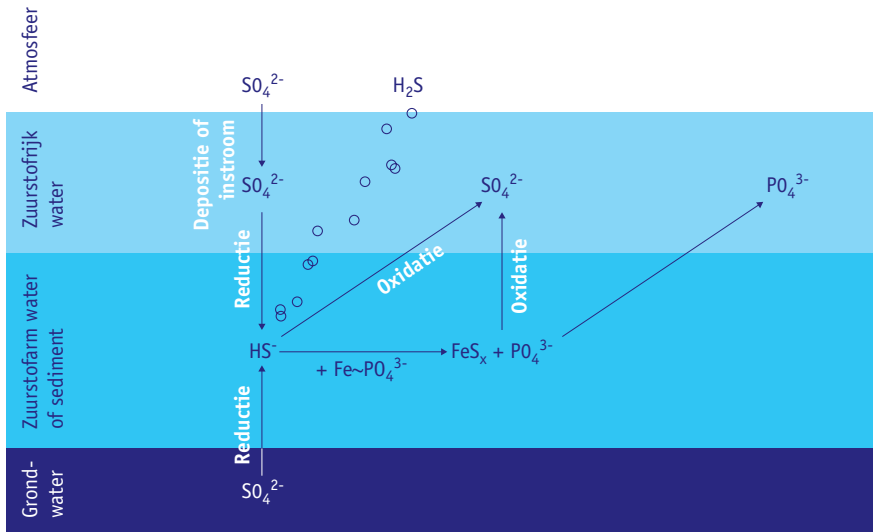
De fosfaatbeschikbaarheid neemt ook toe als sulfaat fosfaat verdringt van anion-adsorptie plaatsen [94]. Een toename van de sulfaatbelasting kan hierdoor leiden tot interne eutrofiëring. Hoge sulfaatconcentraties zijn hierdoor vaak nadelig voor de aquatische ecologie. Klimaatverandering kan, evenals bij stikstof en fosfor het geval is, zowel de zwavelprocessen in het watersysteem als de zwavelbelasting van het watersysteem beïnvloeden.

#### 4.4.1 Interne S-belasting

Onder zuurstofloze omstandigheden treedt sulfaat op als alternatieve oxidator. Bij hogere temperaturen neemt de bacteriële sulfaatreductie sterk toe [95]. Sulfaatreductie kan leiden tot de vorming van het giftige sulfide ( $S^{2-}$ ,  $HS^-$ ) [79]. Dit kan tot sterfte van waterplanten leiden. Door de sulfaatreductie neemt de sulfaatconcentratie af, wat terug te zien is in het veld. Zo zijn de sulfaatconcentraties in de zomer lager dan in de winter [79] en zijn de sulfaatconcentraties in sloten in warme jaren lager dan in koudere jaren [32]. Afhankelijk van de pH kan er ook  $H_2S$  gevormd worden met de kenmerkende rotte-eierengeur (zie ook [figuur 4.5](#)).

**Fig 4.5 VEREENVOUDIGDE WEERGAVE VAN DE ZWAVELCYCLUS IN AQUATISCHE SYSTEMEN**

Inclusief één van de manieren waarop de zwavelcyclus is gekoppeld aan de fosforcyclus.



---

Ook hydrologische omstandigheden beïnvloeden de zwavelcyclus. Zoals hiervoor beschreven, kunnen verlaagde grondwaterstanden leiden tot een verhoging van de sulfaatconcentratie doordat  $\text{FeS}_x$  oxideert. Bij droogval van (gedeelten van) het sediment treedt hetzelfde proces op. Het effect op de waterkwaliteit wanneer het sediment vervolgens weer onder water komt te staan, hangt af van de buffercapaciteit van het sediment en van de voorraden gereduceerd ijzer en fosfor. In het ongunstigste geval leidt de tijdelijke droogval tot hoge sulfaatconcentraties en tot door de oxidatie van gereduceerde zwavelverbindingen veroorzaakte verzuring [96].

De verzuring kan mogelijk leiden tot de mobilisatie van toxische metalen zoals aluminium en zink [97]. In het gunstigste geval is de buffercapaciteit van het sediment voldoende om de verzuring tegen te gaan en leidt de tijdelijke droogval tot een netto stikstofverlies door denitrificatie en een afname van de fosforbeschikbaarheid [97, 98] (zie [hoofdstuk 7](#)). De langere droge perioden die de KNMI'06 scenario's voorspellen kunnen hierdoor positief dan wel negatief uitpakken, afhankelijk van de bodem en de sedimentsamenstelling.

#### 4.4.2 Externe S-belasting

Op veel plaatsen in Nederland is het grondwater rijk aan sulfaat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Kwel zorgt hier voor externe zwavelbelasting. In gebieden met zwavelrijke veenbodems, zorgen oxidatieprocessen als gevolg van uitzakkende grondwaterstanden in de zomer bovendien voor een sterke toename van de sulfaatmobilisatie. Door uitspoeling komt dit sulfaat uiteindelijk in het oppervlaktewater terecht. De verwachte drogere warme zomers leiden, zeker in het midden van de veenpercelen, tot extra lage grondwaterstanden waardoor de sulfaatbelasting van het oppervlaktewater toe zal nemen.

Of het vasthouden van het neerslagoverschot in de winter gunstig uitpakt voor de reductie van de zwavelconcentratie in de zomer, hangt sterk af van de lokale (kwel)omstandigheden en de kwaliteit van het inlaatwater. Ook de balans tussen indamping (evaporatie) en sulfaatreductie bepaalt mede of de sulfaatconcentratie tijdens droge warme perioden verder toe- of af- zal nemen.

Zoute en brakke wateren bevatten van nature hoge concentraties sulfaat. De zwavelbelasting in zoetwatersystemen zal dus sterk toenemen op die locaties waar zoute kwel, of de inlaat van brak water toe zal nemen. Als gevolg van zeespiegel-



---

stijging en extreem droge perioden waarin watertekorten op zullen treden, zal dit vooral voorkomen langs de kust.

Ten slotte is de zwavelcyclus ook gekoppeld aan de stikstofcyclus. Zo kan nitraat-uitspoeling zorgen voor de mobilisatie van sulfaat uit pyriethoudende afzettingen in de ondergrond [93]. Veranderende neerslagregimes zouden ook kunnen leiden tot een toename van de uitspoeling van nitraat naar het diepere grondwater en hiermee indirect ook tot hogere sulfaatconcentraties in het grondwater.

#### 4.5 KOOLSTOF

Klimaatverandering leidt tot hogere CO<sub>2</sub>-concentraties in het water, tenzij er gelijktijdig eutrofiëring optreedt. Hierdoor gaan zoetwatersystemen mogelijk meer CO<sub>2</sub> uitstoten, hetgeen de klimaatverandering verder kan versterken. Dit wordt veroorzaakt door een door opwarming veroorzaakte versnelling van afbraakprocessen. Ook speelt een toename in de belasting met organisch koolstof vanuit het stroomgebied hierbij een belangrijke rol. Dit organische koolstof wordt in het aquatisch systeem afgebroken waarbij CO<sub>2</sub> wordt geproduceerd. Ten slotte is er sprake van een extra CO<sub>2</sub>-influx vanuit de atmosfeer als gevolg van de hogere CO<sub>2</sub>-concentraties. Dit laatste speelt met name een rol in oligotrofe zachtwatersystemen.

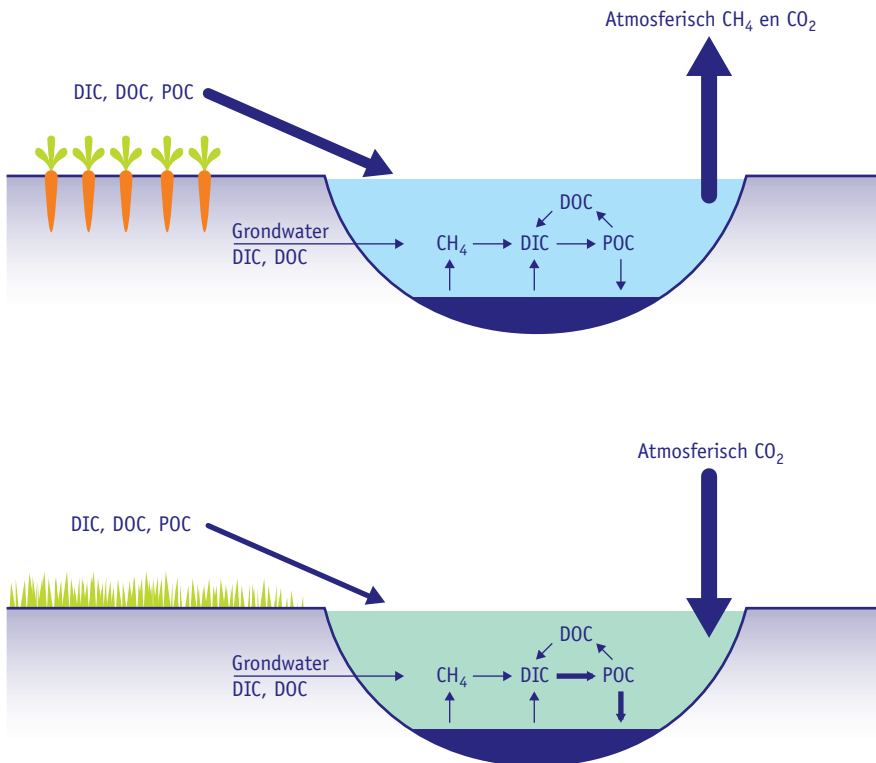
Koolstof is in de waterkolom aanwezig in organische en anorganische vorm ([figuur 4.6](#)). Het organische koolstof kan in het water geproduceerd zijn, bijvoorbeeld door algenproductie, maar het kan ook van terrestrische origine zijn en bijvoorbeeld door bladval (particulair organisch koolstof, POC) of uitspoeling van humeuze stoffen (opgelost organisch koolstof, DOC) in het water terecht zijn gekomen. Door oxidatie van organisch koolstof in het sediment en in de waterlaag, kan anorganisch koolstof, CO<sub>2</sub>, worden geproduceerd. CO<sub>2</sub> kan oplossen in water, waardoor H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> en CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> kunnen worden gevormd (gezamenlijk afgekort als DIC: Dissolved Inorganic Carbon). De verhouding waarin H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> en CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> in het water aanwezig zijn, wordt gestuurd door de pH ([figuur 4.5](#)). Deze verschillende vormen van anorganisch koolstof kunnen ook via grond- of oppervlaktewater het systeem bereiken.

Een andere mogelijke CO<sub>2</sub>-bron is de atmosfeer; als de CO<sub>2</sub>-concentratie in het oppervlaktewater lager is dan die in de atmosfeer, diffundeert er CO<sub>2</sub> het water in ([figuur 4.6](#), onderste figuur). Als het oppervlaktewater daarentegen oververzadigd

is met  $\text{CO}_2$ , ontwijkt er  $\text{CO}_2$  en fungeert het water als een koolstofbron naar de atmosfeer [99] (figuur 4.6, bovenste figuur). De meeste zoete wateren zijn oververzadigd met  $\text{CO}_2$  [99-101]. Oligotrofe wateren met zeer zacht water vormen hierop een uitzondering, evenals eutrofe watersystemen met veel primaire productie en relatief weinig instroom van terrestrisch koolstof en zeer harde wateren met een hoge pH waarin het anorganische koolstof volledig als bicarbonaat aanwezig is.

#### Fig 4.6 VOORNAAMSTE KOLSTOFFLUXEN IN OPPERVLAKTEWATEREN

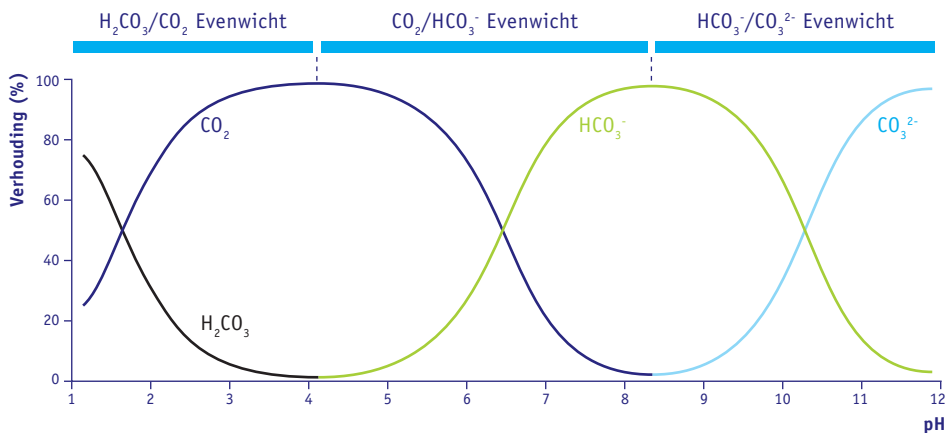
Oligotrofe condities met een grote input van terrestrische koolstof resulteren over het algemeen in een netto efflux van  $\text{CO}_2$  en  $\text{CH}_4$  naar de atmosfeer (boven). Eutrofe condities waarbij de primaire productie groter is dan de respiratie resulteren in een netto  $\text{CO}_2$ -influx (onder). Naast  $\text{CO}_2$  en  $\text{CH}_4$  kan koolstof in het water voorkomen als opgelost anorganisch koolstof (DIC), opgelost organisch koolstof (DOC) en als particulaair materiaal (POC).



#### 4.5.1 Anorganisch koolstof

Processen die  $\text{CO}_2$  produceren, verbruiken vaak zuurstof (afbraak/respiratie). Primaire productie, aan de andere kant, produceert zuurstof en verbruikt  $\text{CO}_2$ . De verandering in de concentratie anorganisch koolstof verloopt hierdoor doorgaans tegenovergesteld aan die van zuurstof. Door de snellere toename van respiratie in vergelijking met primaire productie bij oplopende temperaturen, zal bij een opwarmend klimaat de anorganische-koolstofconcentratie in het water toenemen [101, 102]. Hierdoor neemt ook de  $\text{CO}_2$ -uitstoot vanuit binnenwateren naar de atmosfeer toe, wat de klimaatverandering verder kan versterken (zie ook [box 8](#)).

Fig 4.7 KOOLSTOFSPECIATIE IN WATER AFHANKELIJK VAN DE ZUURGRAAD



Door de stijging van de atmosferische  $\text{CO}_2$ -concentratie, kan er meer  $\text{CO}_2$  het water in diffunderen. Dit speelt vooral een rol in watersystemen met erg lage  $\text{CO}_2$ -concentraties, waar vaak specifieke plantensoorten voorkomen (zie [paragraaf 5.5](#)). De meeste wateren zijn echter sterk oververzadigd met  $\text{CO}_2$ . In deze wateren kan de  $\text{CO}_2$ -concentratie nog iets verder toenemen door afname van de  $\text{CO}_2$ -flux richting de atmosfeer. Deze toename zal in veel gevallen relatief klein zijn doordat de concentraties in de atmosfeer erg laag zijn in vergelijking tot de concentraties die worden gemeten in veel oppervlaktewateren.

---

#### 4.5.2 Organisch koolstof

De instroom van organisch koolstof in het aquatische systeem is sterk afhankelijk van het neerslagregime [87, 103]. Verdroging in veengebieden leidt bijvoorbeeld tot een grotere afbraak van organisch materiaal op het land. Dit kan vervolgens tot een grotere uitspoeling van organisch koolstof leiden. Ook de temperatuur speelt een rol. Zo versnellen microbiële processen in de bodem wanneer het warmer wordt. Dit kan leiden tot veranderingen in kwantiteit en kwaliteit van het opgeloste organische materiaal (DOC) dat het aquatisch systeem bereikt [104].

Onder warme omstandigheden wordt vervolgens ook een groter aandeel van het terrestrische organische materiaal gemineraliseerd [105, 106], wat tot een grotere uitstoot van CO<sub>2</sub> kan leiden [101]. In veengebieden waar periodiek verdroging optreedt, kan de mineralisatie van organisch materiaal in het oppervlaktewater nog verder worden versneld doordat de verdroging een sterke toename van de sulfaatuitspoeling naar de sloten tot gevolg kan hebben, wat de afbraak van organisch sediment bevordert. De afbraaksnelheid van het organisch materiaal hangt echter sterk af van de kwaliteit van het materiaal en van de nutriëntenconcentraties [25].

Veranderingen in de concentratie opgelost organisch koolstof hebben directe gevolgen voor de helderheid van het water en hierdoor ook voor de groeimogelijkheden van ondergedoken waterplanten. Doordat opgelost organisch koolstof in sterke mate UV-licht absorbeert, kan een toename van opgelost organisch koolstof mogelijk de overlevingskansen van pathogenen vergroten [107]. Om dezelfde reden kan een toename van organische stoffen een probleem vormen voor de drinkwaterbereiding.

#### 4.6 CHLORIDE

Klimaatverandering zal naar verwachting leiden tot hogere chlorideconcentraties. Dit komt ten eerst doordat hoeveelheid zoute kwel toeneemt. Ook wordt de hoeveelheid ingelaten water vanuit de grote rivieren tijdens de voorspelde droge perioden groter, terwijl de chlorideconcentraties in de rivieren dan juist erg hoog zijn. Tot slot neemt de verdamping toe, waardoor de chlorideconcentraties (evenals die van andere elementen) oplopen. Bij extreme buien kunnen de chlorideconcentraties periodiek weer sterk afnemen. De chlorideconcentraties zijn sterk afhankelijk van het inlaatregime, zoute kwel en indamping (evapoconcentratie). Alle drie worden beïnvloed door klimaatverandering. Hieronder gaan we er kort op in.

---

#### 4.6.1 Inlaatwater

Door de verwachte afname in neerslag in de zomer en in de herfst (G+ en W+ scenario), zullen de chlorideconcentraties in de grote rivieren stijgen. Dit is vooral in de Rijn en daardoor ook in het IJsselmeer het geval. De hogere chlorideconcentraties worden veroorzaakt doordat de geloosde hoeveelheid chloride gelijk blijft, terwijl de verdunning afneemt bij lage afvoeren [108].

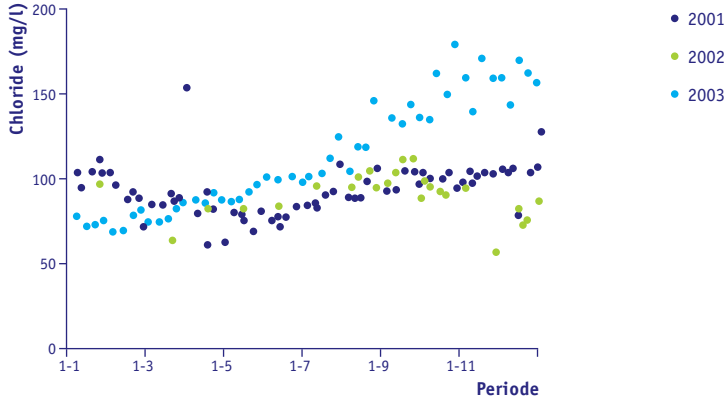
De droge zomer van 2003 is een goed voorbeeld van een situatie die mogelijk vaker op zal treden. De chlorideconcentratie in het IJsselmeer bleef toen maar net onder de drinkwaterinnamegrens van 200 mg/l [108] ([figuur 4.8](#)). De verhoogde chlorideconcentraties in het IJsselmeer destijds kunnen overigens niet volledig worden toegeschreven aan de hogere concentraties in de Rijn. Andere chloridebronnen, zoals uitslagwater van aanliggende polders, brakke kwel en het grotere neerslagtekort (neerslag - verdamping) kunnen ook een rol hebben gespeeld [108].

Of het inlaten van het chloriderijke Rijnwater directe ecologische gevolgen heeft (gehad), is niet duidelijk. De meeste waterplanten [109] en macrofauna [110] tolereren hogere chlorideconcentraties. Bovendien is de door droogte veroorzaakte toename in chlorideconcentratie in het IJsselmeer het sterkst ruim na de droge periode, doordat het een tijd duurt voordat het 'verzoute' Rijnwater het IJsselmeer bereikt en doordat het IJsselmeer een lange verblijftijd heeft ([figuur 4.8](#)). Wanneer tijdens een droge periode water wordt ingelaten vanuit het IJsselmeer is dit dus over het algemeen nog water met een lagere chlorideconcentratie.

De fluctuaties in chlorideconcentraties in delen van West-Nederland zijn van een andere orde. In grote delen van Goeree-Overflakkee en Voorne-Putten varieert de concentratie tussen de 200 en de 1000 mg Cl-/l. De schommelingen worden veroorzaakt door het waterbeheer ter plaatse en zijn tegennatuurlijk: in de winter sterk brak en in de zomer, vanwege de doorspoeling, zoet. De systemen zijn hierdoor soortenarm en worden gedomineerd door fytoplankton [111]. Klimaatverandering heeft alleen op indirecte wijze invloed op deze schommelingen, bijvoorbeeld door veranderingen in doorspoelregime vanwege mogelijke toekomstige watertekorten in de zomer (met name in de KNMI'06 scenario's G+ en W+).

**Fig 4.8 CHLORIDECONCENTRATIES IN HET IJSSELMEER (ANDIJK)**

*In 2001, 2002 en in het extreem droge jaar 2003 [108].*



#### 4.6.2 Zoute kwel

Zeespiegelstijging leidt tot een verhoging van de zoute grondwaterdruk. Bij gelijkblijvende waterstanden in de binnenwateren zal de hoeveelheid kwel en hiermee de zoutbelasting van de watersystemen en polders toenemen. Bij dalende waterstanden, bijvoorbeeld door droogte, zal de hoeveelheid kwel nog extra toenemen.

Hoeveel de plaatselijke kwelflux toeneemt, is afhankelijk van de afstand tot de zee of tot nabije hoger liggende watermassa's zoals het IJsselmeer, de deltawateren en de grote rivieren. Hierdoor varieert de flux sterk. Modelberekeningen duiden bijvoorbeeld op een toename van de zoutbelasting van 35 procent in Zuid-Holland en van 46 procent op Texel [112].

#### 4.6.3 Indamping

Door de temperatuurstijging neemt, als de netto straling niet verandert, de verdamping toe. Volgens de KNMI'06 scenario's gaat het voor de zomers (in 2050) om een verdampingstoename van 3 tot 15 procent [50]. In geïsoleerde wateren kan dit extra waterverlies in droge perioden leiden tot indamping, waardoor de concentratie van chloride en andere stoffen toeneemt. Het effect van indamping op de ecologische waterkwaliteit is groter naarmate het oppervlak groter is en de diepte geringer.

#### 4.7 SYNTHESE BIOGEOCHEMISCHE ASPECTEN

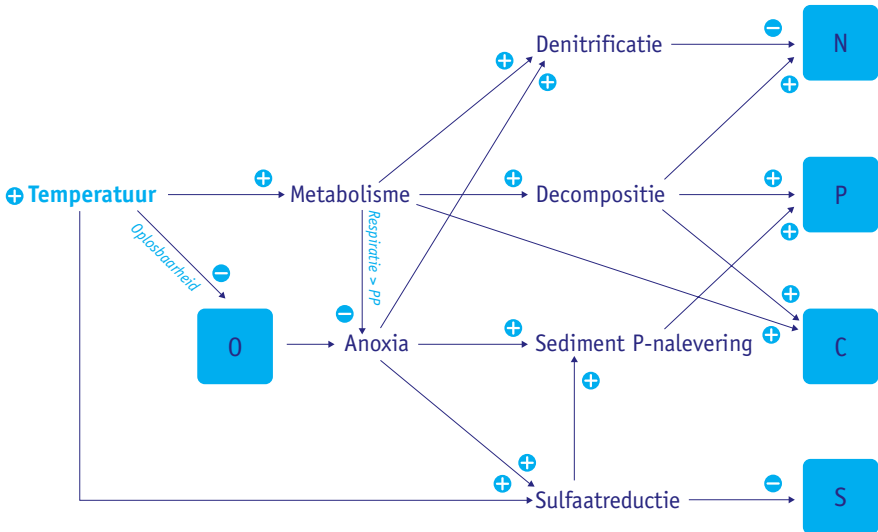
Klimaatverandering zal door veranderingen in het neerslagpatroon waarschijnlijk zorgen voor een toename van de nutriëntenbelasting van watersystemen. Ook veranderingen in grondwaterpeil kunnen hierin een belangrijke rol spelen, met name in veengebieden.

Veel processen in het water zijn sterk temperatuurgereguleerd. Zo zal de zuurstofconcentratie bij hogere temperaturen afnemen en is het aannemelijk dat de beschikbaarheid van anorganisch fosfor en koolstof groter wordt.

De sulfaatbelasting neemt toe, alsmede de sulfaatreductie (in de zomermaanden). Hierdoor kan de sulfaatgestuurde (interne) eutrofiëring flink oplopen. Er kan vaker sulfidotoxiciteit in onderwaterbodems optreden.

Fig 4.9 TEMPERATUURSINVLOEDEN OP DIVERSE CONCENTRATIES

Een gesimplificeerd schema van de temperatuurinvloed op de concentraties van zuurstof (O), stikstof (N), fosfor (P), koolstof (C) en zwavel (S) in de waterkolom. PP verwijst naar primaire productie [naar 41]. Chloride is een conservatieve stof en de concentratie wordt alleen indirect beïnvloed door temperatuur (door indamping).





---

De temperatuurinvloed op de anorganische-stikstofconcentratie is erg systeemafhankelijk. Dit komt doordat zowel de vorming van stikstof (door decompositie) als de denitrificatie (waardoor stikstof uit het aquatische systeem verdwijnt) toenemen ([figuur 4.9](#)).

De effecten van de klimaatveranderingdrivers kunnen elkaar versterken, maar ook tegenwerken. Zo kan er tijdens hevige regenbuien meer nitraat uit- en afspoelen. Maar als het warm weer is, heeft dat mogelijk minder effect doordat het beschikbare nitraat dan snel wordt gedenitrificeerd.

---

### **Samengevat beïnvloedt klimaatverandering de aquatische biogeochemie op de volgende manier:**

#### **Zuurstof**

- Hogere temperaturen, eventueel in combinatie met een lagere afvoer, leiden tot grotere dag-nacht fluctuaties in zuurstofconcentraties.
- De kans op zuurstofloosheid neemt toe.

#### **Fosfor**

- Klimaatverandering leidt naar alle waarschijnlijkheid tot een hogere fosforbelasting.
- De hogere interne fosforbelasting wordt vooral veroorzaakt door versnelde mineralisatie die het gevolg is van opwarming. Hierbij komt fosfor vrij. Doordat ook de zuurstofconcentratie afneemt, kan er bovendien aan ijzer gebonden fosfor vrijkomen.
- De hogere externe fosforbelasting wordt vooral veroorzaakt door veranderingen in het neerslagregime en de hiermee samenhangende hoeveelheden runoff, inlaat- en uitlaatwater.

#### **Stikstof**

- Klimaatverandering leidt naar alle waarschijnlijkheid tot een hogere stikstofbelasting, maar hogere temperaturen kunnen ook leiden tot een grotere stikstofverwijdering door denitrificatie.
- De hogere interne stikstofbelasting wordt vooral veroorzaakt door versnelde mineralisatie die het gevolg is van opwarming. Hierbij komt stikstof vrij.
- De hogere externe stikstofbelasting wordt voornamelijk veroorzaakt door veranderingen in het neerslagregime en de hiermee samenhangende veranderingen in hoeveelheden runoff, inlaat- en uitlaatwater.

---

## Zwavel

- Klimaatverandering kan de zwavelbelasting verhogen door lagere grondwaterstanden in zwavelhoudende bodems in droge zomers en door een toename in brakke of zoute kwel.
- Hogere zwavelconcentraties kunnen leiden tot een hogere interne fosforbelasting.
- Bij hogere temperaturen neemt de bacteriële sulfaatreductie sterk toe, waarbij het toxische sulfide gevormd kan worden en de sulfaatgestuurde eutrofiëring sterker wordt.

## Koolstof

- Klimaatverandering leidt tot hogere CO<sub>2</sub>-concentraties in het water tenzij er gelijktijdig eutrofiëring optreedt. Hierdoor gaan zoetwatersystemen mogelijk meer CO<sub>2</sub> uitstoten. Dit kan de klimaatverandering verder versterken.
- De verhoogde CO<sub>2</sub>-concentraties in het water worden veroorzaakt door: (1) een door opwarming veroorzaakte versnelling van afbraakprocessen; (2) een toename in de belasting van organisch koolstof vanuit het stroomgebied. Dit organische koolstof wordt vervolgens in het aquatische systeem afgebroken waarbij CO<sub>2</sub> wordt geproduceerd; (3) een extra CO<sub>2</sub>-influx vanuit de atmosfeer als gevolg van de hogere CO<sub>2</sub>-concentraties. Dit laatste speelt met name een rol in oligotrofe zachtwatersystemen.

## Chloride

- Klimaatverandering doet naar verwachting de chlorideconcentraties toenemen. Dit komt doordat: (1) de zoute kwel toe zal nemen; (2) de hoeveelheid ingelaten water vanuit de grote rivieren tijdens de voorspelde droge perioden toeneemt, terwijl de chlorideconcentratie in de rivieren dan erg hoog is; (3) de verdamping toe zal nemen waardoor de chlorideconcentratie (evenals die van andere elementen) toe zal nemen.
- Bij extreme buien kan de chlorideconcentratie periodiek sterk afnemen.

.....



*Het groeiseizoen van Grote waternavel start bij een warm voorjaar vroeger, wat tot een hogere bedekkingsgraad kan leiden*

---

## **H5 DE INVLOED VAN KLIMAATVERANDERING OP DE BIOLOGISCHE ASPECTEN VAN AQUATISCHE SYSTEMEN**

---

Iedere soort heeft specifieke condities waaronder ze het best groeit en zich het best voortplant. De concentraties van nutriënten en stoffen als chloride, maar ook de fysische omstandigheden spelen hierbij een belangrijke rol. De klimatologische omstandigheden zijn hierdoor sterk bepalend voor het voorkomen en de abundantie van soorten.

Ook de fenologie - de studie van jaarlijks terugkerende natuurverschijnselen, zoals de start van de voorjaarsalgenbloei [113, 114], het ontpoppen en uitvliegen van macrofauna [115] en het kuitschieten van vis [57, 116] - wordt beïnvloed door klimatologische omstandigheden. In dit hoofdstuk geven we een overzicht van de beschikbare kennis over de klimaatinvloed op verschillende groepen organismen.

## 5.1 FYTOPLANKTON

Klimaatverandering kan leiden tot een langer groeiseizoen met hierdoor in het voor- en najaar een hogere fytoplanktonbiomassa. Bij gelijkblijvende nutriëntenbelasting leiden hogere temperaturen niet automatisch tot een toename in fytoplankton zomerbiomassa. Bij hogere temperaturen en hogere nutriëntenbelastingen neemt het aandeel aan cyanobacteriën in het totale fytoplanktonbiovolume vaak toe. Hieronder lichten we dit kort toe.

### 5.1.1 Biomassa

De groeisnelheid en de soortensamenstelling van de fytoplanktongemeenschap hangen onder meer af van de aanwezige hoeveelheid nutriënten, van de aanwezige hoeveelheid licht en van de temperatuur. Klimaatverandering kan al deze factoren beïnvloeden. Zo beïnvloedt opwarming het fytoplanktonmetabolisme en klimaatgerelateerde veranderingen in nutriëntenbelastingen ([hoofdstuk 4](#)), de soortensamenstelling en de fytoplanktonbiomassa.

De invloed van hogere temperaturen op de totale fytoplanktonbiomassa is niet eenduidig. Afhankelijk van de omstandigheden kan opwarming leiden tot een hogere, een lagere of een gelijkblijvende fytoplanktonbiomassa (zie [box 4](#)).



---

**Box 4** **TEGENSTRIJDIGE TEMPERAATUURINVLOEDEN OP FYTOPLANKTONBIOMASSA**

De laatste jaren wordt er veel onderzoek gedaan naar de invloed van temperatuur op de fytoplanktonbiomassa, maar de uitkomsten hiervan zijn niet eenduidig. In sommige gevallen leiden hogere temperaturen tot hogere fytoplanktonbiomassa's. Hieraan kunnen ecologische of metabolische processen ten grondslag liggen.

Ecologisch gezien is de graasdruk van zoöplankton op fytoplankton van belang. Warme omstandigheden gaan vaak gepaard met een afname van de zoöplanktongrootte en -biomassa. Hierdoor wordt de graasdruk op fytoplankton kleiner en kan de fytoplanktonbiomassa toenemen. De lagere graasdruk onder warme omstandigheden is duidelijk waarneembaar wanneer meren in koude en warme klimaatzones of in warme en koude jaren met elkaar worden vergeleken.

Voor de Nederlandse situatie, met name in ondiepe meren, kan vooral de wintersituatie een belangrijke rol spelen. Lange strenge winters met ijsbedekking kunnen zuurstofloosheid in het water veroorzaken. Hierdoor sterven veel vissen. De vispredatie op zoöplankton vermindert hierdoor. Dat leidt ertoe dat het fytoplankton sterker wordt begraasd. Warmere winters met minder ijs, minder vissterfte en minder predatie van zoöplankton kunnen dus leiden tot een toename in de fytoplanktonbiomassa. Zie voor een schematische weergave [figuur 5.5](#).

Metabolisch gezien leiden hogere temperaturen tot een verhoogde enzymactiviteit waardoor fytoplankton mogelijk met dezelfde hoeveelheid beschikbare nutriënten hogere biomassa's kan behalen. Aan de andere kant kan de temperatuurinvloed op metabolistische processen ook een negatief effect hebben op de biomassa wanneer de respiratie sterker toeneemt dan de productie. Zie [paragraaf 2.3](#). Netto neemt de groei hierdoor af, waardoor de biomassa af kan nemen.

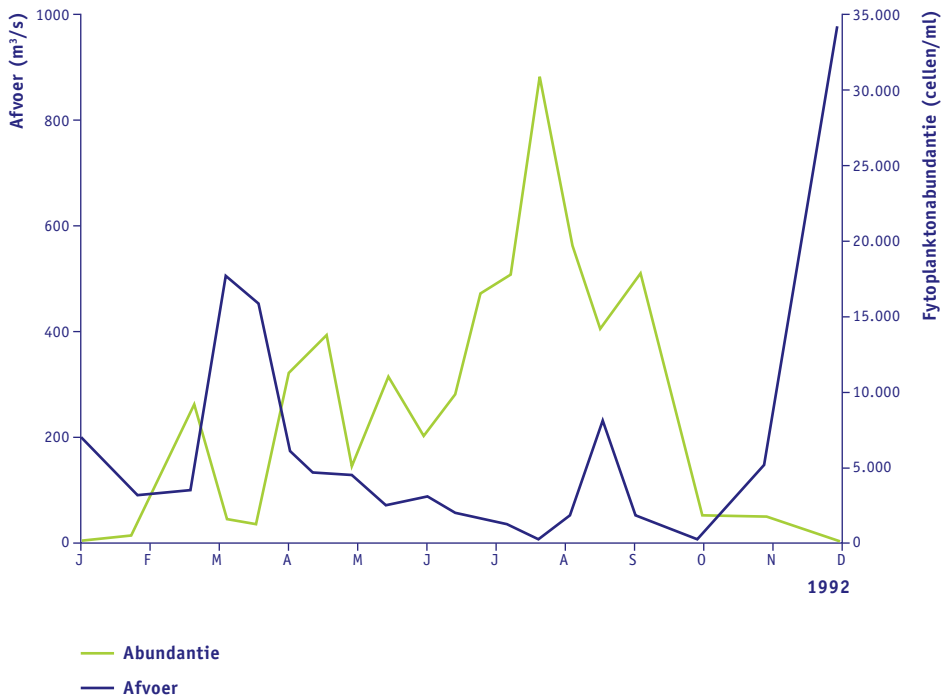
Opwarming kan dus zowel positieve als negatieve effecten hebben op de fytoplanktonbiomassa. Temperatuur heeft hierdoor mogelijk per saldo geen effect op de fytoplanktonbiomassa. De afwezigheid van een temperatuur-biomassarelatie kan ook worden verklaard uit het feit dat de fytoplanktongroei door andere factoren dan temperatuur kan worden gelimiteerd, bijvoorbeeld door nutriënten. Onder zulke omstandigheden speelt temperatuur een ondergeschikte rol. Mogelijk hierdoor wordt in verschillende veldstudies in meren en in mesocosmstudies geen relatie gevonden tussen fytoplanktonbiomassa en temperatuur. Het gaat hierbij dan om (maximale) zomerconcentraties, waarbij rekening is gehouden met de hoeveelheid nutriënten in het water.

Indirect heeft klimaatverandering wel een duidelijk effect op de fytoplanktonbiomassa via de toename van nutriëntenbelastingen (zie [hoofdstuk 4](#)) en via de invloed op de competitie tussen ondergedoken waterplanten en fytoplankton (zie [hoofdstuk 6](#)). Over het algemeen resulteren hogere nutriëntenbelastingen in hogere fytoplanktonbiomassa's. Zo trad in het eerder aangehaalde Duitse meer Müggelsee een intense algenbloei op na een hittegolf, waarbij er veel fosfor was vrijgekomen uit het sediment [64].

De klimaatinvloed op fytoplankton via de beschikbaarheid van nutriënten is ook duidelijk waarneembaar in stromende wateren. Bij lage afvoeren lopen de nutriëntenconcentraties sterk op, waardoor de fytoplanktonbiomassa fors toe kan nemen ([figuur 5.1](#)) [72].

**Fig 5.1 Fytoplanktonabundantie en rivierafvoer voor de Maas in 1992**

*(In de Rijn treedt een vergelijkbaar effect op [72]).*





---

Of een verhoging van de CO<sub>2</sub>-concentratie in de atmosfeer ook tot hogere fytoplanktonbiomassa's leidt, is sterk afhankelijk van het watersysteem. Veel wateren zijn onder de huidige omstandigheden al oververzadigd met CO<sub>2</sub> door de afbraak van organisch materiaal uit het stroomgebied. Naar verwachting zal als gevolg van klimaatverandering het aantal met CO<sub>2</sub>-oververzadigde wateren verder toenemen (zie [paragraaf 4.5](#)). In deze systemen zal een verhoging van de CO<sub>2</sub>-concentratie in de atmosfeer niet leiden tot hogere fytoplanktonbiomassa's [117]. In CO<sub>2</sub>-onderverzadigde wateren, waar koolstof de groei van algen beperkt, zou er echter wel een toename van de biomassa op kunnen treden [117].

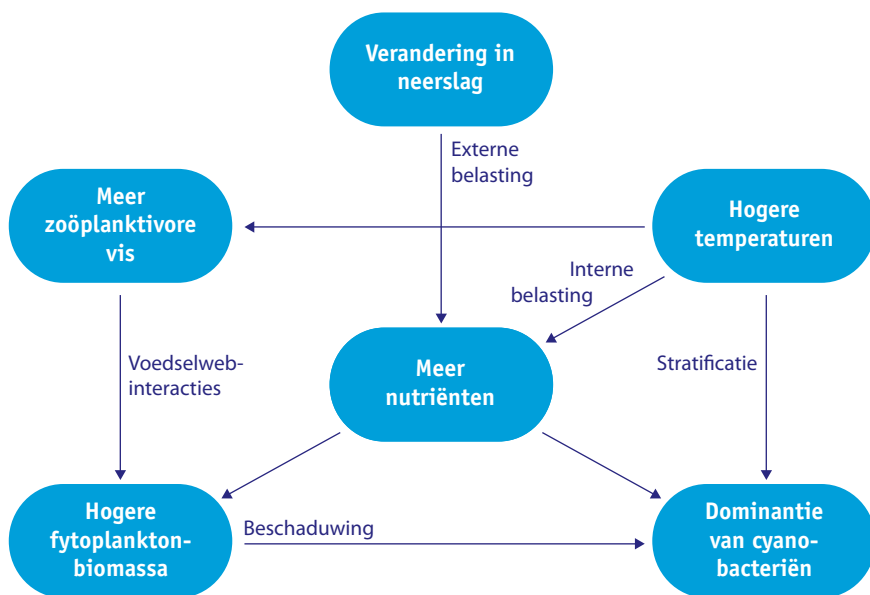
### 5.1.2 Soortensamenstelling

Klimaatverandering beïnvloedt de fytoplanktonsoortensamenstelling. Zo leiden hogere temperaturen vaak tot een groter aandeel van dinoflagellaten en lagere abundanties van diatomeeën en goudwieren (chrysofyten) [69]. De fytoplanktongroep die het meest in verband wordt gebracht met klimaatverandering, is echter die van de cyanobacteriën (blauwalgen) [69, 90, 118, 119]. Hogere temperaturen zijn om verschillende redenen gunstig voor cyanobacteriën ([figuur 5.2](#)). Zo groeien sommige cyanobacteriën beter bij hogere temperaturen dan veel soorten groenalgen of diatomeeën, waardoor ze een competitief voordeel hebben [120]. Dit verschil in optimale groeitemperatuur tussen cyanobacteriën en andere fytoplanktonsoorten gaat echter lang niet op voor alle soorten [121]. Een ander voordeel van hogere temperaturen werkt via de stratificatie van de waterkolom. Stratificatie werkt met name in het voordeel van cyanobacteriën die hun drijfvermogen kunnen reguleren, zoals *Microcystis sp.* Terwijl veel fytoplanktonsoorten tijdens de stratificatie naar het hypolimnion en ten slotte naar het sediment uitzakken, kunnen deze cyanobacteriën zich door hun gasblaasjes in het epilimnion handhaven [122]. Aan het wateroppervlak kunnen ze dikke drijfblagen vormen. Deze drijfblagen beschaduwen onderliggende, niet-drijvende fytoplanktonsoorten. Deze kunnen daardoor lichtgelimiteerd raken.

Onder lichtcondities waarbij veel fytoplanktonsoorten lichtgelimiteerd raken, kunnen bepaalde cyanobacteriën, zoals *Planktothrix agardhii*, juist goed groeien. Zij profiteren van de donkere omstandigheden die bijvoorbeeld gecreëerd worden door hoge fytoplanktonbiomassa's. Het aandeel cyanobacteriën is mede hierdoor niet alleen direct afhankelijk van de temperatuur, maar ook van de nutriëntconcentraties ([figuur 5.2](#)). Problemen met cyanobacteriën treden vooral op bij een combinatie van hoge nutriëntconcentraties en hoge temperaturen, omdat dan de biomassa het hoogst is [21, 122, 123].

**Fig 5.2** DOMINANTIE VAN CYANOBACTERIËN

Hogere temperaturen kunnen op verschillende manieren leiden tot een dominantie van cyanobacteriën [naar 21].



Hogere  $\text{CO}_2$ -concentraties kunnen de groei van cyanobacteriën versterken [117]. Dit komt met name door het verzurende effect van  $\text{CO}_2$ . Dit is sterk afhankelijk van de alkaliniteit van het watersysteem [124]. Wellicht zijn de hogere concentraties vooral gunstig voor niet-toxische cyanobacteriën. Dit is gebleken uit een competitie-experiment tussen twee stammen van de cyanobacterie *Microcystis aeruginosa*, waarbij de ene stam wel het toxine microcystine kon produceren en de andere niet. Bij hoge  $\text{CO}_2$ -concentraties groeide de stam die geen microcystines kon produceren, het best [200].

Veranderingen in de verhouding tussen de hoeveelheid beschikbaar koolstof en nutriënten kunnen invloed hebben op de toxinevarianten die geproduceerd worden. Zo blijkt uit laboratoriumproeven dat stikstofrijke varianten van microcystine vooral worden geproduceerd als er relatief veel stikstof beschikbaar is [125].

---

### 5.1.3 Fenologie

Er lijkt - zoals hiervoor beschreven - weinig verband te bestaan tussen de zomer-temperatuur en de fytoplanktonbiomassa in het veld. Dat is anders voor de winter. Warme wintertemperaturen lijken een positief effect te hebben op de winterfytoplanktonbiomassa's [22]. De positieve temperatuurinvloed op de biomassa in relatief koude perioden kan leiden tot een verlenging van het fytoplanktongroei-seizoen.

Zowel in diepe als ondiepe meren zijn langere groeiseizoenen in verband gebracht met warme omstandigheden. Met name in diepe meren speelt de langere stratificatieperiode (zie [hoofdstuk 2](#)) een belangrijke rol. Doordat de meren al vroeg in het jaar stratificeren, blijft het fytoplankton in de bovenste waterlaag circuleren en mengt het niet meer over de hele waterkolom. Hierdoor ontvangt het fytoplankton meer licht en komt de voorjaarsgroei vroeger op gang [126].

Het mogelijk interactieve effect van temperatuur en licht op het fytoplankton groeiseizoen komt ook naar voren in een studie in Friese meren. Hier treedt de voorjaarsbloei van fytoplankton eerder op in recente warme en lichte jaren. Tegelijkertijd treedt de najaarspiek later op, waardoor het groeiseizoen met wel enkele weken kan worden verlengd ([figuur 5.3](#)) [114].

## 5.2 ZOÖPLANKTON

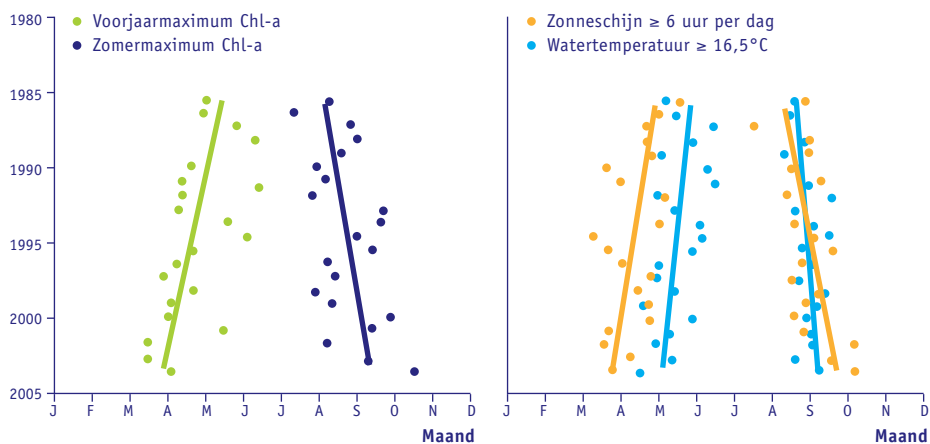
Klimaatverandering kan leiden tot een afname in de afmeting van zoöplankton-taxa en in de totale biomassa. Hierdoor neemt de graasdruk op fytoplankton af. Er zijn verder aanwijzingen voor een vervroeging van de helderwaterfase, maar veranderingen in nutriëntenvrachten interfereren met dit klimaateffect.

### 5.2.1 Biomassa

Evenals bij fytoplankton zijn er tegenstrijdige waarnemingen wat betreft de invloed van het klimaat op de zoöplanktongemeenschap. Veel zoöplanktononderzoek richt zich hierbij op de afname van de frequentie en de duur van de ijsbedekking van meren. Enerzijds blijkt uit onderzoek in het noorden van de Verenigde Staten dat minder ijs een positieve uitwerking heeft op zoöplanktondichtheden [127], anderzijds kan minder ijs nadelig uitpakken voor zoöplankton wanneer dit inhoudt dat er minder vaak wintersterfte van vis optreedt [10]. Meer vis betekent immers meer predatie op zoöplankton.

### Fig 5.3 TIMING VAN DE PIEKEN IN DE FYTOPLANKTONBIOMASSA

Timing van de pieken in de fytoplanktonbiomassa (uitgedrukt als chlorofyl-a) in zes Friese meren in 1985-2005 in combinatie met enkele abiotische omstandigheden. Links de datum van de jaarlijkse voorjaars- (groene stippen) en zomermaxima (blauwe stippen) van de fytoplanktonbiomassa. Rechts de datum waarop het 30-daags gemiddelde van het aantal uren zonneshijn per dag voor het eerst en voor het laatst de waarde van zes uur bereikt (oranje stippen) (bron: KNMI, weerstation Leeuwarden) en de datum waarop de gemiddelde watertemperatuur voor het eerst en voor het laatst de waarde van 16,5°C bereikt (lichtblauwe stippen). De bijbehorende lijnen geven de significante trends aan [114].



De gevolgen van warmere winters op de zoöplanktondichtheden zijn dus niet eenduidig. Uit onderzoek komt wel duidelijk naar voren dat de totale zoöplanktonbiomassa lager is en de zoöplanktontaxa over het algemeen kleiner zijn als het warm is. Dit blijkt zowel uit vergelijkingen tussen warme en koudere streken [3], als uit vergelijkingen tussen warme en koude jaren [10, 69]. De afname in zoöplanktongrootte is grotendeels het gevolg van een grotere predatiedruk van vissen op grote zoöplanktontaxa [128]. Het gevolg van de kleinere zoöplanktontaxa is dat de graasdruk op fytoplankton wordt verlaagd.

#### 5.2.2 Soortensamenstelling

De gevolgen van klimaatverandering voor de zoöplanktonsoorten zijn niet eenduidig. Het eerder genoemde onderzoek in het noorden van de Verenigde Staten vond

---

geen verband tussen soortensamenstelling en weersomstandigheden [127]. Een meta-analyse van Europese gegevens laat wel een verschuiving van de relatieve hoeveelheden van zoöplanktongroepen zien [129].

Naast mogelijk directe temperatureffecten op de soortensamenstelling speelt ook de voedselkwaliteit een rol. De door klimaatverandering gestimuleerde dominantie van cyanobacteriën is bijvoorbeeld ongunstig voor watervlooien (*Daphnia spp.*), onder meer doordat sommige soorten cyanobacteriën het filterapparaat van watervlooien kunnen verstoppert.

Zoals eerder vermeld is het wel zeer waarschijnlijk dat de zoöplanktontaxa kleiner worden als het warmer wordt. De verminderde graasdruk op fytoplankton die hiervan het gevolg is, is ongunstig voor de helderheid van het water en hierdoor voor de vestiging van ondergedoken waterplanten (zie [hoofdstuk 6](#)).

### 5.2.3 Fenologie

Verhogingen van de watertemperatuur in de lente, al dan niet in combinatie met veranderingen in de timing van dooi en thermische stratificatie, kunnen het groeiseizoen van zoöplankton beïnvloeden. Dit gebeurt niet voor alle soorten op dezelfde wijze en het is ook watersysteemafhankelijk. In het Duitse ondiepe eutrofe meer Müggelsee ontwikkelen copepoden zich bijvoorbeeld redelijk onafhankelijk van de voorjaarstemperatuur, terwijl watervlooien in een warm voorjaar wel een maand eerder opkomen [130]. In het diepe meer Lake Washington werd echter geen verband gevonden tussen voorjaarstemperatuur en *Daphnia* timing [131].

De helderwaterfase is een bekend verschijnsel dat in het voorjaar in oligo- tot mesotrofe wateren kan optreden [47, 132]. De tijdelijke toename van de helderheid wordt veroorzaakt doordat de zoöplanktonvoorjaarspiek het aanwezige fytoplankton grotendeels weggraast.

Verschuivingen in fenologie van zowel fytoplankton als van zoöplankton kunnen leiden tot een mismatch [131]. Een bekend voorbeeld van zo'n mismatch zijn vogels die hun eieren leggen als de rupsenpiek al voorbij is, waardoor ze hun belangrijkste voedselbron mislopen. Voor zoöplankton geldt iets vergelijkbaars: als goed eetbare fytoplanktonsoorten eerder pieken in aantal dan het zoöplankton, dan mist het zoöplankton zijn voedselbron (zie ook [box 7](#) op pagina 98).

---

Een eerdere ontwikkeling van het fytoplankton kan er mogelijk ook voor zorgen dat de fytoplanktonbiomassa al zo groot is op het moment van de zoöplanktonpiek, dat het fytoplankton niet meer volledig kan worden weggegraasd. Hierdoor zou de helderwaterfase kunnen verdwijnen [133].

De kans op het verdwijnen van de helderwaterfase is het grootst wanneer klimaatverandering gepaard gaat met een hogere nutriëntenbelasting [134, 135]. Wanneer er wel sprake blijft van een helderwaterfase, kan klimaatverandering de timing ervan beïnvloeden.

Veldwaarnemingen, mesocosmstudies en modellen wijzen op een mogelijke vroeging van de helderwaterfase met meer dan drie weken bij een temperatuurverhoging van vier graden Celsius, wat een iets grotere opwarming is dan waar het W+ scenario van uitgaat [56, 133, 136, 137].

### 5.3 FYTOBENTHOS

Voor de fyto benthosgemeenschap zijn licht, nutriënten, pH, zuurstof- en zoutgehalte [138] belangrijke stuurvariabelen. Doordat het klimaat van grote invloed is op deze variabelen (zie [hoofdstuk 4](#)), beïnvloedt klimaatverandering de fyto benthosgemeenschap.

Vanuit de paleolimnologie is er veel onderzoek gedaan naar lange-termijntrends in fyto benthos. Dit is in relatie gebracht met klimaatverandering. Uit sedimentboringen komt naar voren dat veranderingen in ijsbedekking een sterke invloed kunnen hebben op de soortensamenstelling ([box 3](#)).

Over de directe temperatuursafhankelijkheid van de fyto benthosgemeenschap in Nederlandse wateren is vrij weinig bekend [37]. Wel is duidelijk dat, met name in beken, een toename in duur en frequentie van droogval een verschuiving richting pioniersoorten veroorzaakt [37]. Daarnaast is een toename in de nutriëntenbelasting in beken in verband gebracht met een verschuiving richting grotere taxa en hogere biomassa's [139].

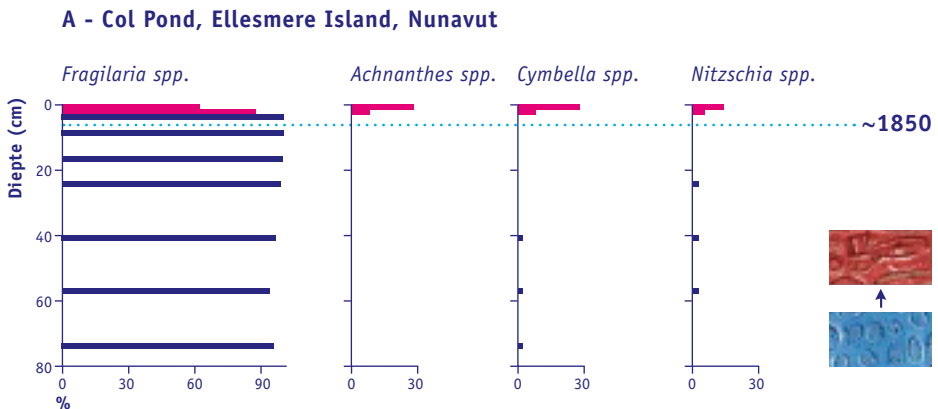
In stilstaande wateren kan vertroebeling van de waterkolom door extreme runoff of door een toename van de algengroei leiden tot lichtlimitatie en het mogelijk verdwijnen van fyto benthos.

**Box 5** **KLIMAATINVLOED OP DE FYTOBENTHOSGEMEENSCHAP: AANWIJZINGEN UIT DE PALEOLIMNOLOGIE**

Het sediment vormt het historisch archief van een watersysteem. Elk jaar wordt er een laagje materiaal afgezet met daarin overblijfselen van veel van de in het water levende organismen. Wanneer een sedimentboring laagje voor laagje wordt bestudeerd, kan dit informatie opleveren over veranderingen die hebben plaatsgevonden in bijvoorbeeld de diatomeeëngemeenschap. In de figuur hieronder zijn de belangrijke veranderingen in het voorkomen van verschillende soorten diatomeeën in twee verschillende Canadese meren weergegeven. In 'Col Pond' heeft een grote verandering in de soortensamenstelling plaatsgevonden na 1850. Uiteraard is het lastig dit direct toe te schrijven aan klimaatverandering, maar de onderzoekers linken deze verandering in soorten overtuigend aan een verminderde ijsbedekking. In 'Slipper Lake' is de toename van de diatomee *Cyclotella* in verband gebracht met de recente opwarming. De hogere temperaturen hebben ook hier tot een verminderde ijsbedekking geleid en mogelijk tot een toename in thermische stratificatie die vervolgens weer een verhoging van de fosforconcentratie tot gevolg kan hebben gehad.

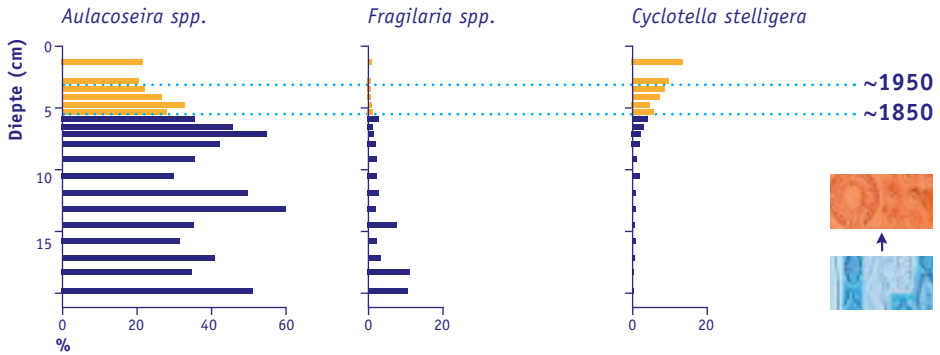
**Fig** **VERSCHILLENDE SOORTEN DIATOMEEËN IN SEDIMENTBORINGEN**

Veranderingen in het voorkomen van verschillende soorten diatomeeën in sedimentboringen in twee Canadese meren. De sterke verschuiving in soortensamenstelling rond 1850 is in verband gebracht met klimaatverandering.





## B - Slipper lake, Northwest Territories



### 5.4 MACROFAUNA

Klimaatverandering leidt tot een verandering in soortensamenstelling richting soorten die relatief ongevoelig zijn voor zuurstofarme condities. Piekafvoeren in stromende wateren kunnen leiden tot uitspoeling van macrofauna.

#### 5.4.1 Dichtheden

Macrofaunadichtheden kunnen sterk beïnvloed worden door de hydrologie en indirect mogelijk ook door een stijging van de temperatuur. Macrofaunagemeenschappen in beken en rivieren zijn over het algemeen goed bestand tegen jaarlijkse fluctuaties in afvoer [71]. Maar extremen (piekafvoeren, droogval) hebben wel een afname van de macrofaunataxa tot gevolg [37, 71, 140]. In meren wordt de macrofaunadichtheid sterk gereguleerd door de vispredatie [141-143]. Een aan hogere temperaturen gerelateerde verschuiving in de visgemeenschap richting planktivore en benthivore vis (zie [paragraaf 5.6](#)) kan dus negatieve gevolgen hebben voor de macrofaunadichtheden.

#### 5.4.2 Soortensamenstelling

Klimaatverandering kan de soortensamenstelling van macrofauna direct beïnvloeden via temperatuurveranderingen en via veranderingen in hydro(morfo)logie. Klimaatverandering kan de soortensamenstelling ook indirect beïnvloeden, namelijk via klimaatgerelateerde veranderingen in de bedekking met ondergedoken waterplanten.

---

Er is een groot aantal studies uitgevoerd naar het directe temperatureffect op macrofaunasamenstelling. De resultaten van deze studies lopen uiteen (zie [box 6](#)). Temperatuur kan de soortensamenstelling ook indirect beïnvloeden doordat hogere temperaturen kunnen leiden tot een lagere tolerantie voor andere stressfactoren zoals zuurstofloosheid [144]. Dit kan lokaal negatieve gevolgen hebben voor de macrofauna in de nabijheid van overstorten, wanneer deze tijdens hevige buien in warme zomers overstorten.

In stromende wateren hebben veranderingen in hydrologie waarschijnlijk een grotere invloed op de soortensamenstelling dan temperatuur [9]. Zo kan een verandering in afvoer de competitie tussen verschillende macrofaunasoorten

---

**Box 6** **TEGENSTRIJDIGE TEMPERAATUURINVLOEDEN OP MACROFAUNASOORTENSAMENSTELLING**

Er is veel onderzoek gedaan naar de invloed van temperatuur op de soortensamenstelling van macrofauna, maar de uitkomsten hiervan zijn niet eenduidig. De resultaten van studies in Nederland, Denemarken en Engeland geven aan dat er geen of slechts een gering effect van watertemperatuur is op de soortensamenstelling. Dit komt mogelijk doordat de meeste macrofaunafamilies in Europese rivieren een grote temperatuurtolerantie hebben. Een modelmatige studie, waarbij het klimaat wordt gekoppeld aan Europese ecoregio's, voorspelt ook dat de samenstelling van de macrofaunagemeenschap in Nederlandse beken grotendeels ongewijzigd zal blijven als gevolg van klimaatverandering. Desalniettemin zullen wel enkele soorten behorende tot de Chironomidae verdwijnen of in areaal afnemen en kunnen we enkele nieuwe soorten Tricladida (platwormen), Hydracarina (watermijten), Plecoptera (steenvliegen) en Coleoptera (kevers) verwachten.

Een uitgebreide studie naar macrofauna in Noord-Europese meren en rivieren duidde echter wel op een effect van temperatuur op de soortensamenstelling. Ook uit een studie in IJsland kwam een duidelijke temperatuurinvloed naar voren. Hier zijn (van nature) verwarmde beken vergeleken met koude beken. Opvallend was dat de verschillen in de macrofaunagemeenschap tussen koude en warme beken vergelijkbaar waren met die tussen oligotrofe en eutrofe beken; in zowel warme als eutrofe beken domineren slechts enkele taxa en is de productiviteit hoger. Experimenten waarbij extra nutriënten aan de beken werden toegevoegd, lieten verder zien dat de respons op de extra nutriënten sterker was bij hogere temperaturen. Dit komt sterk overeen met de door klimaatverandering versterkte eutrofiëringseffecten zoals die zijn beschreven voor meren (zie [hoofdstuk 6](#)).

beïnvloeden [145]. Uit analyses van de macrofaunagemeenschappen in beken in het extreem droge jaar 1976 komt naar voren dat in veel beken die in die zomer nog water voerden, een relatief groot aandeel soorten uit stilstaande wateren voorkwamen. De stroomminnende soorten waren daarentegen sterk in aantal verminderd. In drooggevallen beektrajecten verdwenen sommige soorten in het geheel. De gewone stroomminnende soorten keerden in 1977 weer terug, maar een aantal zeer zeldzame en kwetsbare soorten werd niet meer gevonden [146]. Hieruit valt af te leiden dat de door de KNMI'06 scenario's G+ en W+ voorspelde droge zomers een bedreiging vormen voor met name zeldzame stroomminnende macrofaunasoorten.

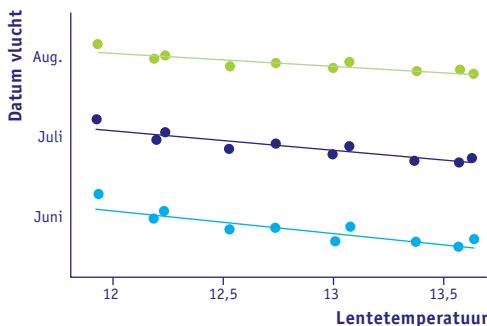
### 5.4.3 Fenologie

Over de invloed van klimaatverandering op de levenscycli en de fenologie van macrofauna is veel bekend. Afhankelijk van de soort, leidt opwarming tot hogere of lagere groeisnelheden. Ook kan hierdoor de afmeting van volwassenen kleiner worden, de fecunditeit (voortplantingscapaciteit) afnemen, de generatietijd verkorten, het uitvliegen vervroegen of de sexratio veranderen [37].

Een studie naar de timing van het uitvliegen van libellen (Odonata) in Nederlandse wateren laat bijvoorbeeld zien dat onder invloed van verhoogde lentetemperaturen (voorspeld in alle KNMI'06 scenario's, zie [tabel 2.1](#)) de libellen per graad temperatuurstijging gemiddeld ruim een week eerder uitvliegen ([figuur 5.4](#)) [147].

**Fig 5.4 RELATIE TUSSEN DE DATUM WAAROP LIBELLEN UITVLIEGEN EN LENTETEMPERATUUR**

*De donkerblauwe cirkels geven het jaargemiddelde aan van 37 libellensoorten, de groene en de donkerblauwe cirkels het 10 en 90 percentiel [147].*



---

## 5.5 WATERPLANTEN

Klimaatverandering kan de kans op hoge bedekkingen met ondergedoken waterplanten verkleinen. Zachtere winters (met minder ijs) veranderen verder de soortensamenstelling van waterplanten. Zo is er in kleine wateren een grotere kans op dominantie door drijvende planten. De karakteristieke waterplanten uit zachte wateren worden bedreigd door een stijging in CO<sub>2</sub>. Hieronder lichten we deze effecten kort toe.

### 5.5.1 Bedekking

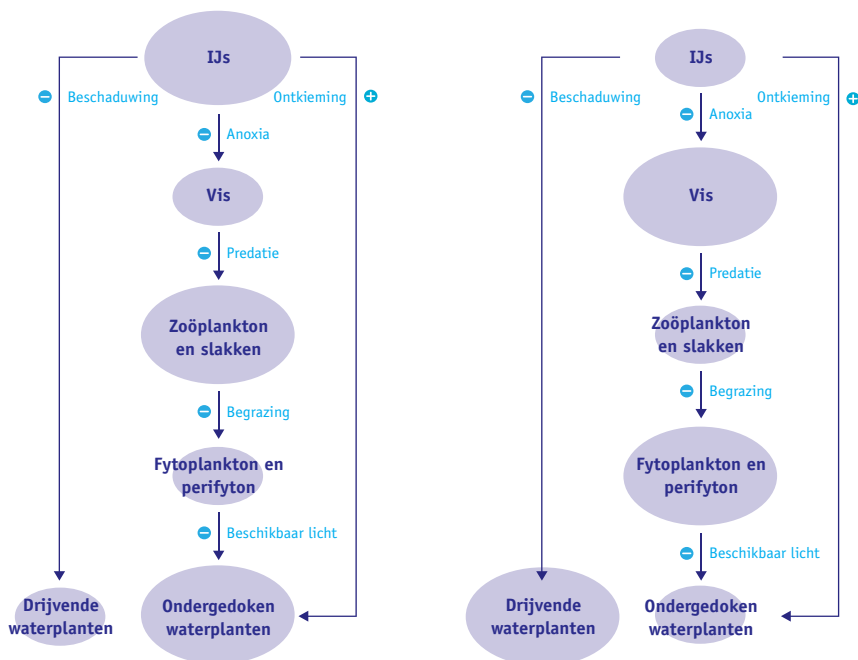
Temperatuur en hydrologie zijn belangrijke factoren voor de ontwikkeling en reproductie van waterplanten. Vooral de winter- en de voorjaarstemperatuur zijn van belang voor het areaal dat begroeit raakt met waterplanten. Warmere winters kunnen leiden tot minder graasdruk door zoöplankton op fytoplankton (zie [paragraaf 5.2](#)) en door slakken op perifyton. Dit vermindert de hoeveelheid beschikbaar licht, hetgeen ongunstig is voor veel ondergedoken waterplanten [148].

De visgemeenschap speelt hierbij een belangrijke rol (zie [figuur 5.5](#)). Benthivore vissen kunnen de bedekking van ondergedoken waterplanten ook negatief beïnvloeden wanneer ze onder warmere omstandigheden door het omwoelen van de bodem planten ontwortelen en voor extra vertroebeling van het water zorgen. Door een combinatie van deze factoren kunnen ondiepe wateren die door klimaatverandering hun (langdurige) ijsbedekking verliezen, mogelijk minder hoge nutriëntenvrachten verdragen en sneller omslaan van een ondergedoken-waterplantengedomineerd systeem naar een fytoplanktongedomineerd systeem. Omgekeerd houdt dit in dat nutriëntenvrachten in meren die hun ijsbedekking verliezen, mogelijk verder moeten worden teruggebracht om van een fytoplanktongedomineerd systeem naar een waterplantengedomineerd systeem te gaan [149] (zie ook [hoofdstuk 6 en 7](#)).

Ook voorjaarstemperaturen spelen een rol. Uit vergelijkingen van de vegetatiebedekking in Nederlandse meren in koude en warme voorjaren weten we dat een warm voorjaar tot hogere bedekkingen kan leiden [150]. Hoge voorjaarstemperaturen zijn ook in verband gebracht met hogere biomassa's en groei tot op grotere dieptes [151]. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat waterplanten onder warme omstandigheden in relatief donkere omstandigheden lijken te kunnen groeien [152].

### Fig 5.5 INVLOED VAN STRENGE WINTERS OP WATERPLANTEN

Schematische weergave van de invloed van strenge winters op waterplanten via het voedselweb in systemen waar langdurige ijsbedekking tot een gebrek aan zuurstof (anoxia) leidt. Links de situatie met langdurige ijsbedekking en rechts zonder. De grootte van de cirkels is een maat voor de biomassa.



Naast veranderingen in temperatuur, hebben veranderingen in neerslag en verdamping invloed op waterplanten. Wanneer een neerslagtekort niet wordt gecompenseerd, leidt dit tot fluctuaties in het waterpeil. Verlaging van het waterpeil tijdens het groeiseizoen kan gunstig zijn voor ondergedoken waterplanten, doordat ze dichterbij het wateroppervlak meer licht vangen [153]. In meren met een natuurlijk peilverloop kan het waterpeil hierdoor de belangrijkste verklarende factor zijn voor de jaarlijkse variatie in bedekking [154]. Ook tijdelijke volledige droogval kan gunstig zijn voor waterplanten, doordat het de visstand omlaag brengt en doordat het, afhankelijk van de sedimentkarakteristieken, de interne nutriëntenbelasting terug kan brengen (zie [hoofdstuk 7](#)).

---

Er zijn voor Nederland verschillende voorbeelden bekend van het positieve effect van droogval in plassen in uiterwaarden [155] en in vennen [156]. Voor vennen voorkomt tijdelijke oxidatie van de bodem de ophoping van organisch materiaal. Hierdoor blijft voor deze van nature koolstofgelimiteerde voedselarme systemen de kooldioxide- en nutriëntenbeschikbaarheid ook op langere termijn laag [156, 157]. Daarnaast kiemen de zaden van veel van de voor dit soort vennen typerende isoetide soorten uitsluitend na een periode van droogval.

In het geval van zure bodems (deze kwamen vroeger veelvuldig voor in vennen, maar ook nu nog in sommige gebieden met zwavelhoudende zeeklei) kan droogval voor extra verzuring en een toename van de nutriëntenconcentraties zorgen. Dit is terug te zien in de soortensamenstelling van de planten [146]. Een ander negatief effect van droge perioden is de extra nutriëntenbelasting vanuit het terrestrische systeem, veroorzaakt door veenmineralisatie. Het in [paragraaf 4.2](#) genoemde Botshol is hiervan een goed voorbeeld. Natte winters na droge perioden zorgen daar voor hoge nutriëntenvrachten naar het oppervlaktewater, wat in het voorjaar en de zomer tot hoge fytoplanktonconcentraties en een lage bedekking met ondergedoken waterplanten leidt [87]. De langere droge perioden die de KNMI'06 scenario's voorspellen kunnen dus afhankelijk van het systeem zowel negatief als positief uitpakken voor waterplanten. Negatieve effecten zijn vooral te verwachten in wateren waar de externe nutriëntenbelasting vanuit het veen een belangrijke rol speelt. Positieve effecten in koolstofgelimiteerde, voedselarme systemen waarvoor met name de interne nutriëntenbelasting van belang is.

In stromende wateren heeft de hydrologie ook een sterke invloed op de vegetatie. Hoge afvoeren tijdens het groeiseizoen kunnen de waterplanten beschadigen, maar anderzijds kunnen hoge afvoeren tijdens de wintermaanden ook geschikte habitats creëren [158].

Concluderend: evenals voor de eerder besproken groepen organismen geldt voor waterplanten dat klimaatverandering tegenstrijdige effecten heeft. Mogelijk is dit er de oorzaak van dat de bedekking met waterplanten moeilijker is te voorspellen wanneer het warmer wordt; terwijl we op dit moment in Nederland op basis van nutriëntenconcentraties en morfologie nog redelijk kunnen voorspellen wat de waterplantenbedekking van een ondiep meer is, is dit in warme klimaten veel minder het geval [149]. Wanneer door klimaatverandering ook in Nederland de

---

voorspelbaarheid zal dalen, bemoeilijkt dit het bepalen van de succeskans van maatregelen die genomen worden om de waterplantenbedekking te verhogen. Het inschatten van de succeskans wordt nog verder bemoeilijkt, doordat klimaatverandering mogelijk de competitie beïnvloedt tussen ondergedoken waterplanten enerzijds en drijvende waterplanten en fytoplankton anderzijds en hierdoor ook de kritische nutriëntenbelasting [152].

### 5.5.2 Soortensamenstelling

Veranderingen in temperatuur beïnvloeden niet alleen de waterplantenbedekking, maar ook de waterplantensamenstelling [159]. Ook hier zijn de winterse omstandigheden van belang. Waterplanten hebben verschillende overwinteringsstrategieën. Ze kunnen overwinteren in het sediment in de vorm van zaden, wortelknolletjes (tubers) of winterknoppen (turionen). Sommige meerjarige waterplanten kunnen als plant in de waterkolom of op het wateroppervlak overwinteren. Zachtere winters zijn gunstig voor deze laatste groep omdat ze door ijs beschadigd kunnen raken, wat nadelige gevolgen kan hebben voor hun groei in de daaropvolgende zomer [160].

Onderzoek naar de invloed van winterse omstandigheden op de waterplantenbedekking in de zomer in Nederlandse sloten laat zien dat drijvende waterplanten, zoals kroos, en groen overwinterende ondergedoken waterplanten, zoals *Elodea spp.*, het meest profiteren van zachte winters [42]. Tijdens zachte winters kunnen ze relatief hoge bedekkingen houden en soms zelf een lichte groei vertonen [25]. Doordat ze in het voorjaar al aanwezig zijn hebben ze bovendien een competitief voordeel ten opzichte van de in het sediment overwinterende soorten. Deze hebben wellicht hierdoor relatief lage bedekkingen na zachte winters, zoals verschillende *Potamogeton* soorten [42].

Zachte winters kunnen ook op een andere manier nadelig zijn voor in het sediment overwinterende soorten. Voor de kieming van de wortelknolletjes van bijvoorbeeld Schedefonteinkruid (*Potamogeton pectinatus*) speelt kou-inductie (blootstelling aan water van 4°C of kouder gedurende minimaal acht weken) een belangrijke rol. Na kou-inductie kiemen de wortelknolletjes eerder in het voorjaar bij lagere temperaturen dan zonder kou-inductie [161]. Alhoewel er ook hier onzekerheden zijn, is de verwachting dat de toekomstige warmere winters (alle KNMI'06 scenario's, [tabel 2.1](#)) over het algemeen positief uitpakken voor drijvende waterplanten en waterplanten die groen overwinteren en negatief voor in het sediment overwinterende planten.



---

De invloed van verhoogde atmosferische CO<sub>2</sub>-concentraties op de soortensamenstelling van waterplanten, hangt sterk af van het type water. Veruit de meeste wateren zijn sterk oververzadigd met CO<sub>2</sub> ten opzicht van de atmosfeer (zie [paragraaf 4.5](#)). Een verhoogde atmosferische CO<sub>2</sub>-concentratie heeft in deze systemen relatief weinig invloed op de CO<sub>2</sub>-concentratie in het water. Wel kan er in deze CO<sub>2</sub>-oververzadigde wateren overdag koolstoflimitatie optreden in dichte onderwatervegetaties [162]. Verhoging van de atmosferische CO<sub>2</sub>-concentraties zou in deze gevallen kunnen leiden tot een sterkere groei.

Vaak zijn de waterplanten, als ze in grote dichtheden voorkomen, echter ook gelimiteerd door licht. Dit vermindert het effect van extra anorganisch koolstof sterk [163]. Modelsimulaties geven aan dat extra atmosferisch CO<sub>2</sub> alleen onder specifieke condities zal leiden tot een toename van de waterplanten- en algengroei. Met name in eutrofe systemen die koolstofgelimiteerd zijn door een lage gemeenschapsrespiratie en lage lucht-wateruitwisseling [164]. In ondiepe systemen, waar waterplanten het vaakst voorkomen, wordt echter niet vaak aan deze voorwaarden voldaan, doordat er in mesotrofe en eutrofe systemen vaak veel anorganisch koolstof vrijkomt uit mineraliserend sediment.

Alhoewel de invloed van verhoogde CO<sub>2</sub>-concentraties in de atmosfeer dus over het algemeen beperkt is, geldt dit niet voor wateren die van nature CO<sub>2</sub>-arm zijn: de zeer zachte wateren. In deze vaak hooggewaardeerde wateren zorgt extra CO<sub>2</sub> voor een ongunstige verschuiving in de plantengemeenschap [165]. De karakteristieke vegetatie in deze meren bestaat uit planten met een uitgebreid wortelstelsel en korte bladeren zoals de biesvaren *Isoetes lacustris*, het oeverkruid *Littorella uniflora* en de waterlobelia *Lobelia dortmanna*. Bij hogere CO<sub>2</sub>-concentraties kunnen deze planten verdrongen worden door soorten die beter kunnen profiteren van de hogere CO<sub>2</sub>-beschikbaarheid in de waterlaag, zoals Kransverderkruid (*Myriophyllum verticillatum*).

In kleine systemen zal een verhoging van de atmosferische CO<sub>2</sub>-concentratie mogelijk vooral leiden tot een (versterkte) ontwikkeling van drijvende planten, zoals kroos, azolla of flab (*floating algal beds*). Vanwege hun positie op het wateroppervlak of bovenin de waterkolom kunnen zij optimaal profiteren van hogere CO<sub>2</sub>-concentraties [166].

---

### 5.5.3 Fenologie

In vergelijking tot andere soortgroepen is er relatief weinig gepubliceerd over fenologische veranderingen in waterplanten als gevolg van veranderingen in klimaat. Experimenteel onderzoek toont aan dat temperatuurverhoging een positieve invloed heeft op de groei van waterplanten [25, 167]. De warmere voorjaaren, waar de KNMI'06 scenario's op wijzen, kunnen hierdoor mogelijk vroegere voorjaarsgroei van waterplanten veroorzaken. De voorjaarsgroei hangt echter ook sterk samen met de lichtintensiteit. Doordat deze zelf weer beïnvloed wordt door fytoplanktonconcentraties, hangt de voorjaarsgroei nauw samen met de fenologie van fytoplankton [168].

Opwarming kan naast een versterkte groei ook een verkorting van de groeicyclus van bepaalde waterplanten veroorzaken [25, 167]. Wanneer de waterplanten al in de zomer afsterven, heeft dit tot gevolg dat er mogelijk alsnog een sterke fytoplanktongroei of kroosontwikkeling optreedt.

## 5.6 VIS

Klimaatverandering kan direct en indirect een sterk effect hebben op de samenstelling van de visgemeenschap, de levenscyclus van vissen, de winter- en zomersterfte, de voedselvoorkeur en zelfs op het gedrag. Doordat vis een grote invloed heeft op andere biota en op de elementencycli, heeft dit potentieel ook grote gevolgen voor het functioneren van het ecosysteem (zie ook [figuur 5.5](#), [box 5](#) en [hoofdstuk 6](#)).

Vaststaat dat klimaatverandering kan leiden tot een soortenverschuiving, waarbij koud stenotherme soorten verdwijnen en de dichtheden bentische vis toenemen. Hogere temperaturen leiden bovendien tot een langere paaitijd. Hierdoor zijn er langere tijd kleine vissen aanwezig die vaak sterk prederen op zoöplankton. Hieronder lichten we de effecten kort toe.

### 5.6.1 Dichtheden

Het ligt voor de hand dat het (tijdelijk) droogvallen van wateren - een mogelijk gevolg van klimaatverandering - invloed heeft op de visdichtheid. Verder heeft de watertemperatuur invloed op de dichtheid. Deze is het duidelijkst wanneer er tijdens een lange ijsperiode vissterfte optreedt. Deze vissterfte wordt veroorzaakt doordat er zuurstofloosheid optreedt. Onder het ijs wordt, vooral in eutrofe

---

wateren, zuurstof gebruikt in afbraakprocessen, terwijl het ijs de aanvulling met atmosferisch zuurstof blokkeert. Wanneer het ijs met sneeuw bedekt is, is de zuurstofafname in het water het snelst omdat er onder de donkere omstandigheden geen fotosynthese plaats kan vinden.

Door de verbetering van de waterkwaliteit is de wintervissterfte in Nederland tegenwoordig sterk verminderd ten opzicht van enkele decennia geleden. In de meeste gevallen (locatie / gebeurtenis) ging het, voor zover bekend, om slechts enkele tientallen tot honderden vissen (persoonlijke mededeling Theo Claassen). Door de voorspelde warmere winters ([tabel 1](#)) en de hiermee gepaard gaande afname in de frequentie en de duur van de ijsbedekking, zal de wintervissterfte naar verwachting nog verder afnemen.

De vissterfte in de zomer zal door klimaatverandering mogelijk toenemen doordat extreem hoge zomertemperaturen in stilstaande eutrofe wateren tot zuurstofloosheid kunnen leiden. Alhoewel recente warme zomers in de meeste wateren, voor zover bekend, maar fataal werden voor enkele tientallen tot honderden vissen (persoonlijke mededeling Theo Claassen), zijn er ook voorbeelden van vissterfte op grotere schaal. Zo trad in de diepe kolk Westerveld in 2005 na een warme zomer massale vissterfte op. De duur van de stratificatie en de dikte van het zuurstofloze hypolimnion speelden hierbij een belangrijke rol (zie [paragraaf 3.1 en 4.1](#)). Door de warme zomer en het warme najaar in combinatie met weinig wind was het zuurstofrijke epilimnion dun geworden. Na enkele koude nachten koelde het epilimnion snel af waardoor de stratificatie werd opgeheven en het epilimnion mengde met het hypolimnion. Hierdoor werd de hele waterkolom zuurstofloos waardoor de vissen dood gingen [169]. Ook in grote delen van de Nederlandse grote rivieren neemt de kans op zuurstofloosheid en mogelijke vissterfte toe met klimaatverandering (zie [paragraaf 4.1](#)).

De crux is dat bij hogere temperaturen niet alleen de zuurstofconcentraties dalen, maar dat vissen bij hogere temperaturen ook nog eens meer zuurstof nodig hebben. Een toename van de vissterfte bij hoge temperaturen komt dan ook meestal door een zuurstoftekort en niet door directe temperatuurgerelateerde stress [25].

Overigens kan temperatuur ook op andere manieren de visdichtheid beïnvloeden. Zo blijkt uit aquariumexperimenten dat stekelbaarsmannetjes (*Gasterosteus acule-*

---

atus) bij hoge temperaturen minder goed voor hun kroost zorgen dan bij lagere temperaturen. Ook is bij hogere temperaturen de kans op sterfte als gevolg van pathogenen zoals botulisme hoger. Aanwijzingen voor de temperatuurinvloed op de gezondheid van de vis komen van studies die warme locaties nabij koelwaterlozingen vergelijken met koelere locaties. In het warmere water werden meer bacteriële infecties aan huid en vinnen en meer parasitaire wormen gevonden dan in het koelere water [4]. In de Nederlandse beken [37] en geïsoleerde plassen [170] speelt vooral tijdelijke droogval een belangrijke rol.

Hogere voorjaarstemperaturen kunnen bij sommige soorten ook leiden tot een grotere overlevingskans voor jonge vis. Een Deense studie, gebaseerd op een vergelijking van warme en koude jaren (mei-juli), toont aan dat Brasem (*Abramis brama*) en Baars (*Perca fluviatilis*) sterk positief reageren op hogere temperaturen, terwijl de Blankvoornpopulatie (*Rutilus rutilus*) niet reageert [171].

Klimaatverandering kan ook de lokale dichtheden van vissen beïnvloeden. Wanneer een hoge zomertemperatuur leidt tot lage zuurstofconcentraties of zuurstofloosheid in het hypolimnion, wijken vissen in geïsoleerde wateren uit naar het litoraal en het epilimnion [172]. Indien mogelijk zullen ze migreren naar andere zuurstofrijkere wateren. Verschillende studies laten ook zien dat vissen in warme regio's vaker tussen de planten zitten dan in gematigde streken. Mogelijk is dit een gevolg van de gemiddeld kleinere afmetingen van de vis waardoor ze zich om predatie te voorkomen verschuilen tussen de planten [171].

### 5.6.2 Soortensamenstelling

Vissen zijn ectothermen. Dat wil zeggen: ze kunnen hun temperatuur fysiologisch niet regelen. Wel kunnen ze naar warmere of koudere plaatsen zwemmen. Er zijn stenotherme soorten, soorten met een nauwe temperatuurgrens zoals de Kwabaal (*Lota lota*), en eurytherme soorten, soorten die tolerant zijn voor een wijde temperatuursrange. Hiervan is de Europese karper (*Cyprinus carpio*) een voorbeeld.

Klimaatverandering kan net als bij andere biota zorgen voor zowel areaaluitbreiding als -inkrimping, waarbij soorten indien mogelijk noordwaarts zullen trekken [171, 173, 174]. Koud-stenotherme soorten, zoals de eerder genoemde Kwabaal, Spiering (*Osmerus eperlanus*), Winde (*Leuciscus idus*) en Serpeling (*Leuciscus leuciscus*) die lage temperaturen nodig hebben voor de voortplanting [175], zullen lokaal mo-

---

gelijk uitsterven en, indien mogelijk, hun leefgebied verleggen. Een andere soort die kwetsbaar is voor klimaatverandering, is het Bermpje (*Barbatula barbatula*), een karakteristieke vissoort voor beken [146].

De verandering in levensgemeenschappen door de verschuiving van leefgebieden, kan worden versterkt doordat verandering in temperatuur ook de competitie tussen vissen kan beïnvloeden. Dit blijkt bijvoorbeeld uit experimenten met Blankvoorn (*Rutilus rutilus*) en Baars (*Perca fluviatilis*). Hoewel beide soorten het bij hoge temperaturen afzonderlijk goed doen, lijkt Blankvoorn competitief het sterkst bij hogere temperaturen [176]. Doordat klimaatverandering tevens eutrofiëringseffecten versterkt (zie [hoofdstuk 6](#)), is ook een verschuiving van Zalmachtigen naar Baarsachtigen en van Baarsachtigen naar Karperachtigen aannemelijk [177-179]. Voor Nederlandse wateren wordt verwacht dat de klimaatverandering tot een toename in het aandeel van benthivore vis zal leiden [38].

Ten slotte: als gevolg van veranderingen in soortensamenstelling, fenotypische plasticiteit en mogelijk zelfs evolutionaire aanpassingen zullen hoogstwaarschijnlijk ook veranderingen in voedselvoorkeuren optreden [171]. Uit temperatuurexperimenten [180] en uit vergelijkingen tussen klimaatzones (Lacerot en Mazzeo nog niet gepubliceerd) komt naar voren dat vissoorten in warmer water vaker omnivoor en minder vaak piscivoor zijn dan in koude wateren.

### 5.6.3 Fenologie

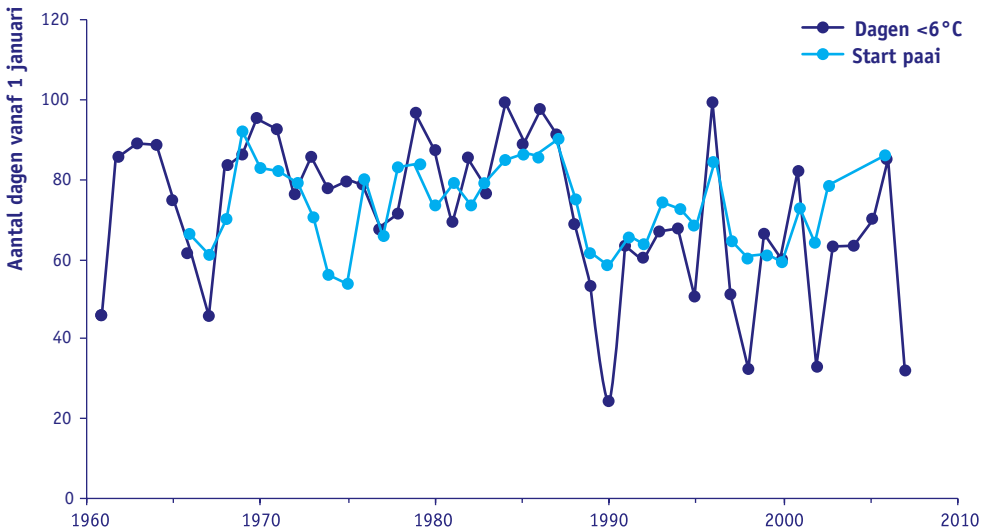
Klimaatverandering grijpt op verschillende manieren in op de levenscyclus van vissen. Zo zijn vissen in warmere wateren vaak kleiner, reproduceren ze eerder in het jaar en leven ze korter. Studies van Blankvoorn in verschillende klimaatzones laten zien dat vissen in warmere gebieden een hogere groeisnelheid hebben en sneller volwassen zijn [116]. De keerzijde van de medaille is wel dat het vaak gepaard gaat met een kortere levensduur, waardoor het voortplantingssucces weer wordt gereduceerd.

Temperatuurstijging kan ook een verlenging van de voortplantingsperiode tot gevolg hebben. Studies waarbij Europese en Turkse meren worden vergeleken, laten zien dat alle Blankvoorn (*Rutilus rutilus*) in koude meren binnen één week paait terwijl de paaiperiode in warme meren wel twee maanden kan duren [116]. Onderzoek in Nederland en in het buitenland toont aan dat onder warme omstandighe-

den het kuitschieten tot wel drie weken eerder kan beginnen dan gemiddeld [57, 181] (zie ook [figuur 6.3](#)). Een langere periode met jonge vis, die vaak planktivoor is, heeft ook tot gevolg dat er langduriger intensief op zoöplankton wordt ge graasd. Dit vermindert de *top-down* controle op fytoplankton [171].

**Fig 5.6 VERBAND VOORJAARSWATERTEMPERATUUR EN PAAIDATUM SPIERING**

Verloop van het aantal dagen in het voorjaar vanaf 1 januari met een berekende etmaalgemiddelde watertemperatuur onder de 6°C en de mediane paaidatum van Spiering in het IJsselmeer (IMARES, IJmuiden). In warme jaren (weinig dagen <6°C) paait de Spiering eerder [57].



## 5.7 EXOTEN

Klimaatverandering is vaak niet de belangrijkste factor bij de immigratie van nieuwe soorten. Wel kan het de abundantie van exoten sterk beïnvloeden waarbij zachtere winters tot hogere abundanties leiden. Hieronder een korte toelichting.

In de literatuur worden verschillende definities voor 'exoten' gebruikt. Het verschil zit vooral in het feit of een soort door menselijk handelen wordt geïntro-

---

duceerd of ergens op eigen kracht arriveert. Als een soort door klimatologische veranderingen op eigen kracht zijn areaal uitbreidt of verschuift en zich hierdoor in Nederland vestigt, hangt het af van de gebruikte definitie of deze wel of niet als exoot wordt gezien. Hier gebruiken we een ruime definitie en verstaan we onder exoten die soorten die arriveren in Nederland, zich handhaven en verspreiden [afgeleid van 182].

Klimaatverandering, met name hogere temperaturen, kan op twee manieren een rol spelen bij de blijvende vestiging van exoten [183]:

- 1 Klimaatverandering kan een uitbreiding of een verschuiving van het areaal van een soort tot gevolg hebben. In dit geval arriveert de soort op eigen kracht. Het is één van de manieren waarop organismen zich aanpassen aan een veranderend klimaat.
- 2 Klimaatverandering kan de blijvende vestiging van een soort faciliteren nadat de soort door menselijk toedoen, hetzij opzettelijk hetzij per ongeluk, is gearriveerd.

Alhoewel er uit het buitenland voorbeelden bekend zijn van areaalverschuivingen als gevolg van klimaatverandering [174], lijkt het grootste deel van de Nederlandse exoten zich hier door menselijke introductie te hebben gevestigd. Zo komen de meeste waterplanten-exoten oorspronkelijk uit andere continenten ([figuur 5.7](#)). Er was menselijk transport nodig voor de introductie, bijvoorbeeld de vijver- of aquariahandel.

Om deze introductieroute van waterplanten zoveel mogelijk te beperken, werd in februari 2010 een convenant gesloten tussen het toenmalige Ministerie van LNV, de Unie van Waterschappen en de waterplantensector. Hierin werd afgesproken dat een bepaalde groep waterplanten zoals Watercrassula (*Crassula helmsii*) en Hydrilla (*Hydrilla verticillata*) niet meer wordt geleverd aan consumenten en dat een andere groep waterplanten, zoals de Waterwaaier (*Cabomba caroliniana*) en de Waterhyacinth (*Eihornia crassipes*), uitsluitend wordt verhandeld 'met aanvullende informatie over de omstandigheden waarin deze soorten veilig gebruikt kunnen worden' [184]. Voor de verkoop van Grote waternavel (*Hydrocotyle ranunculoides*) geldt een wettelijk verbod via de Flora- en faunawet.



---

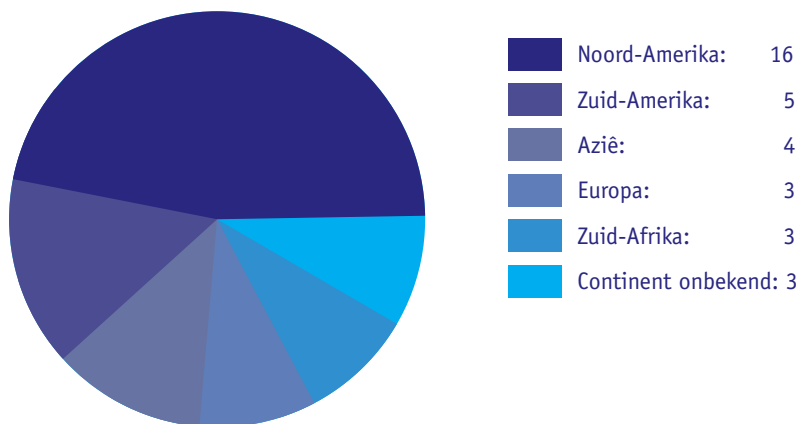
Een berucht voorbeeld van een vissoort die via de vijverhandel in de Nederlandse oppervlaktewateren terecht is gekomen, is de Zonnebaars (*Lepomis gibbosus*). Naast de vijverhandel is de in 1992 ontstane verbinding tussen het stroomgebied van de Rijn en de Donau (het Main-Donaukanaal) ook een belangrijke aanvoerrote van exoten [185]. Door dit kanaal zijn onder andere de Donaubrasem (*Ballerus sapa*), de Blauwband (*Pseudorasbora parva*) en de Roofblei (*Aspius aspius*) in Nederland gekomen [185]. Via dezelfde weg zijn ook veel macrofaunasoorten Nederland binnengekomen [183, 186]. Bekende voorbeelden zijn de kreeftachtigen *Dikerogammarus haemobaphes* en *D. villosus* [186].

Een ander bekend voorbeeld van een door menselijk handelen geïntroduceerde exoot is de rode Amerikaanse rivierkreeft (*Procambarus clarkii*). Hoewel temperatuur een belangrijke rol speelt in de activiteit van deze rivierkreeft [187], kan hij ook onder relatief koude omstandigheden voorkomen. Bijvoorbeeld in koude meren in de bergen in Abruzzo, Italië [188]. Het succes van de soort in Nederland is dus niet direct te koppelen aan reeds opgetreden klimaatverandering.

In andere gevallen is klimaatverandering mogelijk wel van belang bij het succes van de vestiging. Strenge winters kunnen fataal zijn voor sommige exoten, waardoor ze zich niet succesvol kunnen vestigen. Zo sterven de veel verkochte waterplant-exoten Watersla (*Pistia stratiotes*) en Waterhyacint (*Eichhornia crassipes*) in Nederland 's winters af en vormen mede hierdoor geen probleem in Nederlandse oppervlaktewateren. Wanneer de winters warmer worden, zou dit kunnen veranderen.

Voor andere bekende waterplant-exoten, zoals de Grote waternavel (*Hydrocotyle ranunculoides*) en ook de Waterwaaier (*Cabomba caroliniana*), is het warmer worden van de winters van minder groot belang. Zij overleven ook strenge lange winters. Wel komen ze na warmere winters eerder in het voorjaar op gang (persoonlijke communicatie R. Pot en R.M.M Roijackers). De klimaatscenario's (tabel 2.1) wijzen allemaal op warmere winters, wat voor de verspreiding en de bedekkingsgraad van deze exoten dus gunstig uit kan pakken. Dit is ook voor Parelvederkruid (*Myriophyllum aquaticum*) het geval. Die komt al tientallen jaren voor in Nederland en lijkt alleen een probleem te worden na meerdere zachte winters (persoonlijke communicatie R. Pot).

Fig 5.7 GEOGRAFISCHE HERKOMST VAN 34 EXOTISCHE WATERPLANTEN IN NEDERLAND [183]



In het geval van fytoplankton, waarbij het vaak lastig is om te reconstrueren of er een verband bestaat tussen immigratie en klimaatverandering, speelt klimaatverandering mogelijk ook een rol bij de vestiging van exoten. Zo zijn warme zomers en langere perioden van thermische stratificatie in verband gebracht met de invasie van de subtropische cyanobacterie *Cylindrospermopsis raciborskii* [119, 129, 189]. Warme omstandigheden zijn op zichzelf waarschijnlijk niet voldoende om een succesvolle vestiging van exoten te bewerkstelligen. Alhoewel de precieze mechanismen niet bekend zijn, lijken verstoring en eutrofiëring de vestiging van exoten in veel gevallen te faciliteren [119].

## 5.8 SYNTHESE BIOLOGISCHE ASPECTEN

Het voorspellen van klimaateffecten op de aquatische ecologie is niet eenvoudig. Dit komt doordat verschillende klimaatdrivers, met name veranderingen in temperatuur, neerslag en CO<sub>2</sub>-concentratie, de ecologie tegelijkertijd en op verschillende wijze beïnvloeden en organismen op verschillende trofische niveaus uiteenlopend reageren. Bovendien zijn de effecten van klimaatverandering vaak lastig te onderscheiden van die van andere antropogene invloeden, zoals eutrofiëring, en van veranderingen in de morfologie van waterlichamen. Desalniettemin zijn er wel uitspraken te doen over het effect van klimaatverandering op het niveau van biotische componenten of soortgroepen. Deze hebben we samengevat in [tabel 5.1](#).

---

Doordat veranderingen in één trofisch niveau door kunnen werken in het gehele voedselweb, kan een relatief kleine verandering in soortensamenstelling of één fenologische verschuiving doorwerken tot op het niveau van het gehele ecosysteem [190]. We sluiten dit hoofdstuk af met enkele voorbeelden van de manier waarop klimaatverandering trofische interacties kan verstoren ([box 7](#)) en met enkele voorbeelden van de effecten van klimaatverandering op biota die verder in dit boekje buiten beschouwing blijven (vogels en pathogenen, [box 8](#)).

---

**Tabel  
5.1**

**SAMENVATTING VAN DE KLIMAATINVLOED OP AQUATISCHE BIOTA**

**Fytoplankton**

- Klimaatverandering kan leiden tot een langer groeiseizoen met hierdoor in het voor- en najaar een hogere fytoplanktonbiomassa.
- Bij gelijkblijvende nutriëntenbelasting leiden hogere temperaturen niet eenduidig tot een toename in fytoplankton zomerbiomassa.
- Bij hogere temperaturen en hogere nutriëntenbelastingen neemt het aandeel aan cyanobacteriën in het totale fytoplanktonbiovolume vaak toe.

**Zoöplankton**

- Klimaatverandering kan leiden tot een afname in de afmeting van zoöplanktontaxa en in de totale biomassa, waardoor de graasdruk op fytoplankton afneemt.
- Er zijn aanwijzingen voor een vervroeging van de helderwaterfase (maar veranderingen in nutriëntenvruchten interfereren met dit klimaateffect).

**Macrofauna**

- Klimaatverandering leidt tot een verandering van soortensamenstelling in de richting van soorten die relatief ongevoelig zijn voor zuurstofarme condities.
- Piekafvoeren in stromende wateren kunnen leiden tot uitspoeling van macrofauna.

**Waterplanten**

- Zachtere winters (met minder ijs) veranderen de soortensamenstelling. In kleine wateren is er een grotere kans op dominantie door drijvende planten.
- Klimaatverandering kan leiden tot een kleinere kans op hoge bedekkingen met ondergedoken waterplanten.

- 
- De karakteristieke waterplanten uit zachte wateren worden bedreigd door een stijging van CO<sub>2</sub>-concentraties.

### Vis

- Klimaatverandering kan leiden tot een soortenverschuiving waarbij koud stenotherme soorten verdwijnen en de dichtheden aan benthische vis toenemen.
- Hogere temperaturen leiden tot een langere paaitijd. Hierdoor zijn er langere tijd kleine vissen aanwezig die vaak sterk prederen op zoöplankton.

### Exoten

- Klimaatverandering is vaak niet de belangrijkste factor bij de immigratie van nieuwe soorten. Wel kan het de abundantie van exoten sterk beïnvloeden, waarbij zachtere winters tot hogere abundanties leiden.

---

## Box 7 VOORBEELDEN VAN KLIMAATINVLOED OP TROFISCHE INTERACTIES

### 1 Mismatch zoö- en fytoplankton

Een bekend voorbeeld van de wijze waarop fenologische veranderingen door kunnen werken in het aquatische voedselweb is de timing van de fytoplankton- en de zoöplanktonpiek in het voorjaar (zie ook [paragraaf 5.2](#)). Uit een studie in Lake Washington in de Verenigde Staten komt duidelijk naar voren dat warmere lentes de voorjaarsbloei van diatomeeën met twintig dagen hebben vervroegd. De ontwikkeling van de *Daphnia* populatie, die normaal sterk op de diatomeeën graast, is niet zo sterk vervroegd waardoor ze hun belangrijkste voedselbron missen. Deze temporele mismatch is mogelijk de oorzaak van de neerwaartse trend in de Daphnia aantallen in het meer [131].

### 2 Mismatch vis en zoöplankton

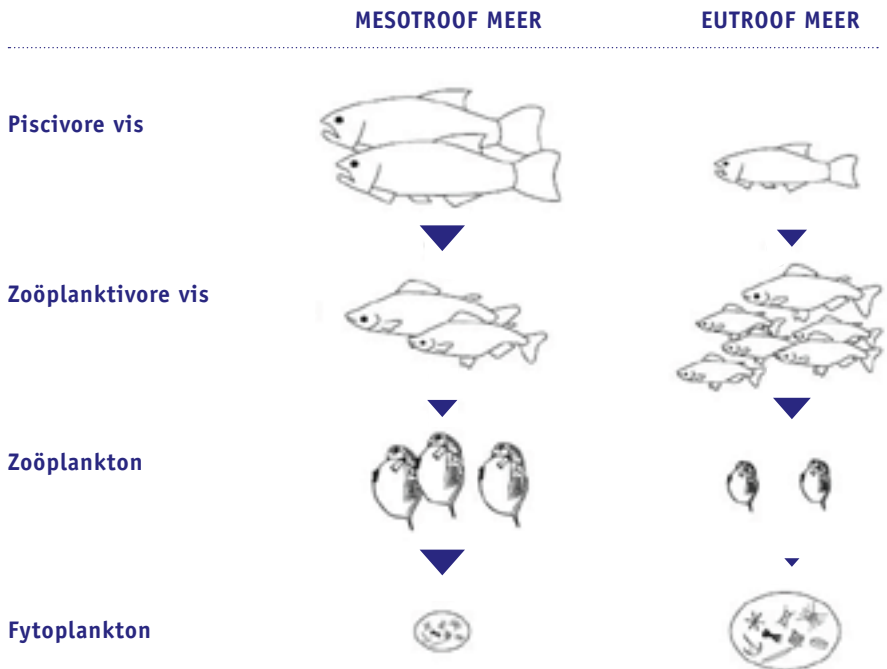
Gegevens uit het IJsselmeergebied geven aan dat Spiering, die bij ongeveer zes graden Celsius paait, zijn paai aanzienlijk heeft vervroegd in reactie op warmere winters (zie [figuur 23](#) en [paragraaf 5.6](#)). Hoewel er geen gegevens zijn over zoöplankton, lijkt het erop dat deze hun piek niet hebben vervroegd. Dit is afgeleid uit een analyse van de timing van de helderwaterfase: de periode waarop een grote biomassa aan zoöplankton het fytoplankton grotendeels weggraast (zie [paragraaf 5.2](#)). Als de vervroeging van de spieringpaaiperiode niet gepaard gaat met een vervroeging van de zoöplanktonpiek, ontstaat een mismatch waardoor de spieringlarven maar weinig voedsel tot hun beschikking hebben [57].

### 3 Effect van kleine vis op zoöplankton

Een langere paaiperiode van vissen heeft effect op de zoöplanktonbiomassa en vervolgens ook op de fytoplanktonbiomassa. Een langere paaiperiode leidt tot een langere periode met jonge vis die vaak planktivoor is. Door de hoge predatiedruk op zoöplankton vermindert de graasdruk op fytoplankton, waardoor deze laatste in biomassa toe kan nemen (zie de figuur hieronder). Als bovendien het omwoelen van het sediment door benthische vis toeneemt (bioturbatie) als gevolg van klimaatverandering [38], veroorzaakt dit een extra nutriëntenbelasting waar fytoplankton ook van kan profiteren.

#### Fig EFFECT VAN KLEINE VIS OP ZOÖPLANKTON

In mesotrofe meren is er vaak relatief veel piscivore vis die jaagt op zoöplanktivore vis. Kleine aantallen zoöplanktivore vis zijn gunstig voor zoöplankton dat op haar beurt fytoplankton eet. In eutrofe meren is het aandeel zoöplanktivore vis vaak hoger dan in mesotrofe meren. Hiervan profiteert uiteindelijk het fytoplankton. Klimaatverandering heeft vergelijkbare gevolgen omdat de langere paaiperioden en de grotere overleving van jonge vis tot een groter aandeel zoöplanktivore vis kunnen leiden [171].



---

**Box 8 WATERVOGELS EN PATHOGENEN**

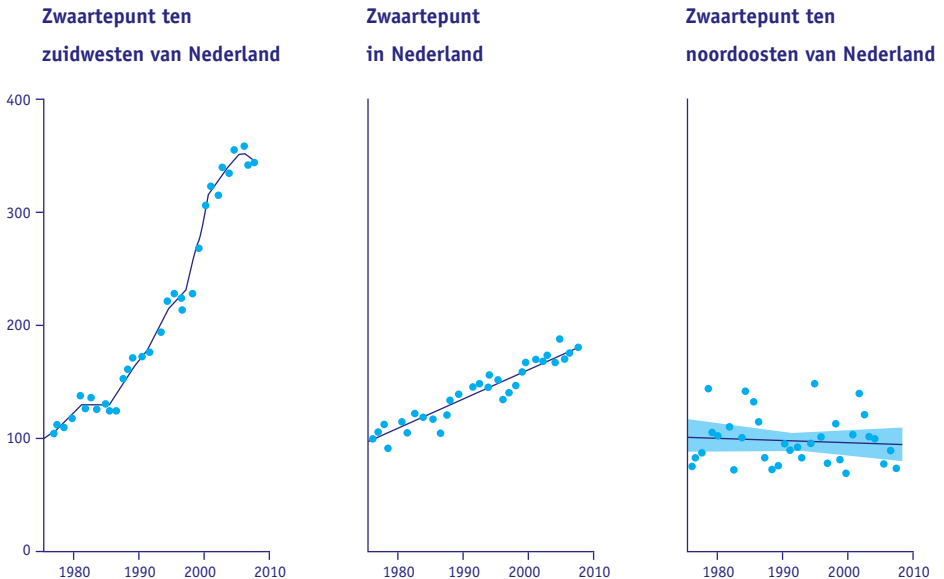
In het najaar, de winter en het voorjaar bevolkt een zeer groot aantal watervogels de waterrijke gebieden in Nederland om hier te profiteren van de relatief milde winters. De noordwaartse verschuiving van de vorstgrens als gevolg van klimaatverandering heeft directe gevolgen voor de vogelpopulaties in Nederland, zowel qua soortensamenstelling als qua aantallen.

De aantallen van soorten die eerder ten zuidwesten van Nederland overwinterden, zoals futen en rotganzen, zijn toegenomen (zie het linkse paneel van de onderstaande [figuur](#)). Ook voor de soorten die hun overwinteringszwaartepunt eerder al in Nederland hadden, zoals scholeksters en smienten, is dat het geval. Soorten die hun overwinteringszwaartepunt ten noorden van ons land hadden, zoals eidereenden en wilde zwanen, zijn niet toegenomen [191].

---

**Fig OVERWINTERENDE WATERVOGELS IN NEDERLAND**

*Trends in aantallen in Nederland overwinterende watervogels vanaf 1975. Er is onderscheid gemaakt tussen populaties watervogels die hun overwinteringszwaartepunt hebben ten zuidwesten van Nederland (links), in Nederland zelf (midden) en ten noordoosten van Nederland (rechts). Bron: NEM (SOVON, CBS) [191].*



---

De toename van met name plantetende watervogels, zowel in de zomer als in de winter, heeft een grote graasdruk op de watervegetatie tot gevolg. Anderzijds kan een toename in aantallen ganzen lokaal eutrofiëring veroorzaken wanneer de ganzen overdag grazen op het land en 's nachts overnachten op het water (zogenaamde guantrofiëring).

Hogere temperaturen kunnen ook leiden tot een toename in het aantal pathogenen, zowel qua dichtheden als qua periode waarin ze actief zijn (zie het onderstaande [krantenartikel](#)). De relatie tussen pathogenen en klimaatverandering zijn uitgebreid beschreven door Roijackers en Lüring [35].

---

**Fig**

**KRANTENARTIKEL**

*Artikel uit het Fries Dagblad uit februari 2007 waarin melding wordt gemaakt van sterfte van watervogels door botulisme na een extreem zachte winter.*





*De kans op hoge bedekkingen met ondergedoken  
waterplanten wordt mogelijk kleiner*

---

## **H6 SYNTHESE KLIMAATINVLOEDEN**



In dit hoofdstuk zetten we de belangrijkste zaken over klimaatverandering en aquatische ecosystemen op een rij.

### Onzekerheden

De invloed van klimaatverandering op aquatische ecosystemen is het duidelijkst voor fysische parameters: minder ijsbedekking, stijging van de watertemperatuur en een sterkere en langere thermische stratificatie. Ook veranderingen in de elementencycli zijn vaak sterk gerelateerd aan veranderingen in klimaat, al spelen lokale omstandigheden hier ook een belangrijke rol. De biologische veranderingen als gevolg van klimaatveranderingen zijn door de complexe interacties het lastigst te voorspellen [129, 192].

De schaal, zowel in tijd als in de ruimte, waarop klimaateffecten zich manifesteren in aquatische ecosystemen varieert sterk. Lokale effecten, zoals zuurstofloosheid, kunnen zich vaak binnen een dag manifesteren, terwijl grote nationale en zelfs mondiale effecten zoals de areaalverschuiving van soorten zich in tijdsbestekken van decennia afspelen.

**Fig 6.1** VOORBEELD VAN DE MANIFESTATIE VAN KLIMAATGEBONDEN FENOMENEN  
[naar 30].



---

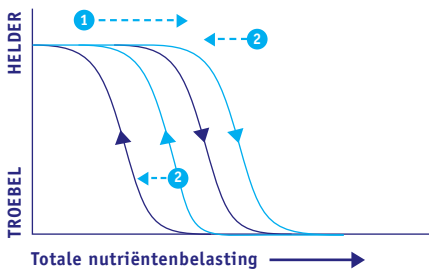
### Klimaatverandering versterkt eutrofiëring

Ondanks onzekerheden in de klimaatscenario's en in de biologische effecten, en ondanks de lokale verschillen in deze effecten is er wel een algemene trend zichtbaar: klimaatverandering versterkt eutrofiëring. Deze conclusie is gebaseerd op een groot aantal recente studies op basis van vergelijkingen tussen klimaatzones, vergelijkingen tussen meetgegevens in rivieren en meren in verschillende jaren, vergelijkingen tussen beken met natuurlijke temperatuurverschillen in IJsland, gecontroleerde experimenten in meren en plassen en mesocosms, laboratoriumproeven en modelsimulaties [10, 19, 21, 25, 42, 45, 90, 149, 193].

---

**Fig 6.2 ALTERNATIEVE TOESTANDEN VAN STILSTAANDE WATEREN**

Hysteresis plot waarin de alternatieve toestanden van stilstaande wateren zijn weergegeven: een heldere en troebele toestand. De lichtblauwe curves geven de huidige situatie weer en de donderblauwe curves de situatie na klimaatverandering. Klimaatverandering kan de toestand waarin een systeem zich bevindt beïnvloeden door het veroorzaken van (1) een hogere nutriëntenbelasting en (2) een lagere kritische nutriëntenbelasting waarbij een systeem omslaat van een helder naar een troebel systeem of vice versa.



---

Eutrofiëring hangt in stilstaande wateren sterk samen met de 'alternatieve toestand' waarin de wateren zich bevinden. Er is een 'heldere' en een 'troebele' toestand. De heldere toestand duidt op systemen met een lage biomassa aan fytoplankton. In ondiepe systemen gaat dit vaak gepaard met een hoge dichtheid aan ondergedoken waterplanten. De troebele toestand duidt op een eutroof systeem zonder ondergedoken waterplanten met hoge biomassa's fytoplankton,

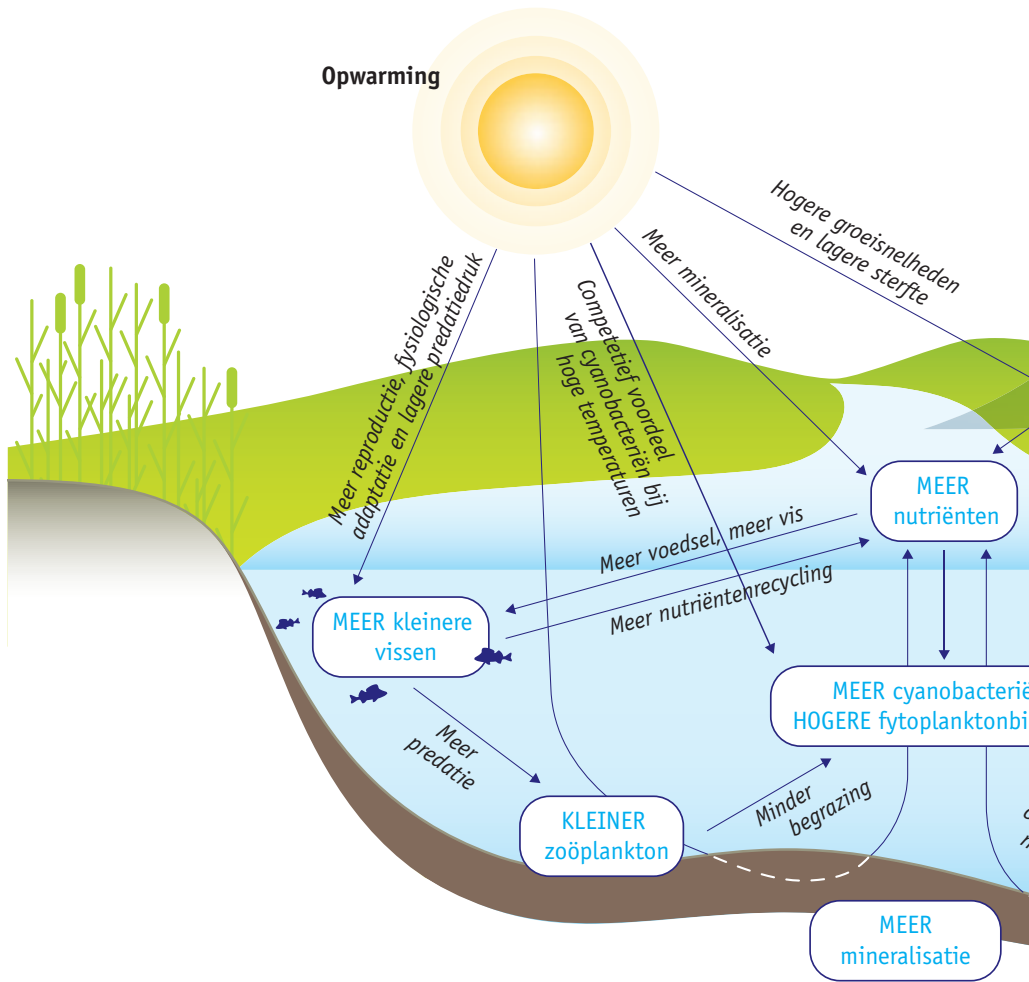
---

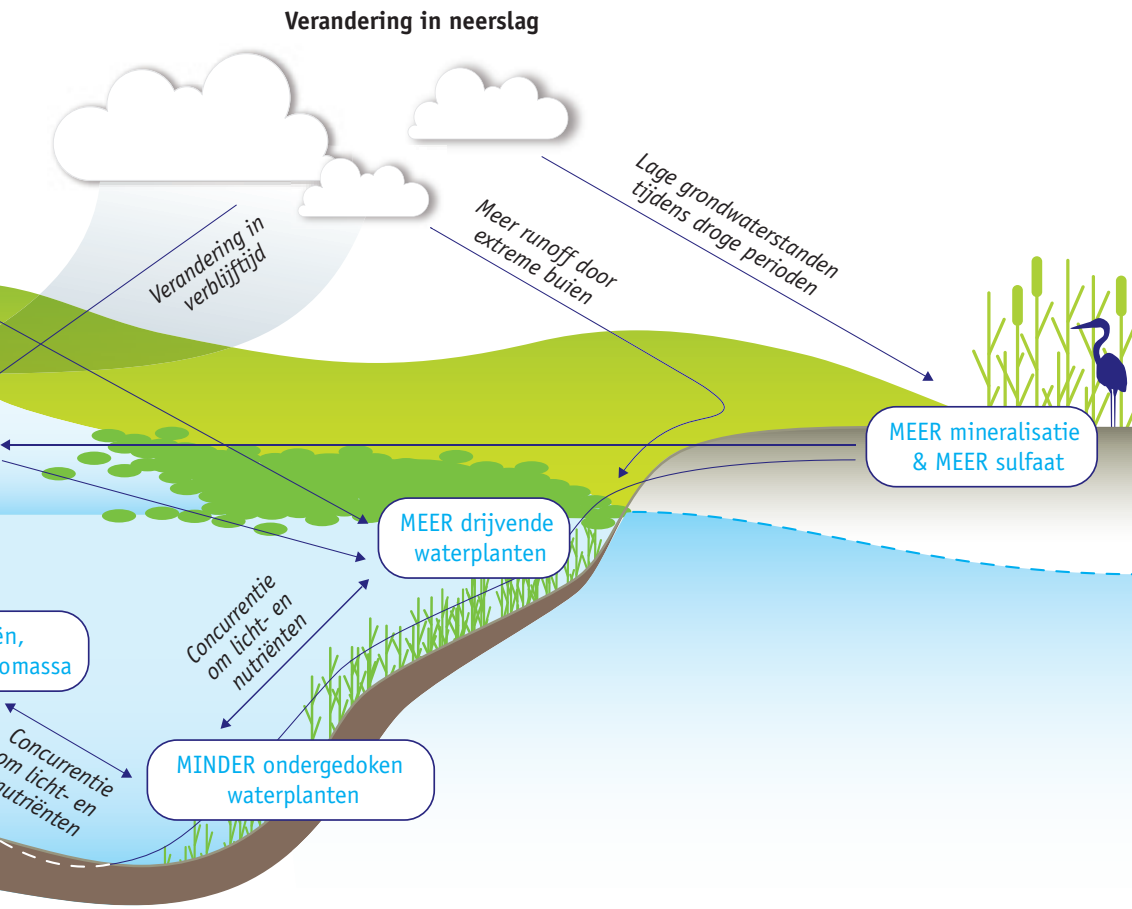
soms toxische drijfslagen van cyanobacteriën, of een hoge bedekking met drijvende planten zoals kroos. Hoe hoger de nutriëntenbelasting, hoe groter de kans dat het systeem zich in de troebele toestand bevindt.

Om een troebel systeem weer helder te krijgen, moet de nutriëntenbelasting vaak verder teruggebracht worden dan het omslagpunt waarbij het systeem troebel werd. Dit wordt hysteresis genoemd. Voor verdere toelichting zie het boek 'Van helder naar troebel... en weer terug' [47]. Door klimaatverandering wordt de kans groter dat een systeem zich in de troebele toestand bevindt. Dit komt enerzijds doordat klimaatverandering de nutriëntenbelasting van veel systemen verhoogt (peil 1 in [figuur 6.2](#)), anderzijds doordat de kritische nutriëntenbelasting waarbij een systeem omslaat van de ene naar de andere toestand wordt verlaagd (peil 2 in [figuur 6.2](#)). Hieraan liggen verschillende processen ten grondslag ([figuur 6.3](#) en [box 9](#)). Het tegengaan van de negatieve effecten van klimaatverandering zal dus voor aquatische systemen in belangrijke mate moeten bestaan uit het verder terugdringen van de nutriëntenbelasting (zie [hoofdstuk 7](#)).

**Fig 6.3 BELANGRIJKSTE EFFECTEN VAN KLIMAATVERANDERING**

Conceptuele weergave van de belangrijkste effecten van klimaatverandering op eutrofiëring en eutrofiëringseffecten [naar 19].





---

**Box 9****KLIMAATVERANDERING VERSTERKT EUTROFIËRING**

Door klimaatverandering stijgt de nutriëntenbelasting en worden de effecten van eutrofiëring versterkt. De toename in nutriëntenbelasting is zowel afkomstig uit interne als uit externe bronnen (zie [hoofdstuk 4](#)). De toename in externe belasting wordt vooral veroorzaakt door veranderingen in het neerslagpatroon. In veengebieden kan de versnelde mineralisatie van het organisch materiaal tijdens droge en warme perioden nog voor extra nutriëntenbelasting zorgen [92]. De toename in interne nutriëntenbelasting is toe te schrijven aan hogere temperaturen en de hiermee gepaard gaande hogere mineralisatiesnelheden [194]. Nutriëntenrijk inlaatwater of concentratie van stoffen door verdamping kan de nutriëntenconcentratie nog eens extra doen toenemen.

Overigens zijn er ook potentieel gunstige effecten van klimaatverandering op de nutriëntencycli. Zo kan de hoeveelheid stikstof in het oppervlaktewater sterk verminderen door de forse toename van denitrificatie bij stijgende temperatuur. Ook droogval van sediment kan zorgen voor afnemende nutriëntengehalten in het watersysteem. Dit kan gebeuren wanneer ijzersulfide wordt geoxideerd en de fosfaatbeschikbaarheid vervolgens afneemt door de vorming van ijzer-fosforverbindingen (zie ook [hoofdstuk 7](#)).

Klimaatverandering verhoogt niet alleen de nutriëntenbelasting, het versterkt ook de biologische consequenties van eutrofiëring. Zo zorgen veranderingen in de visgemeenschap voor sterke predatie op zoöplankton. Het resultaat is dat, onder verder vergelijkbare omstandigheden, de biomassa aan fytoplankton toeneemt als het warmer wordt. Doordat cyanobacteriën in het voordeel zijn bij hoge temperaturen, neemt vooral hun aandeel toe. Dit wordt met name veroorzaakt door langere verblijftijden en sterkere stratificatie.

De lange verblijftijden hebben tot gevolg dat fytoplankton minder snel wordt uitgespoeld. Vooral langzaam groeiende soorten zoals sommige cyanobacteriën hebben hier voordeel van. Verticaal migrerende cyanobacteriën profiteren bovendien van de stratificatie, omdat zij fosfor uit het sediment kunnen halen en vervolgens weer op kunnen stijgen richting het licht. Deze positieve terugkoppeling maakt eutrofiëringsbestrijding in warmere wateren lastig [195] (zie ook [hoofdstuk 7](#)).

De hogere nutriëntenbelasting leidt er in ondiepe systemen toe dat er een grotere kans is op het verdwijnen van ondergedoken waterplanten en op dominantie van fytoplankton of (in sloten en kanalen) van drijvende planten [42, 45, 149]. In zowel diepe als ondiepe meren neemt de kans op cyanobacteriële dominantie toe, zelfs bij gelijkblijvende nutriën-

---

tenbelastingen [120]. Ook in gestuwde rivieren met lage zomerafvoeren vergroot klimaatverandering de kans op fytoplanktonbloei. In beken speelt vooral de bloei van benthische filamenteuze algen op hard substraat [25].

---

#### **Box 10 EUTROFIËRING VERSTERKT KLIMAATVERANDERING**

Het ligt nog niet onomstotelijk vast, maar er zijn aanwijzingen dat klimaatverandering niet alleen de effecten van eutrofiëring versterkt, maar dat ook het omgekeerde het geval is. Dit komt doordat oppervlaktewateren op wereldniveau een belangrijke rol spelen in de koolstofcyclus.

Zowel stromende als stilstaande wateren ontvangen vaak grote hoeveelheden terrestrisch organisch koolstof. Een gedeelte van dit organisch koolstof wordt in het water gemineraliseerd. Het hierbij gevormde koolstofdioxide ( $\text{CO}_2$ ) en methaan ( $\text{CH}_4$ ) kunnen vervolgens worden uitgestoten naar de atmosfeer. De koolstofgassen kunnen echter ook in het watersysteem weer in organisch koolstof worden omgezet.

Zo leidt eutrofiëring tot een grotere fixatie van  $\text{CO}_2$  doordat hogere fytoplankton- en waterplantenbiomassa's grotere hoeveelheden  $\text{CO}_2$  gebruiken voor de fotosynthese. Dit is gunstig uit het oogpunt van klimaatverandering, maar tegelijkertijd treedt in warme eutrofe wateren vaak zuurstofloosheid op nabij het sediment. Hierdoor stijgt de productie en uitstoot van methaan ( $\text{CH}_4$ ) en lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Beide gassen zijn zeer sterke broeikasgassen met een effect dat, respectievelijk 21 en 310 keer zo groot is als dat van  $\text{CO}_2$ . De terugkoppeling tussen opwarming en  $\text{CH}_4$ -emissie is al aangetoond. Maar het is nog onduidelijk hoe het volledige broeikasgasbudget zal zijn: meer  $\text{CO}_2$ -opname door eutrofiëring enerzijds en meer  $\text{CO}_2$ -,  $\text{CH}_4$ - en  $\text{N}_2\text{O}$ -emissie door verhoogde mineralisatie en zuurstofloze omstandigheden aan de andere kant.

Een andere manier waarop eutrofiëring de opwarming van de aarde kan versterken is doordat troebele eutrofe wateren meer warmte absorberen dan heldere watersystemen. Vooral eutrofe kustsystemen kunnen door hun grote oppervlakte en volume mogelijk een aanzienlijke bijdrage leveren aan de opwarming van de aarde.



*Eén van de maatregelen om nutriëntenbelastingen  
te reduceren is het aanleggen van bufferstroken*

---

## **H7 KLIMAATVERANDERING EN MAATREGELEN TER VERBETERING VAN DE WATERKWALITEIT**



---

Momenteel wordt in het kader van de Europese Kaderrichtlijn Water hard gewerkt aan het halen van verschillende waterkwaliteitsdoelen. Belangrijke vragen daarbij zijn: wat is de invloed van klimaatverandering op het halen van deze doelen? Zijn er extra maatregelen nodig en moeten de maatlatten of de doelen worden aangepast? Recent is een onderzoek gestart om deze vragen te kunnen beantwoorden. Alhoewel dit nog loopt, is nu al duidelijk dat er inderdaad extra maatregelen nodig zijn om de door klimaatverandering veroorzaakte achteruitgang van de waterkwaliteit tegen te gaan. Voor vrijwel alle watersystemen geldt dat klimaatverandering leidt tot extra nutriëntenbelasting [25, 69, 90]. Hierdoor zijn voor veel watersystemen extra reductiemaatregelen nodig. In stromende wateren zijn daarbij extra maatregelen nodig om droogval en afvoerpieken tegen te gaan [37]. Beide type maatregelen zijn ‘geen spijt maatregelen’; ze pakken onder alle klimaatscenario’s positief uit.

Bestaande maatregelen zullen hun effectiviteit grotendeels behouden. Van enkele maatregelen wordt ingeschat dat ze in het licht van klimaatverandering zelfs relevanter worden [196, 197]. Het meest kwetsbaar voor klimaatverandering zijn maatregelen die gericht zijn op het creëren van specifieke habitats die gevoelig zijn voor fluctuerende waterstanden of extreme debieten [196]. De vraag is in hoeverre die hun effectiviteit behouden. Vistrappen kunnen bijvoorbeeld droogvallen. Natuurvriendelijke oevers of legakkers kunnen aangetast of weggeslagen worden.

In de laatste paragrafen volgt een overzicht van de maatregelen die de negatieve effecten van klimaatverandering in zoete watersystemen kunnen beperken. Aansluitend aan de STOWA-rapporten ‘Van helder naar troebel...en weer terug’ [47] en ‘Beken stromen’ [46] worden de mogelijke maatregelen gepresenteerd met behulp van schematische modellen van stilstaande en stromende wateren: respectievelijk het model met alternatieve toestanden ([figuur 7.1](#)) en het 5S-model ([figuur 7.2](#)).

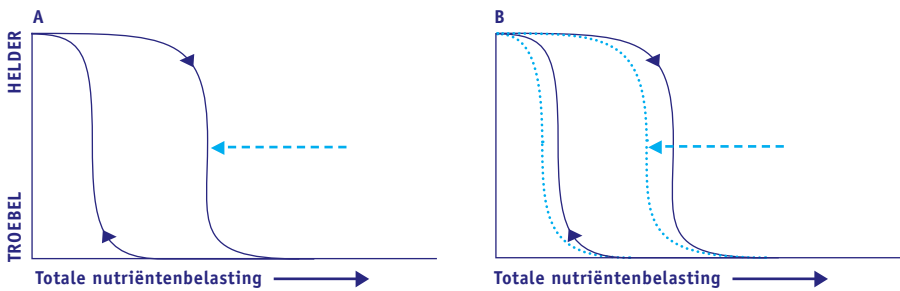
## **7.1 HET BEPERKEN VAN DE NEGATIEVE EFFECTEN VAN KLIMAATVERANDERING IN STILSTAANDE WATEREN**

Stilstaande wateren kunnen zich in een heldere of in een troebele toestand bevinden. Hoe hoger de nutriëntenbelasting, hoe groter de kans dat het systeem zich in de troebele toestand bevindt (zie [figuur 6.3](#)). Voor zowel diepe als ondiepe wateren geldt dat er als gevolg van klimaatverandering extra maatregelen nodig zijn om de nutriëntenbelasting verder terug te dringen ([figuur 7.1a](#)).

Omdat de externe nutriëntenbelasting sterk wordt gestuurd door het neerslagregime, waarbij extreme regenbuien een belangrijke rol spelen, zijn adaptatiemaatregelen ter reductie van externe belasting noodzakelijk bij alle KNMI'06 scenario's. De interne nutriëntenbelasting wordt sterk gestuurd door de temperatuur. Maatregelen die zich op de reductie van interne bronnen richten, zijn hierdoor het meest relevant binnen de scenario's W en W+.

**Fig 7.1 BEPERKENDE MAATREGELN STILSTAANDE WATEREN**

*Maatregelen die de negatieve effecten van klimaatverandering in stilstaande wateren kunnen beperken.*

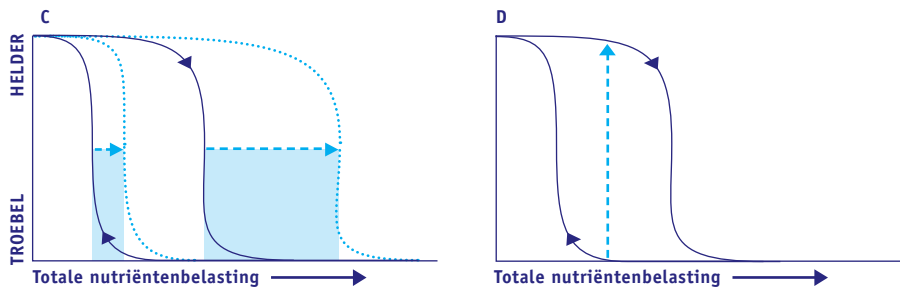


Extra reductie nutriëntenbelasting om door klimaatverandering dreigende toename in de belasting tegen te gaan.

➔ Zeer waarschijnlijk noodzakelijk

Extra reductie nutriëntenbelasting vanwege een dreigende verlaging van de kritische nutriëntenbelasting.

➔ Zeer waarschijnlijk noodzakelijk



**SYSTEEMMAATREGEL**

Vergroten draagkracht.

➔ Waarschijnlijk noodzakelijk

**INTERNE MAATREGEL**

Ingreep voedselweb.

➔ Resultaat mogelijk minder effectief

---

Specifiek voor ondiepe meren geldt dat de kritische nutriëntenbelasting naar alle waarschijnlijkheid lager wordt onder invloed van klimaatverandering. Dit houdt in dat bij hogere temperaturen een ondiep meer al bij een lagere nutriëntenbelasting kan omslaan van een waterplanten gedomineerd systeem naar een fytoplankton gedomineerd systeem [45, 69, 149]. Omgekeerd moet de nutriëntenbelasting ook verder gereduceerd worden om van een fytoplankton gedomineerd systeem naar een waterplanten gedomineerd systeem te gaan ([figuur 7.1b](#)).

Warmere omstandigheden zijn gunstig voor cyanobacteriën. Hierdoor zijn voor het tegengaan van cyanobacteriënbloei eveneens extra maatregelen nodig die de nutriëntenbelasting terugbrengen ([figuur 7.1b](#)). Voor een beschrijving van de maatregelen die ingezet kunnen worden om zowel de interne als externe nutriëntenbelasting te reduceren, verwijzen we naar eerdere STOWA-publicaties [47, 48].

Om de verwijdering van nutriënten uit het watersysteem te bespoedigen, kunnen verschillende systeemmaatregelen worden genomen ([figuur 7.1c](#)) [47, 48]. Speciaal in verband met klimaatadaptatie wordt onderzoek gedaan naar het effect van tijdelijke droogval op nutriëntengehalten. Het idee hierachter is dat onder droge condities ijzersulfide, dat veel aanwezig is in sediment van Nederlandse wateren, oxideert. Dit leidt tot de vorming van ijzeroxides. Deze ijzeroxides kunnen fosfaat binden, waardoor de beschikbaarheid afneemt. Dit fosfaat-verwijderende effect is vaak groter dan de fosfor-producerende mineralisatie die door de droogval ook sterk toe kan nemen [97, 98]. Bovendien kan de oxidatie van ammonium tot nitraat leiden tot een toename van de stikstofverwijdering door denitrificatie in het onderliggende, nog natte anaerobe sediment. Vooral in de scenario's G+ en W+ neemt de zomerneerslag sterk af, waardoor deze maatregel effectief ingezet zou kunnen worden.

Denitrificatie neemt sterk toe met de aanwezigheid van ondergedoken waterplanten [198, 199]. Systeemmaatregelen die de groei van waterplanten stimuleren [47], bevorderen hierdoor ook de stikstofverwijdering. Systeemmaatregelen die een flexibel peil mogelijk maken, verminderen de behoefte aan inlaatwater in droge perioden. Het gaat hier om hogere waterstanden in de winter en lagere waterstanden in de zomer. Dit is vooral relevant als onder invloed van klimaatverandering de kwaliteit van het Rijnwater verslechtert. Vooral in de scenario's G+ en W+ neemt de zomerneerslag sterk af, terwijl de winterneerslag stijgt waardoor deze maatregel effectief ingezet kan worden.

---

Eén van de maatregelen die uitgevoerd wordt om in ondiepe systemen een omslag van een troebele naar een heldere toestand te bewerkstelligen, is actief biologisch beheer en beheervisserij. Hierbij wordt een groot deel van (vooral bodemwoelende) vis weggevangen. In warmer water zal de visgemeenschap zich waarschijnlijk sneller herstellen, waardoor vaker moet worden gevisd om het water helder te houden [171].

## 7.2 HET BEPERKEN VAN DE NEGATIEVE EFFECTEN VAN KLIMAATVERANDERING IN STROMENDE WATEREN

De ecologische systeembeschrijving van stromende wateren is gebaseerd op het zogenoemde 5S-model: Systeemvoorwaarden, Stroming, Structuren, Stoffen en Soorten [46]. De door klimaatverandering verwachte veranderingen in neerslag en temperatuur vallen in dit model onder de Systeemvoorwaarden. Deze veranderingen beïnvloeden vervolgens de Stroming, de Structuur en de Stoffen. Deze bepalen op hun beurt grotendeels de Soortensamenstelling in het systeem (zie [figuur 7.2](#)).

Voor vrijwel alle stromende wateren geldt dat de veranderingen in het neerslagpatroon belangrijke gevolgen kunnen hebben. Piekafvoeren als gevolg van extreme regenbuien, die in alle KNMI'06 scenario's worden voorspeld, kunnen desastreus zijn voor de karakteristieke flora en fauna [37, 71, 140]. Daarnaast kunnen in kleine stromende wateren droge periodes leiden tot droogval, wat eveneens schadelijke gevolgen heeft voor het ecosysteem. Dit speelt vooral in het G+ en W+ scenario.

In grotere wateren leiden droge perioden tot een sterke reductie van de stroomsnelheid, doordat het water vastgehouden wordt. Dit heeft onder meer tot gevolg dat stoffenconcentraties toenemen en hoge dichtheden van algen kunnen ontstaan (zie [paragraaf 5.1](#)). Maatregelen in de categorie 'Stroming' die de afvoerpieken afzwakken en de droogval verminderen, zijn in het licht van klimaatverandering dan ook erg relevant [37, 46]. Voorbeelden van maatregelen die piekafvoeren afzwakken, zijn het verwijderen van drainage en het aanleggen van nevengeulen. Een voorbeeld van een maatregel om droogval te verminderen is het aanleggen van (extra) retentiemogelijkheden in het stroomgebied.

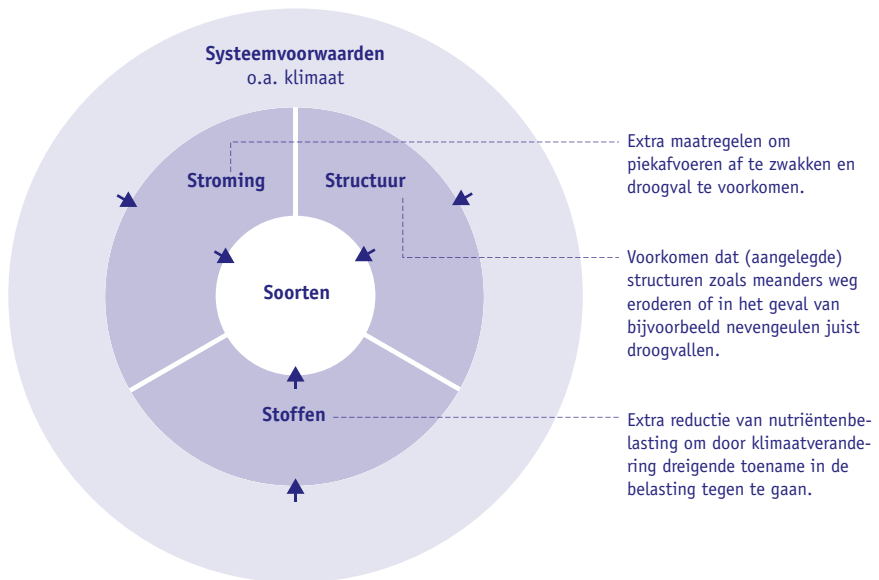
De veranderingen in afvoer hebben directe gevolgen voor de structuren in stromende wateren. Deze bestaan uit het lengte- en het dwarsprofiel, maar ook uit

substraatmozaïeken en oevervegetatie [46]. Door piekafvoeren kunnen natuurlijke of aangelegde structuren wegspoelen of eroderen. Bij de aanleg van bijvoorbeeld meanders of het aanpassen van het doorstroomde profiel moet hiermee rekening worden gehouden. Anderzijds kunnen aangelegde structuren zoals nevengeulen en vistrappen, eerder droogvallen. Hierdoor verliezen ze hun ecologische functie [37].

Klimaatverandering zal ook in stromende wateren leiden tot extra nutriëntenvrachten. Extra maatregelen in de categorie 'Stoffen' zijn nodig om deze extra vrachten te verminderen. Voor een overzicht van de mogelijke maatregelen verwijzen we naar eerdere publicaties [18, 37].

### Fig 7.2 BEPERKENDE MAATREGELEN STROMENDE WATEREN

Maatregelen die de negatieve effecten van klimaatverandering in stromende wateren kunnen beperken.



*Hogere temperaturen leiden tot een langere paaitijd.  
Hierdoor zijn er langere tijd kleine vissen aanwezig*

---

## REFERENTIES



1. Flanagan, K.M., et al., *Climate change: the potential for latitudinal effects on algal biomass in aquatic ecosystems*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2003. **60**(6): p. 635-639.
2. De Senerpont Domis, L., W.M. Mooij, and J. Huisman, *Climate-induced shifts in an experimental phytoplankton community: a mechanistic approach*. Hydrobiologia, 2007. **584**: p. 403-413.
3. Gillooly, J.F. and S.I. Dodson, *Latitudinal patterns in the size distribution and seasonal dynamics of new world, freshwater cladocerans*. Limnology and Oceanography, 2000. **45**(1): p. 22-30.
4. De Kruik, H.J., *Overzicht van hydrologisch koelwateronderzoek in Nederland. Stand van zaken*. 1983, Commissie Koelwater normen: Den Haag.
5. Cole, J.J., et al., *Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget*. Ecosystems, 2007. **10**(1): p. 172-185.
6. Smol, J.P. and M.S.V. Douglas, *From controversy to consensus: making the case for recent climate change in the Arctic using lake sediments*. Frontiers in Ecology and the Environment, 2007. **5**(9): p. 466-474.
7. Mazumder, A., *Phosphorus-chlorophyll relationships under contrasting herbivory and thermal stratification: Predictions and patterns*. Canadian journal of fisheries and aquatic sciences, 1994. **51**(2): p. 390.
8. Wiberg-Larsen, P., et al., *Species richness and assemblage structure of Trichoptera in Danish streams*. Freshwater Biology, 2000. **43**(4): p. 633-647.
9. Durance, I. and S.J. Ormerod, *Trends in water quality and discharge confound long-term warming effects on river macroinvertebrates*. Freshwater Biology, 2009. **54**(2): p. 388-405.
10. Balayla, D., et al., *Larger zooplankton in Danish lakes after cold winters: are winter fish kills of importance?* Hydrobiologia, 2010. **646**(1): p. 159-172.
11. Bastviken, D., et al., *Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH<sub>4</sub> emissions*. J. Geophys. Res., 2008. **113**(G2): p. G02024.
12. Huttunen, J.T., et al., *Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions*. Chemosphere, 2003. **52**(3): p. 609-621.
13. Markager, S., W.F. Vincent, and E.P.Y. Tang, *Carbon fixation by phytoplankton in high Arctic lakes: Implications of low temperature for photosynthesis*. Limnology and Oceanography, 1999. **44**(3): p. 597-607.
14. Ven den Hoek, T.H. en P.F.M. Verdonschot, *De invloed van veranderingen in temperatuur op beekmacrofauna*. 2001, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte: Wageningen. p. 86.

- 
15. Walter, K.M., et al., *Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming*. *Nature*, 2006. **443**(7107): p. 71-75.
  16. Burgmer, T., H. Hillebrand, and M. Pfenninger, *Effects of climate-driven temperature changes on the diversity of freshwater macroinvertebrates*. *Oecologia*, 2007. **151**(1): p. 93-103.
  17. Huszar, V., et al., *Nutrient-chlorophyll relationships in tropical-subtropical lakes: do temperate models fit?* *Biogeochemistry*, 2006. **79**(1): p. 239-250.
  18. Besse-Lotoskaya, A.A., et al., *Natuurdoelen en klimaatverandering: state of the art*. 2011, Alterra, onderdeel van Wageningen UR: Wageningen. p. 156.
  19. Moss, B., et al., *Allied attack: climate change and nutrient pollution*. *Inland waters*, 2011.
  20. Gyllström, M., et al., *The role of climate in shaping zooplankton communities of shallow lakes*. *Limnology and Oceanography*, 2005. **50**(6): p. 2008-2021.
  21. Kosten, S., et al., *Warmer climate boosts cyanobacterial dominance in lakes*. *Global Change Biology*, in press.
  22. Carvalho, L. and A. Kirika, *Changes in shallow lake functioning: response to climate change and nutrient reduction*. *Hydrobiologia*, 2003. **506-509**(1): p. 789-796.
  23. McKee, D., et al., *Effects of simulated climate warming on macrophytes in freshwater microcosm communities*. *Aquatic Botany*, 2002. **74**(1): p. 71-83.
  24. Moss, B., et al., *How important is climate? Effects of warming, nutrient addition and fish on phytoplankton in shallow lake microcosms*. *Journal of Applied Ecology*, 2003. **40**(5): p. 782-792.
  25. Jeppesen, E., et al., *Interaction of Climate Change and Eutrophication*, in *Climate change impacts on freshwater ecosystems*, M. Kernan, R.W. Battarbee, and B. Moss, Editors. 2010, Blackwell Publishing Ltd.: Malaysia.
  26. IPCC, *Climate Change and Water*, in *Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, B. Bates, et al., Editors. 2008, IPCC Secretariat: Geneva. p. 210.
  27. Deltacommissie, *Samen werken met water. Een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst. Bevindingen van de Deltacommissie 2008*. 2008: Heerhugowaard. p. 140.
  28. European Union, *River Basin Management in a Changing Climate, Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC)*, *Technical Report - 2009 - 040, Guidance document No. 24*. 2009, Brussels.
  29. Unie van Waterschappen, *Klimaat en waterschappen: op weg naar klimaatbestendig waterbeheer (voorbeeldenboek klimaatactiviteiten waterschappen)*, ed. E. Gloude-mans and M. Booltink. 2008, Den Haag: Unie van Waterschappen. 36.



- 
30. Loeve, R., P. Droogers, en J. Veraart, *Klimaatverandering en waterkwaliteit*. 2006, Opdrachtgever: Wetterskip Fryslan, Uitvoerder: FutureWater: Wageningen. p. 108.
  31. Grontmij AquaSense en Koeman en Bijkerk B.V., *Trendanalyse hydrobiologische gegevens Friesland*. , in *Grontmijrapport 210455. Koeman en Bijkerk Rapport 2007-015 Adviseur Water en Natuur Rapport 605*. . 2007, In opdracht van: Wetterskip Fryslân.: Amsterdam/Haren/Amsterdam. p. 175pp.
  32. Van Dam, H., *Evaluatie basismetnet waterkwaliteit Hollands Noorderkwartier: Trendanalyse hydrobiologie, temperatuur en waterchemie 1982-2007*. 2009, in opdracht van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier: Amsterdam. p. 264.
  33. Van Dam, H., et al., *Trendanalyse 1981-2005 van hydrobiologische gegevens uit Friesland*. H2O, 2008. **41**(6): p. 29-34.
  34. Dionisio Pires, M., *Betekenis van klimaatverandering voor de ecologische kwaliteit van oppervlaktewateren: Achtergrondrapport Ex-ante evaluatie KRW*. 2008, NIOO: Nieuwersluis. p. 67.
  35. Roijackers, R.M.M. and M.F.L.L.W. Lüring, *Climate Change and Bathing Water Quality*. 2007: Wageningen. p. 40.
  36. Verdonshot, R.C.M., et al., *Klimaatverandering en aquatische biodiversiteit: 1. Literatuurstudie naar temperatuur*. 2007, Alterra: Wageningen. p. 127.
  37. Besse-Lotoskaya, A., et al., *Doorwerking klimaatverandering in KRW keuzen: casus beken en beekdalen*. 2007, Alterra, in opdracht van ministerie van LNV: Wageningen.
  38. Mooij, W.M., et al., *The impact of climate change on lakes in the Netherlands: a review*. Aquatic Ecology, 2005. **39**(4): p. 381-400.
  39. Verweij, W., et al., *Impacts of climate change on water quality in the Netherlands*. 2010, RIVM: Bilthoven. p. 61.
  40. Gerten, D. and R. Adrian, *Effects of climate warming, North Atlantic Oscillation, and El Niño-Southern Oscillation on thermal conditions and plankton dynamics in northern hemispheric lakes*. Scientific World Journal, 2002. **8**(2): p. 586-606.
  41. Kosten, S., *Aquatic ecosystems in hot water: Effects of climate on the functioning of shallow lakes*. PhD thesis. 2010, Wageningen Aquatic Ecology and Water Quality Management Group, Wageningen University. 130.
  42. Netten, J., et al., *Differential response to climatic variation of free-floating and submerged macrophytes in ditches*. 2011.
  43. Janse, J.H., *A model of nutrient dynamics in shallow lakes in relation to multiple stable states*. Hydrobiologia, 1997. **342**: p. 1-8.

- 
44. Wilby, R.L., et al., *Risks posed by climate change to the delivery of Water Framework Directive objectives in the UK*. *Environment International*, 2006. **32**(8): p. 1043-1055.
  45. Mooij, W., et al., *Predicting the effect of climate change on temperate shallow lakes with the ecosystem model PCLake*. *Hydrobiologia*, 2007. **584**(1): p. 443-454.
  46. Verdonschot, P.F.M., et al., *Beken stromen. Leidraad voor ecologisch beekherstel*. P.F.M. Verdonschot, Editor. 1995, Werkgroep Ecologisch Waterbeheer, subgroep Beekherstel, Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer: Utrecht. p. 236.
  47. Jaarsma, N.G., M. Klinge, en L. Lamers, *Van helder naar troebel... en weer terug. Een ecologische systeemanalyse en diagnose van ondiepe meren en plassen voor de Kaderrichtlijn Water*. 2008, STOWA: Utrecht.
  48. Oste, A., N. Jaarsma, en F. van Oosterhout, *Een heldere kijk op diepe plassen. Kennisdocument diepe meren en plassen: ecologische systeemanalyse, diagnose en maatregelen*. 2010, Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer: Amersfoort. p. 174.
  49. Van den Hurk, B., et al., *KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands*. 2006, KNMI De Bilt.
  50. Klein Tank, A.M.G. en G. Lenderink, *Klimaatverandering in Nederland: Aanvullingen op de KNMI'06 scenario's*. 2009, KNMI: De Bilt.
  51. van Dorland, R., et al., *De Staat van het Klimaat 2010*. 2011, De Bilt/Wageningen: uitgave PCCC. 76.
  52. Lockwood, M., et al., *Are cold winters in Europe associated with low solar activity?* *Environmental Research Letters*, 2010. **5**(2).
  53. De Jager, C. and S. Duhau, *The Variable Solar Dynamo and the Forecast of Solar Activity; Influence on Terrestrial Surface Temperatures*, in *Global Warming in the 21st Century*, J.M. Cossia, Editor. 2010, NOVA Science Publishers: Hauppauge, NY.
  54. Hampton, S.E., et al., *Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake - Lake Baikal, Siberia*. *Global Change Biology*, 2008. **14**(8): p. 1947-1958.
  55. Van Dam, H. en A. Mertens, *Vennen minder zuur maar warmer*. *H2O: tijdschrift voor watervoorziening en afvalwaterbehandeling*, 2008. **41**(12): p. 36-39.
  56. Scheffer, M., et al., *Climatic warming causes regime shifts in lake food webs*. *Limnology and Oceanography*, 2001. **46**(7): p. 1780-1783.
  57. Noordhuis, R., *Ecosysteem IJsselmeergebied: nog altijd in ontwikkeling. Trends en ontwikkelingen in water en natuur van het Natte Hart van Nederland*. 2010, Rijkswaterstaat in samenwerking met Deltares: Lelystad. p. 420.
  58. Beniston, M., *The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analy-*

- 
- sis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 2004. **31**(2): p. L02202.
59. Schar, C., et al., *The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves*. *Nature*, 2004. **427**(6972): p. 332-336.
  60. Closter, R.M., *Influence of weather and expected future climate changes on thermal stratification and anoxia in Danish lakes*, in *Danish Climate Centre, Danish Meteorological Institute and Freshwater Biological Laboratory, Biological Institute, Faculty of Science, University of Copenhagen*. 2007: Copenhagen. p. 104.
  61. Lewis, W.M., *Tropical Limnology*. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1987. **18**: p. 159-184.
  62. Riley, E.T. and E.E. Prepas, *Role of internal phosphorus loading in two shallow productive lakes in Alberta, Canada*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1984. **41**(6): p. 845-855.
  63. Kallio, K., *Effect of summer weather on internal loading and chlorophyll a in a shallow lake: a modeling approach*. *Hydrobiologia*, 1994. **275-276**: p. 371-378.
  64. Wilhelm, S. and R. Adrian, *Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton*. *Freshwater Biology*, 2008. **53**(2): p. 226-237.
  65. Magnuson, J.J., et al., *Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere*. *Science*, 2000. **289**(5485): p. 1743-1746.
  66. Procensus, *Ontwerp Notitie Stedelijk Water: Een leidraad voor water in dorp en stad*. 2006, In opdracht van Waterschap Noorderzijlvest: 2006. p. 26.
  67. Hellmann, F. en J. Vermaat, *Het effect van klimaatverandering op de waterhuishouding en nutriëntenstromen in veenweidepolders*. *H2O*, 2011(3): p. 25-28.
  68. Özen, A., et al., *Drought-induced changes in nutrient concentrations and retention in two shallow Mediterranean lakes subjected to different degrees of management*. *Hydrobiologia*, 2010. **646**(1): p. 61-72.
  69. Jeppesen, E., et al., *Climate change effects on runoff, catchment phosphorus loading and lake ecological state, and potential adaptations*. *Journal of Environmental Quality*, 2009. **38**: p. 1930-1941.
  70. Middelkoop, H., *The impact of climate change on the River Rhine and the Implications for Water Management in the Netherlands*. 2000, RIZA: Lelystad.
  71. Verdonshot, P.F.M., et al., *Climate change and the hydrology and morphology of freshwater ecosystems*, in *Climate Change Impacts on Freshwater Ecosystems*, M. Kernan, R.W. Battarbee, and B. Moss, Editors. 2010, Blackwell Publishing Ltd.: Malaysia. p. 65-83.

- 
72. Ibelings, B., et al., *Monitoring of algae in Dutch rivers: does it meet its goals?* Journal of Applied Phycology 1998. **10**: p. 171-181.
  73. Zwolsman, G. en M. Van Vliet, *Effect van een hittegolf op de waterkwaliteit van de Rijn en de Maas*. H2O: tijdschrift voor watervoorziening en afvalwaterbehandeling, 2007. **22**: p. 41-44.
  74. Rivkin, R.B. and L. Legendre, *Biogenic Carbon Cycling in the Upper Ocean: Effects of Microbial Respiration*. Science, 2001. **291**(5512): p. 2398-2400.
  75. Lopez-Urrutia, A., et al., *Scaling the metabolic balance of the oceans*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006. **103**(23): p. 8739-8744.
  76. Sand-Jensen, K.A.J., N.L. Pedersen, and M. Søndergaard, *Bacterial metabolism in small temperate streams under contemporary and future climates*. Freshwater Biology, 2007. **52**(12): p. 2340-2353.
  77. Veraart, A.J., J.J.M. de Klein, and M. Scheffer, *Warming can boost denitrification disproportionately due to altered oxygen dynamics*. PLoS ONE, 2011. **6**(3): p. e18508.
  78. Boers, P., *Studying the phosphorus release from the Loosdrecht Lakes sediments, using a continuous flow system*. Aquatic Ecology, 1986. **20**(1): p. 51-60.
  79. Smolders, A.J.P., et al., *Internal eutrophication: How it works and what to do about it - a review*. Chemistry and Ecology, 2006. **22**(2): p. 93-111.
  80. Varjo, E., et al., *A new gypsum-based technique to reduce methane and phosphorus release from sediments of eutrophied lakes: (Gypsum treatment to reduce internal loading)*. Water Research, 2003. **37**(1): p. 1-10.
  81. Genkai-Kato, M. and S.R. Carpenter, *Eutrophication due to phosphorus recycling in relation to lake morphometry, temperature, and macrophytes*. Ecology, 2005. **86**(1): p. 210-219.
  82. Schoumans, O.F., J. Willems, en G. van Duinhoven, *30 vragen en antwoorden over fosfaat in relatie tot landbouw en milieu*. 2008, Alterra: Wageningen. p. 53.
  83. Olesen, J.E. and M. Bindi, *Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy*. European Journal of Agronomy, 2002. **16**(4): p. 239-262.
  84. Howden, S.M., et al., *Adapting agriculture to climate change*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007. **104**(50): p. 19691-19696.
  85. Søndergaard, M., J.P. Jensen, and E. Jeppesen, *Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes*. Hydrobiologia, 2003. **506**(1-3): p. 135-145.

- 
86. Rozemeijer, J., J. Griffioen, en H. Passier, *De concentratie van fosfaat in regionaal kwelwater in Nederland*. 2005, TNO. p. 27.
  87. Rip, W., M. Ouboter, and H. Los, *Impact of climatic fluctuations on Characeae biomass in a shallow, restored lake in The Netherlands*. *Hydrobiologia*, 2007. **584**(1): p. 415-424.
  88. Van Luijn, F., et al., *Nitrogen fluxes and processes in sandy and muddy sediments from a shallow eutrophic lake*. *Water Research*, 1999. **33**(1): p. 33-42.
  89. Chang, H.J., *Water quality impacts of climate and land use changes in southeastern Pennsylvania*. *Professional Geographer*, 2004. **56**(2): p. 240-257.
  90. Jeppesen, E., et al., *Climate change effects on nitrogen loading from cultivated catchments in Europe: implications for nitrogen retention, ecological state of lakes and adaptation*. *Hydrobiologia*, 2011. **663**(1): p. 1-21.
  91. Bouraoui, F., et al., *Impact of Climate Change on the Water Cycle and Nutrient Losses in a Finnish Catchment*. *Climatic Change*, 2004. **66**(1): p. 109-126.
  92. Rustad, L., et al., *A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming*. *Oecologia*, 2001. **126**(4): p. 543-562.
  93. Smolders, A., et al., *How nitrate leaching from agricultural lands provokes phosphate eutrophication in groundwater fed wetlands: the sulphur bridge*. *Biogeochemistry*, 2010. **98**(1): p. 1-7.
  94. Caraco, N.F., J.J. Cole, and G.E. Likens, *Evidence for sulphate-controlled phosphorus release from sediments of aquatic systems*. *Nature*, 1989. **341**(6240): p. 316-318.
  95. Abdollahi, H. and D.B. Nedwell, *Seasonal temperature as a factor influencing bacterial sulfate reduction in a saltmarsh sediment*. *Microbial Ecology*, 1979. **5**(1): p. 73-79.
  96. Van Dam, H., *Acidification of three moorland pools in The Netherlands by acid precipitation and extreme drought periods over seven decades*. *Freshwater Biology*, 1988. **20**: p. 157-176.
  97. Smolders, A.J.P., et al., *Changes in pore water chemistry of desiccating freshwater sediments with different sulphur contents*. *Geoderma*, 2006. **132**(3-4): p. 372-383.
  98. Lucassen, E.C.H.E.T., A.J.P. Smolders, and J.G.M. Roelofs, *Effects of temporary desiccation on the mobility of phosphorus and metals in sulphur-rich fens: differential responses of sediments and consequences for water table management*. *Wetlands Ecology and Management*, 2005. **13**(2): p. 135-148.
  99. Cole, J.J., et al., *Carbon-Dioxide Supersaturation in the Surface Waters of Lakes*. *Science*, 1994. **265**(5178): p. 1568-1570.

- 
100. Duarte, C.M. and Y.T. Prairie, *Prevalence of heterotrophy and atmospheric CO<sub>2</sub> emissions from aquatic ecosystems*. *Ecosystems*, 2005. **V8(7)**: p. 862-870.
  101. Kosten, S., et al., *Climate-dependent CO<sub>2</sub> emissions from lakes*. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010. **24(2)**: p. GB2007.
  102. Gudasz, C., et al., *Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments*. *Nature*, 2010. **466(7305)**: p. 478-481.
  103. Zhang, J., et al., *Long-term patterns of dissolved organic carbon in lakes across eastern Canada: Evidence of a pronounced climate effect*. *Limnology and Oceanography*, 2010. **55(1)**: p. 30-42.
  104. Freeman, C., et al., *Export of organic carbon from peat soils*. *Nature*, 2001. **412(6849)**: p. 785-785.
  105. Jansson, M., et al., *Links between Terrestrial Primary Production and Bacterial Production and Respiration in Lakes in a Climate Gradient in Subarctic Sweden*. *Ecosystems*, 2008. **11(3)**: p. 367-376.
  106. Biddanda, B.A. and J.B. Cotner, *Love handles in aquatic ecosystems: The role of dissolved organic carbon drawdown, resuspended sediments, and terrigenous inputs in the carbon balance of Lake Michigan*. *Ecosystems*, 2002. **5(5)**: p. 431-445.
  107. Williamson, C.E. and K.C. Rose, *When UV Meets Fresh Water*. *Science*, 2010. **329(5992)**: p. 637-639.
  108. Zwolsman, G. en A. Doomen, *Waterkwaliteit van de Rijn en de Maas bij (extreem) lage afvoeren*. 2005, Kiwa N.V. Water Research: Nieuwegein.
  109. De Lyon, M.J.H. en J.G.M. Roelofs, *Waterplanten in relatie tot waterkwaliteit en bodemgesteldheid: deel 2*. 1986, Laboratorium voor Aquatische Oecologie, Katholieke Universiteit: Nijmegen. p. 126.
  110. Verberk, W.C.E.P., et al., *Milieu- en habitatpreferenties van Nederlandse zoetwatermacrofauna*, s.A. Werkgroep Ecologisch Waterbeheer (WEW), Editor. in prep.: Wageningen.
  111. Kennis voor Klimaat en Zuidwestelijke Delta, *Vraag en aanbod van zoetwater in de Zuidwestelijke Delta een verkenning*. 2009: Utrecht. p. 82.
  112. Klijn, F., et al., *Overstromingsrisico's in Nederland in een veranderend klimaat: Verwachtingen, schattingen en berekeningen voor het project Nederland Later*. 2007, WL | delft hydraulics: Delft. p. 165.
  113. Winder, M., J.E. Reuter, and S.G. Schladow, *Lake warming favours small-sized planktonic diatom species*. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*.
  114. Wanink, J., et al., *Invloed van klimaatverandering op fytoplankton van de Friese meren H2O*, 2008.

- 
115. Briers, R.A., J.H.R. Gee, and R. Geoghegan, *Effects of the North Atlantic Oscillation on growth and phenology of stream insects*. *Ecography*, 2004. **27**(6): p. 811-817.
  116. Lappalainen, J. and A.S. Tarkan, *Latitudinal gradients in onset date, onset temperature and duration of spawning of roach*. *Journal of Fish Biology*, 2007. **70**(2): p. 441-450.
  117. Schippers, P., M. Lürling, and M. Scheffer, *Increase of atmospheric CO<sub>2</sub> promotes phytoplankton productivity*. *Ecology Letters*, 2004. **7**(6): p. 446-451.
  118. Paerl, H.W. and J. Huisman, *Blooms like it hot*. *Science*, 2008. **320**(5872): p. 57-58.
  119. Paerl, H.W. and J. Huisman, *Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms*. *Environmental Microbiology Reports*, 2009. **1**(1): p. 27-37.
  120. Jöhnk, K.D., et al., *Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria*. *Global Change Biology*, 2008. **14**(3): p. 495-512.
  121. Lürling, M., et al., *Comparison of cyanobacterial and green algal growth rates at different temperatures*. submitted.
  122. Lürling, M. en H. Van Dam, *Blauwalgen: giftig groen : de biologie en risico's van cyanobacteriën* B.v.d. Wal, Editor. 2009, STOWA: Utrecht. p. 48.
  123. Lürling, M., J.F.X. Oosterhout, en W. Beekman, *Blauwalgen in stadswateren: verkennend onderzoek naar blauwalgenbloei in de woonomgeving*, in *Blauwalgen in stadswateren: verkennend onderzoek naar blauwalgenbloei in de woonomgeving*. 2008, Wageningen University and Research Center and STOWA: Wageningen. p. 90.
  124. Caraco, N.F. and R. Miller, *Effects of CO<sub>2</sub> on competition between a cyanobacterium and eukaryotic phytoplankton*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1998. **55**(1): p. 54-62.
  125. Van de Waal, D.B., et al., *The ecological stoichiometry of toxins produced by harmful cyanobacteria: an experimental test of the carbon-nutrient balance hypothesis*. *Ecology Letters*, 2009. **12**(12): p. 1326-1335.
  126. Sommer, U. and K. Lengfellner, *Climate change and the timing, magnitude, and composition of the phytoplankton spring bloom*. *Global Change Biology*, 2008. **14**(6): p. 1-10.
  127. Preston, N. and J. Rusak, *Homage to Hutchinson: does inter-annual climate variability affect zooplankton density and diversity?* *Hydrobiologia*, 2010. **653**(1): p. 165-177.
  128. Iglesias, C., et al., *High predation is of key importance for dominance of small-bodied zooplankton in warm shallow lakes: evidence from lakes, fish enclosures and surface sediments*. *Hydrobiologia*, 2011. **667**(1): p. 133-147.



- 
129. Blenckner, T., et al., *Large-scale climatic signatures in lakes across Europe: a meta-analysis*. *Global Change Biology*, 2007. **13**(7): p. 1314-1326.
  130. Adrian, R., S. Wilhelm, and D. Gerten, *Life-history traits of lake plankton species may govern their phenological response to climate warming*. *Global Change Biology*, 2006. **12**(4): p. 652-661.
  131. Winder, M. and D.E. Schindler, *Climate change uncouples trophic interactions in aquatic ecosystems*. *Ecology*, 2004. **85**(8): p. 2100-2106.
  132. Scheffer, M., *Ecology of Shallow Lakes*. 1 ed. Population and Community Biology. 1998, London: Chapman and Hall. 357.
  133. De Senerpont Domis, L., et al., *Can overwintering versus diapausing strategy in Daphnia determine match-mismatch events in zooplankton-algae interactions?* *Oecologia*, 2007. **150**(4): p. 682-698.
  134. Jeppesen, E., M. Søndergaard, and J.P. Jensen, *Climatic warming and regime shifts in lake food webs - some comments*. *Limnology and Oceanography*, 2003. **48**(3): p. 1346-1349.
  135. Van Donk, E., L. Santamaria, and W.M. Mooij, *Climate warming causes regime shifts in lake food webs: A reassessment*. *Limnology and Oceanography*, 2003. **48**(3): p. 1350-1353.
  136. Straille, D. and R. Adrian, *The North Atlantic Oscillation and plankton dynamics in two European lakes - two variations on a general theme*. *Global Change Biology*, 2000. **6**(6): p. 663-670.
  137. Feuchtmayr, H., et al., *Differential effects of warming and nutrient loading on the timing and size of the spring zooplankton peak: an experimental approach with hypertrophic freshwater mesocosms*. *Journal of Plankton Research*, 2010.
  138. Van Dam, H., A. Mertens, and J. Sinkeldam, *A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands*. *Neth. J. Aquat. Ecol.*, 1994. **28**: p. 117-133.
  139. Veraart, A.J., et al., *Algal response to nutrient enrichment in a forested oligotrophic stream*. *Journal of Phycology*, 2008. **44**(3): p. 564-572.
  140. Verdonchot, P.F.M. and M. van den Hoorn, *Using discharge dynamics characteristics to predict the effects of climate change on macroinvertebrates in lowland streams*. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010. **29**(4): p. 1491-1509.
  141. Meerhoff, M., et al., *Can warm climate-related structure of littoral predator assemblies weaken the clear water state in shallow lakes?* *Global Change Biology*, 2007. **13**(9): p. 1888-1897.



- 
142. Jones, J.I. and C.D. Sayer, *Does the fish-invertebrate-periphyton cascade precipitate plant loss in shallow lakes?* Ecology, 2003. **84**(8): p. 2155-2167.
  143. Brönmark, C., S.P. Klosiewski, and R.A. Stein, *Indirect effects of predation in a freshwater benthic food chain.* Ecology, 1992. **73**(5): p. 1662-1674.
  144. Vaquer-Sunyer, R. and C.M. Duarte, *Temperature effects on oxygen thresholds for hypoxia in marine benthic organisms.* Global Change Biology, 2010: p. no-no.
  145. Durance, I. and S.J. Ormerod, *Evidence for the role of climate in the local extinction of a cool-water trichad.* Journal of the North American Benthological Society, 2010. **29**(4): p. 1367-1378.
  146. Van Dam, H., *De droogte van 1976 en de natuur in Nederland.* H2O: tijdschrift voor watervoorziening en afvalwaterbehandeling, 1978. **11**(13): p. 278-281.
  147. Dingemanse, N.J. and V.J. Kalkman, *Changing temperature regimes have advanced the phenology of Odonata in the Netherlands.* Ecological Entomology, 2008. **33**(3): p. 394-402.
  148. Jackson, L.J., et al., *A comparison of shallow Danish and Canadian lakes and implications of climate change.* Freshwater Biology, 2007. **52**(9): p. 1782-1792.
  149. Kosten, S., et al., *Climate-related differences in the dominance of submerged macrophytes in shallow lakes.* Global Change Biology, 2009. **15**: p. 2503-2517.
  150. Scheffer, M., M.R. De Redelijkheid, and F. Noppert, *Distribution and dynamics of submerged vegetation in a chain of shallow eutrophic lakes.* Aquatic Botany, 1992. **42**: p. 199-216.
  151. Rooney, N. and J. Kalf, *Inter-annual variation in submerged macrophyte community biomass and distribution: the influence of temperature and lake morphometry.* Aquatic Botany, 2000. **68**(4): p. 321-335.
  152. Kosten, S., et al., *Ambiguous climate impacts on the competition between submerged macrophytes and phytoplankton in shallow lakes.* Freshwater Biology, 2011.
  153. Beklioglu, M., *Water level control over submerged macrophyte development in five shallow lakes of Mediterranean Turkey.* Archiv für Hydrobiologie, 2006. **166**(4): p. 535-556.
  154. Blindow, I., *Long- and short-term dynamics of submerged macrophytes in two shallow eutrophic lakes.* Freshwater Biology, 1992. **28**(1): p. 15-27.
  155. Van Geest, G., et al., *Long Transients Near the Ghost of a Stable State in Eutrophic Shallow Lakes with Fluctuating Water Levels.* Ecosystems, 2007. **10**(1): p. 37-47.
  156. Brouwer, E., et al., *Vennen kunnen verzuipen.* H2O, 2008. **41**(19): p. 35-37.
  157. Smolders, A.J.P., E.C.H.E.T. Lucassen, and J.G.M. Roelofs, *The isoetid environment: Biogeochemistry and threats.* Aquatic Botany, 2002. **73**(325-350).

- 
158. Wright, J.F., et al., *Response of the flora and macroinvertebrate fauna of a chalk stream site to changes in management*. *Freshwater Biology*, 2003. **48**(5): p. 894-911.
  159. McKee, D., et al., *Response of freshwater microcosm communities to nutrients, fish, and elevated temperature during winter and summer*. *Limnology and Oceanography*, 2003. **48**(2): p. 707-722.
  160. Adams, M.S. and M.D. McCracken, *Seasonal Production of the Myriophyllum Component of the Littoral of Lake Wingra, Wisconsin*. *Journal of Ecology*, 1974. **62**(2): p. 457-465
  161. F.H.J.L., B. en J.G.M. Roelofs, *Waterplanten en Waterkwaliteit*. 1988, Utrecht: Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging.
  162. Krause-Jensen, D. and K. Sand-Jensen, *Light attenuation and photosynthesis of aquatic plant communities*. *Limnology and Oceanography*, 1998. **43**(3): p. 396-407.
  163. Sand-Jensen, K., T. Binzer, and A.L. Middelboe, *Scaling of photosynthetic production of aquatic macrophytes - a review*. *Oikos*, 2007. **116**(2): p. 280-294.
  164. Schippers, P., et al., *The effect of atmospheric carbon dioxide elevation on plant growth in freshwater ecosystems*. *Ecosystems*, 2004. **7**(1): p. 63-74.
  165. Spierenburg, P., et al., *Could rising aquatic carbon dioxide concentrations favour the invasion of elodeids in isoetid-dominated softwater lakes?* *Freshwater Biology*, 2009. **54**(9): p. 1819-1831.
  166. Speelman, E.N., et al., *The Eocene arctic Azolla bloom: environmental conditions, productivity and carbon drawdown*. *Geobiology*, 2009. **7**: p. 155-170.
  167. Barko, J.W. and R.M. Smart, *Comparative influences of light and temperature on the growth and metabolism of selected submersed fresh water macrophytes*. *Ecological Monographs*, 1981. **51**(2): p. 219-236.
  168. Nicolle, A., *Spring dynamics in shallow lakes: the role of plankton, fish and macrophytes in a changing climate*. Doctoral thesis Lund University Science. Section of Biological and Earth Sciences. Department of Ecology. *Limnology*. 2010, Lund. 116.
  169. Beijer, A.J., C. Caranicola en E.T.H.M. Peeters, *Waterkwaliteit in de Wielen Westerveld en Vis te Elden*. 2007, Wageningen Universiteit: Wageningen. p. 29.
  170. Scheffer, M., et al., *Small habitat size and isolation can promote species richness: second-order effects on biodiversity in shallow lakes and ponds*. *Oikos*, 2006. **112**(1): p. 227-231.
  171. Jeppesen, E., et al., *Impacts of climate warming on lake fish community structure and dynamics, and potential ecosystem effects*. *Hydrobiologia*, 2010. **646**: p. 73-90.
  172. Lund, S.S., et al., *Rapid changes in fish community structure and habitat distribution*

- 
- following the precipitation of lake phosphorus with aluminium. *Freshwater Biology*, 2010. **55**(5): p. 1036-1049.
173. Magnuson, J.J., et al., *Potential effects of climate changes on aquatic systems: Laurentian Great Lakes and Precambrian Shield Region*. *Hydrological Processes*, 1997. **11**(8): p. 825-871.
  174. Daufresne, M., et al., *Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River: effects of climatic factors*. *Global Change Biology*, 2004. **10**(1): p. 124-140.
  175. Kerkum, L.C.M., et al., *Effecten van koelwater op het zoete aquatische milieu 2004*: Lelystad. p. 94.
  176. Persson, L., *Temperature-induced shift in foraging ability in two fish species, Roach (*Rutilus rutilus*) and Perch (*Perca fluviatilis*): implications for coexistence between poikilotherms*. *Journal of Animal Ecology*, 1986. **55**: p. 829-839.
  177. Jeppesen, E., et al., *Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: changes along a phosphorus gradient*. *Freshwater Biology*, 2000. **45**(2): p. 201-218.
  178. Hartmann, J. and W. Nuemann, *Percids of Lake Constance, a lake undergoing eutrophication*. *J Fish Res Board Can*, 1977. **34**(10): p. 1670-1677.
  179. Persson, L., et al., *Shifts in fish communities along the productivity gradient of temperate lakes – patterns and the importance of size-structured interactions*. *Journal of Fish Biology*, 1991. **38**(2): p. 281-293.
  180. Behrens, M.D. and K.D. Lafferty, *Temperature and diet effects on omnivorous fish performance: implications for the latitudinal diversity gradient in herbivorous fishes*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2007. **64**(6): p. 867-873.
  181. Mooij, W.M., L.N.D.S. Domis, and S. Hulsmann, *The impact of climate warming on water temperature, timing of hatching and young-of-the-year growth of fish in shallow lakes in the Netherlands*. *Journal of Sea Research*, 2008. **60**(1-2): p. 32-43.
  182. Weijden, W.J.v.d., R. Leewis, and P. Bol, *Indicatoren voor 'Convention on Biodiversity 2010' Indicatoren voor het invasieproces van exotische organismen in Nederland*, in *Werkdocument 53.6, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu*. 2007, Centrum voor Landbouw en Milieu: Wageningen. p. 44.
  183. De Lange, H.J., G.H.P. Arts, en W.C.E.P. Verberk, *Verkenning CBD 2010-indicatoren zoetwater. Inventarisatie en uitwerking relevante indicatoren voor Nederland*, in *Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOT-werkdocument 122*. 2008: Wageningen. p. 73.

- 
184. Anoniem, *Convenant waterplanten 23 februari 2010 Nr. NLP/2010/1031*. Staatscourant, 2010. **11341**(21 juli): p. 6.
185. Compendium voor de leefomgeving, *Exoten in zoetwater: vissen*, in *Dossier Vissen*. 2009.
186. Leuven, R., et al., *The river Rhine: a global highway for dispersal of aquatic invasive species*. *Biological Invasions*, 2009. **11**(9): p. 1989-2008.
187. Gherardi, F., S. Barbaresi, and G. Salvi, *Spatial and temporal patterns in the movement of *Procambarus clarkii*, an invasive crayfish*. *Aquatic Sciences - Research Across Boundaries*, 2000. **62**(2): p. 179-193.
188. Barbaresi, S. and F. Gherardi, *The Invasion of the Alien Crayfish *Procambarus Clarkii* in Europe, with Particular Reference to Italy*. *Biological Invasions*, 2000. **2**(3): p. 259-264.
189. Wiedner, C., et al., *Climate change affects timing and size of populations of an invasive cyanobacterium in temperate regions*. *Oecologia*, 2007. **152**(3): p. 473-484.
190. Edwards, M. and A.J. Richardson, *Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch*. *Nature*, 2004. **430**(7002): p. 881-884.
191. Hustings, F., et al., *Watervogels in Nederland 2007/2008*. SOVON Monitoringrapport 2009/2. SOVON Vogelonderzoek Nederland. 2009, SOVON: Beek-Ubbergen.
192. Eisenreich, S.J.E., *Climate change and the European Water Dimension. Report to the European Water Directors*. 2005, European Commission-Joint Research Centre: Ispra, Italy. p. 253.
193. Ter Heerdt, G.N.J., et al., *Climate change and the EU Water Framework Directive : how to deal with indirect effects of changes in hydrology on water quality and ecology?* *Water science and technology* 2007. **56**(4): p. 19-26.
194. Jensen, H.S. and F.O. Andersen, *Importance of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from aerobic sediments of 4 shallow, eutrophic lakes*. *Limnology and Oceanography*, 1992. **37**(3): p. 577-589.
195. Havens, K.E. and C.L. Schelske, *The importance of considering biological processes when setting total maximum daily loads (TMDL) for phosphorus in shallow lakes and reservoirs*. *Environmental Pollution*, 2001. **113**(1): p. 1-9.
196. Portielje, R., *Check op klimaatrobustheid van maatregelen van de Stroomgebiedbeheerplannen (2009-2015) van de Europese KRW*. 2009, Rijkswaterstaat Waterdienst: Lelystad. p. 31.
197. Van Kouwen, L. en M. Maarse, *Verkenning naar de gevolgen van klimaatverandering en klimaatadaptatiemaatregelen op KRW en Natura 2000 maatregelen en doelen*. 2010, Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat Waterdienst: Utrecht. p. 38.

- 
198. Veraart, A.J., et al., *Influence of warming and plant presence on denitrification in temperate and subtropical lakes*. in prep.
  199. Veraart, A.J., et al., *Effects of aquatic vegetation type on denitrification*. *Biogeochemistry*, 2010. 104(1): p. 267-274.
  200. Van De Waal, D.B., et al. (2011), Reversal in competitive dominance of a toxic versus non-toxic cyanobacterium in response to rising CO<sub>2</sub>. *International Society of Microbial Ecology*, 5, 1438-1450.

.....

**stowa**

STICHTING  
TOEGEPAST ONDERZOEK WATERBEHEER

[stowa@stowa.nl](mailto:stowa@stowa.nl) [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)  
TEL 033 460 32 00 FAX 033 460 32 01  
Stationsplein 89 3818 LE AMERSFOORT  
POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT



WAGENINGEN UNIVERSITY  
WAGENINGEN **UR**

