

rapport

klimaatscan

Ruurd Noordhuis, Sacha de Rijk, Gerben van Geest, Maaïke Maarse, Sophie Vergouwen, en Arjen Boon
tekst redactie: Moniek Löffler - bureau Landwijzer

Inhoud

	<i>Samenvatting</i>				
	Introductie	5			
1	Sturende factoren van klimaatverandering	7	4.3	Effecten van klimaatverandering in het IJsselmeergebied	26
2	Huidige en toekomstige drukfactoren	9	4.3.1	Inleiding	26
2.1	Werken met klimaatscenario's	9	4.3.2	Toenemende temperatuur	26
2.2	Temperatuurstijging	10	4.3.3	Zeespiegelstijging	27
2.2.1	Scenario's	10	4.3.4	Veranderende patronen in neerslag, rivierafvoer en verdamping	28
2.2.2	Veranderingen tot nu toe	10	4.3.5	Veranderende windpatronen	28
2.3	Zeespiegelstijging	13	4.3.6	Instraling	28
2.3.1	Scenario's	13	4.3.7	Verzuring	29
2.3.2	Veranderingen tot nu toe	13	5	Het riviereengebied	30
2.4	Veranderingen in patronen van neerslag en rivierafvoer	14	5.1	Specifieke kenmerken van het gebied	30
2.4.1	Scenario's	14	5.2	Relevante ontwikkelingen naast klimaatverandering	31
2.4.2	Veranderingen tot nu toe	14	5.2.1	Veranderingen in waterkwaliteit	31
2.5	Wind	16	5.2.2	Volledige bedijking	31
2.5.1	Scenario's	16	5.2.3	Geen natuurlijke verjonging van het winterbed	31
2.5.2	Veranderingen tot nu toe	16	5.2.4	Rivierinsnijding	32
2.6	Mist en instraling	17	5.2.5	Verstoorde sedimentbalans	32
2.6.1	Scenario's	17	5.2.6	Vegetatie-onderhoud	32
2.6.2	Veranderingen tot nu toe	17	5.3	Effecten van klimaatverandering voor het riviereengebied	33
2.7	Verzuring van zeewater	18	5.3.1	Toenemende temperatuur	33
2.7.1	Scenario's	18	5.3.2	Zeespiegelstijging	33
2.7.2	Veranderingen tot nu toe	18	5.3.3	Veranderende patronen in rivierafvoer, neerslag en verdamping	33
3	Impact op waterkwaliteit en ecologie	19	5.3.4	Veranderende windpatronen en verzuring	35
3.1	Impact van temperatuur	19	5.3.5	Instraling	35
3.2	Koolstofcyclus en broeikasgassen	21	6	De Waddenzee en Eems-Dollard	36
3.3	Zeespiegelstijging	21	6.1	Specifieke kenmerken van het gebied	36
3.4	Exoten	22	6.2	Relevante ontwikkelingen naast klimaatverandering	38
3.5	Afname van diversiteit	23	6.3	Effecten van klimaatverandering	39
3.6	Effect op KRW en Natura 2000	23	6.3.1	Temperatuurstijging	39
4	Het IJsselmeergebied	24	6.3.2	Zeespiegelstijging	39
4.1	Specifieke kenmerken van het gebied	24	6.3.3	Veranderingen in patronen van neerslag en rivierafvoer	40
4.2	Relevante ontwikkelingen naast klimaatverandering	25	6.3.4	Veranderende windpatronen	40
4.2.1	Veranderingen in waterkwaliteit	25	6.3.5	Instraling	41
4.2.2	Veranderingen in gebruik	25	6.3.6	Verzuring van zeewater	41
			7	De Zuidwestelijke Delta	42
			7.1	Specifieke kenmerken van het gebied	42
			7.2	Relevante ontwikkelingen naast klimaatverandering	43
			7.2.1	Veranderingen in waterkwaliteit	43
			7.2.2	Veranderingen in inrichting en gebruik	44
			7.3	Effecten van klimaatverandering in de Zuidwestelijke Delta	46
			7.3.1	Inleiding	46
			7.3.2	Toenemende temperatuur	46
			7.3.3	Zeespiegelstijging	47
			7.3.4	Veranderende patronen in neerslag, rivierafvoer en verdamping	48
			7.3.5	Veranderende windpatronen	49
			7.3.6	Instraling	49
			7.3.7	Verzuring	49
			8	Werken aan robuustheid	50
			8.1	Versterking van de klimaat-robuustheid	50
			8.2	Werken aan robuustheid in het IJsselmeergebied	51
			8.2.1	Diversiteit	51
			8.2.2	Connectiviteit	52
			8.2.3	Dynamiek	52
			8.2.4	Waterkwaliteit	53
			8.3	Werken aan robuustheid in het riviereengebied	53
			8.3.1	Diversiteit	54
			8.3.2	Connectiviteit	54
			8.3.3	Dynamiek	54
			8.3.4	Waterkwaliteit	54
			8.4	Werken aan robuustheid in de Waddenzee en Eems-Dollard	55
			8.4.1	Diversiteit	55
			8.4.2	Connectiviteit	56
			8.4.3	Dynamiek	56
			8.4.4	Waterkwaliteit	56
			8.5	Werken aan robuustheid in de Zuidwestelijke Delta	57
			8.5.1	Diversiteit	57
			8.5.2	Connectiviteit	58
			8.5.3	Dynamiek	58
			8.5.4	Waterkwaliteit	58
			8.6	Betekenis voor het klimaatkompas	59
			9	Referenties	60

Samenvatting

Welke gevolgen heeft klimaatverandering voor grote wateren in Nederland en hoe kan de klimaatrobuustheid daarvan worden vergroot? Deze vraag staat centraal in dit rapport. De onderstaande infographics geven een samenvatting in 5 figuren: het eerste figuur beschrijft basisprocessen op wereldschaal, de klimatologische gevolgen daarvan voor Noordwest-Europa en de consequenties daar weer van voor onze grote wateren. De vier vervolfiguren zoomen in op de vier hoofdwatersystemen: IJsselmeergebied, Rivierengebied, Waddenzee en Eems-Dollard en Zuidwestelijke Delta. Er wordt belicht hoe kwetsbaar de systemen op korte en lange termijn zijn en welke maatregelen kwetsbaarheid kunnen verminderen.

Ga naar infographic Klimaatscan

Basisprocessen

Klimaatverandering wordt niet alleen gestuurd door de toename van broeikasgassen, maar ook door natuurlijke fluctuaties in wind, temperatuur en neerslag. Deze worden veroorzaakt door periodieke veranderingen in de temperatuur van het oceaanwater en in luchtstromingen boven de Atlantische Oceaan. Daarnaast speelt de luchtkwaliteit een rol. Doordat deze sinds 1980 is verbeterd – waarbij met name de concentratie zwaveldioxide is afgenomen –

zijn het zicht en de instraling vergroot.

Deze mechanismen beïnvloeden elkaar, waardoor veranderingen soms versterkt en abrupt optreden.

Lokale processen en gevolgen voor onze grote wateren

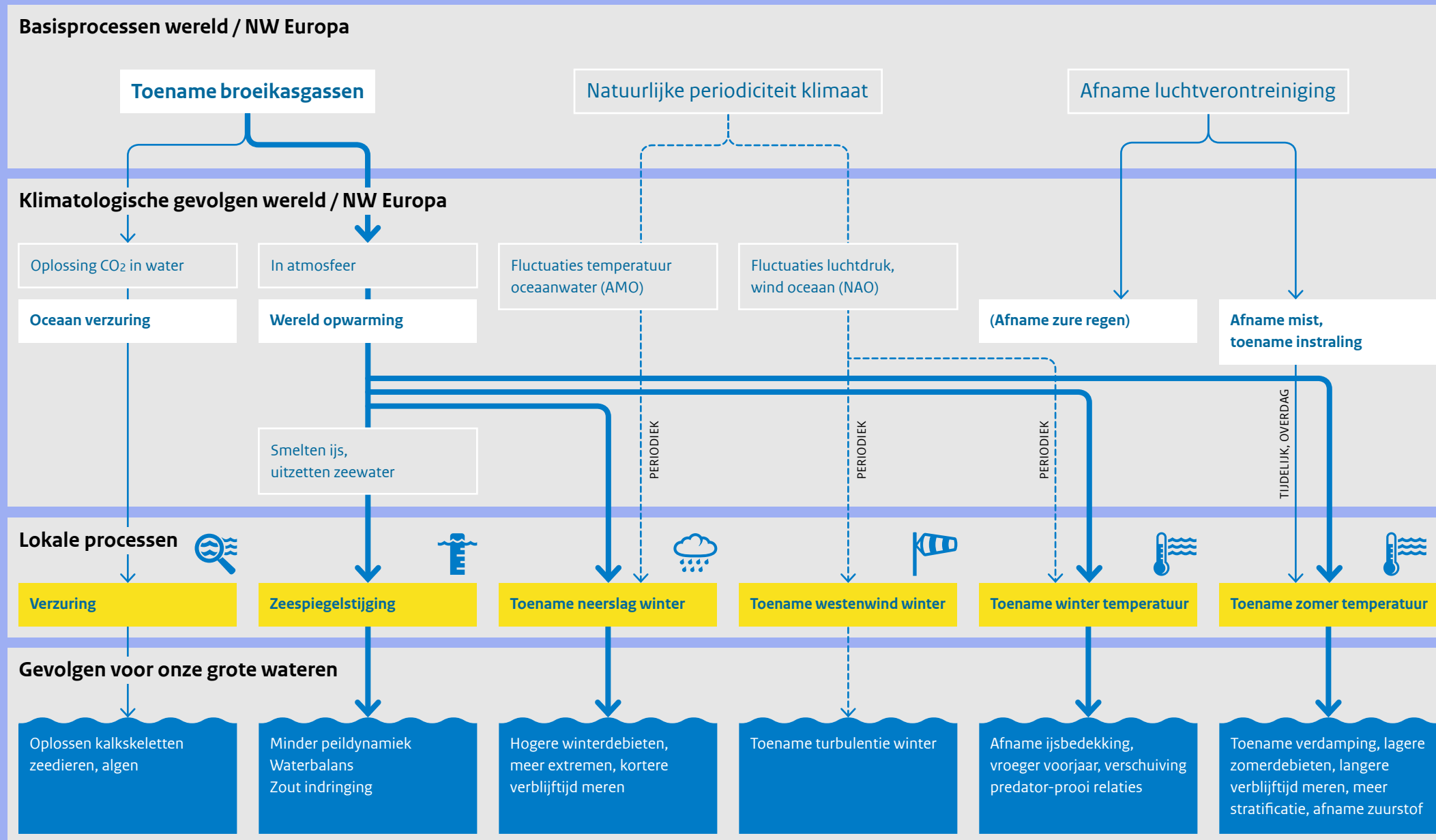
De belangrijkste gevolgen van de toename van broeikasgassen zijn de verzuring van de oceanen en de opwarming van de atmosfeer. De verzuring van oceanen kan effecten hebben op de oplosbaarheid van kalkskeletten van plankton en allerlei ongewervelde dieren. In de Nederlandse wateren lijkt dit effect op korte termijn ondergeschikt te zijn aan andere gevolgen van klimaatverandering, zoals de wereldwijde opwarming van de atmosfeer.

De opwarming van de atmosfeer heeft de volgende gevolgen voor onze grote wateren:

- De zeespiegel stijgt, doordat het zeewater uitzet en het poolijs smelt. Dat heeft zowel effect op de waterveiligheid, als op de afvoermogelijkheden van de rivieren en de aanvoer van brak water. De kunstwerken die worden aangelegd om deze problemen het hoofd te bieden, kunnen tot gevolg hebben dat de waterpeilen van de binnenwateren nog strakker worden gereguleerd. De natuurlijke dynamiek en diversiteit in deze wateren kunnen daardoor afnemen.
- De verwachte toename in de winterneerslag zorgt voor hogere rivierdebieten en meer extremen. In de winter neemt daardoor de verblijftijd van het water in de meren af. Periodiek wordt dit proces

versterkt door veranderingen in de temperatuur van het oceaanwater (AMO = Atlantische Multidecadale Oscillatie).

- In de zomer is de situatie juist omgekeerd. Door de stijging van de zomertemperatuur nemen de rivierdebieten af terwijl de verdamping toeneemt. De toename van instraling – door verbetering van de luchtkwaliteit – versterkt dit proces. Deze factoren zorgen in de zomer voor langere verblijftijden van het water in de meren. Mede door toenemende watertemperatuur neemt de kans op stratificatie en zuurstoftekorten toe.
- Er treden periodieke veranderingen in windrichting en -sterkte op, waarbij de westenwind in de winter toeneemt. Dat heeft direct effect op de golf- en stromingsdynamiek van de ondiepe meren en op het evenwicht tussen de sedimentatie en opwerveling van zand en slib. De verminderde ijsbedekking versterkt de impact van deze westenwinden.
- Ook de toename van de wintertemperatuur wordt periodiek versterkt door veranderingen in luchtstromingen boven de Atlantische Oceaan (NAO = Noord Atlantische Oscillatie). Met name in perioden met meer westenwind is er hierdoor minder kans op ijs. De afgelopen decennia neemt de temperatuur daardoor al in het vroege voorjaar sterk toe. Plant- en diersoorten reageren hier verschillende op, waardoor “mismatches” kunnen ontstaan in de relaties tussen prooien en predatoren. Dat is bijvoorbeeld het geval als voedsel nog niet (of juist niet meer) beschikbaar is op het moment dat eieren uitkomen.



Uitwerking per gebied

De kwetsbaarheid voor de gevolgen van klimaatverandering verschilt per hoofdwatersysteem en daarmee ook de maatregelen die kunnen worden genomen om de klimaatrobustheid te vergroten. Dit is samengevat in een infographic per watersysteem. Hierin is met kleurcodes aangegeven hoe kwetsbaar het systeem is voor de verschillende gevolgen van klimaatverandering, op kortere termijn (2050) en lange termijn (2100). Waar mogelijk of relevant zijn vervolgens maatregelen aangegeven waarmee de betreffende druk kan worden weerstaan.

In veel gevallen zijn specifieke maatregelen niet beschikbaar, en bestaat de meest zinvolle aanpak uit het in bredere zin versterken van de ‘klimaatrobustheid’ van het betreffende systeem. Die aanpak bestaat uit het versterken van de vier pijlers van robuustheid: herstel van natuurlijke verbindingen, vergroten van de (habitat)diversiteit, herstel van dynamiek (bijv. peilfluctuaties) en het verbeteren van de waterkwaliteit. De uitwerking hiervan is afhankelijk van de specifieke kenmerken van het (hoofd)watersysteem.

IJsselmeergebied

Aan de Afsluitdijk heeft zeespiegelstijging effect op de spuiomogelijkheden. Het huidige streefpeil, waar de infrastructuur langs de oevers van Noord-Holland, Flevoland en Friesland op is ingesteld, kan op den duur alleen worden gehandhaafd met behulp van pompinstallaties. Daarmee ontstaat ook de mogelijkheid dit streefpeil

strakker te handhaven dan tot nu toe het geval was. Voor de ecologie is het goed om dan toch fluctuaties te blijven toelaten. De meren, met name het ondiepe en slibrijke Markermeer, zijn gevoelig voor veranderingen in windrichting en -snelheid, maar ook in stormfrequentie. Dergelijke veranderingen zijn vooral periodiek, maar afname van de kans op ijs door temperatuur toename geeft ook een doorgaande toename van turbulentie in de meren, met mogelijke gevolgen voor de water – bodem interactie (consolidatie en opwerveling, vlokvorming van slib en algen). Verder geeft opwarming verlenging van het groeiseizoen met kans op verstoring van predator-prooi relaties (“mismatching”). In de zomer neemt de kans op algenbloei en op stratificatie met zuurstoftekorten toe. Meer doorspoeling en een lager zomerpeil zouden daartegen kunnen helpen. Andere effecten moeten worden opgevangen door de systemen robuuster te maken via inrichting (diversiteit, connectiviteit) en peilfluctuaties.

Ga naar infographic IJsselmeergebied

Rivierengebied

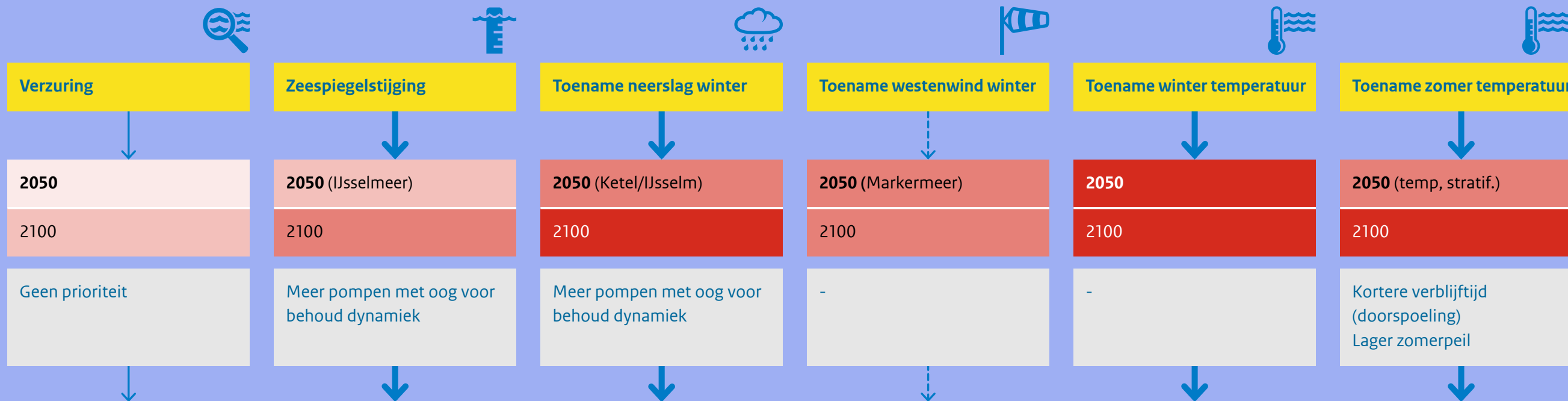
De rivieren zijn minder gevoelig voor veranderingen in windpatronen dan de meren, maar gevoeliger voor veranderingen in neerslag. Toename van de afvoer in de winter kan gevolgen hebben voor erosie (insnijding) en sedimentatiepatronen, maar ook voor de relatie met kwel vanuit de omgeving en de relaties tussen zomer- en winterbed (inundatie, meestromen van nevengeulen). Vooral toename van

verdamping kan uiteindelijk lagere zomerdebieten betekenen. Tijdens hittegolven kan de stroming nagenoeg stil komen te vallen (Maas) en kunnen meer-achtige processen optreden zoals algenbloei en zuurstoftekort door toenemende mineralisatie. In combinatie met zeespiegelstijging kan dat benedenstrooms een toename van zoutinvloed betekenen, waarbij brak- en zoetwater getijdegebieden tevens kunnen “verdrinken”. Vooral de effecten van toenemende afvoer in de winter kunnen worden opgevangen door stroombedverruiming, verlaging van de uiterwaarden en herstel van nevengeulen en strangen. Dit kan worden gecombineerd met het verwijderen van zomerkades en het ontsteden van oevers, maar ook met de aanleg van langsdammen tegen rivierinsnijding.

Ga naar infographic Rivierengebied

Waddenzee en Eems-Dollard

Anders dan de binnenwateren heeft de Waddenzee rechtstreeks te maken met zeespiegelstijging. Die wordt vooral in de westelijke Waddenzee op den duur mogelijk niet meer bijgehouden door de aangroei van de platen, met verlies van intergetijdenatuur als gevolg. Meer nog dan de meren en rivieren heeft de Waddenzee te maken met verschuivingen in soortsaamenstelling. Diverse vis- en vogelsoorten hebben hun leefgebied al noordwaarts verschoven. Afname van de strengheid van winters heeft negatief effect op de aanwas van kokkels en mosselen en positief effect op wormen, met gevolgen voor de



Vergroten van weerstand door vergroten dynamiek en diversiteit:

- Meer ondieptes en dieptegradiënten
- Ruimtelijke spreiding en samenhang natuurontwikkeling
- Meer peildynamiek in land-water overgangsgebieden, met verschillen tussen jaren
- Herstel van verbinding met achterland
- Terugbrengen van zoutgradiënten

Pijlers van klimaatrobustheid:

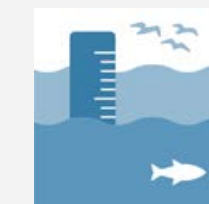
Natuurlijke verbindingen



Vergroten diversiteit



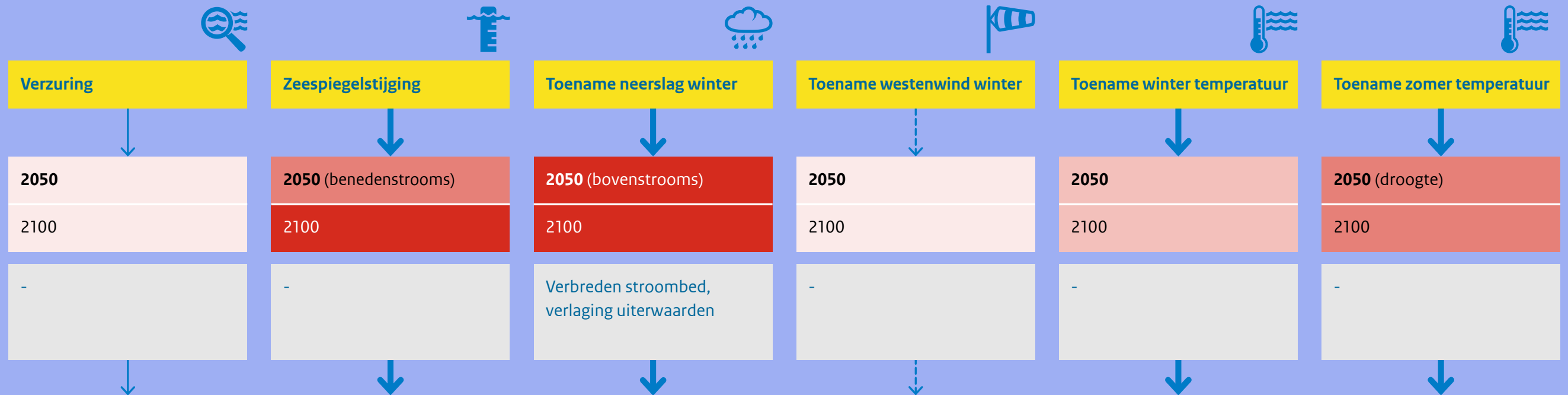
Herstel van dynamiek



Verbeteren waterkwaliteit



Niet kwetsbaar
 Matig kwetsbaar
 Kwetsbaar
 Zeer kwetsbaar



Vergroten van weerstand door vergroten dynamiek en diversiteit:

- Meer functionele land-water overgangen, verwijderen zomerkades, verlagen uiterwaarden
- Ontsteden van oevers voor terugkeer natuurlijke processen en soorten
- Vergroten areaal laag-dynamische habitats door uiterwaardverlaging en -vergroting, water vasthouden buiten de zomerdijk
- Aanleg / herstel van nevengeulen en strangen
- Aanleg langsdammen tegen rivier insnijding

Pijlers van klimaatrobustheid:

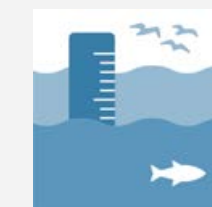
Natuurlijke verbindingen



Vergroten diversiteit



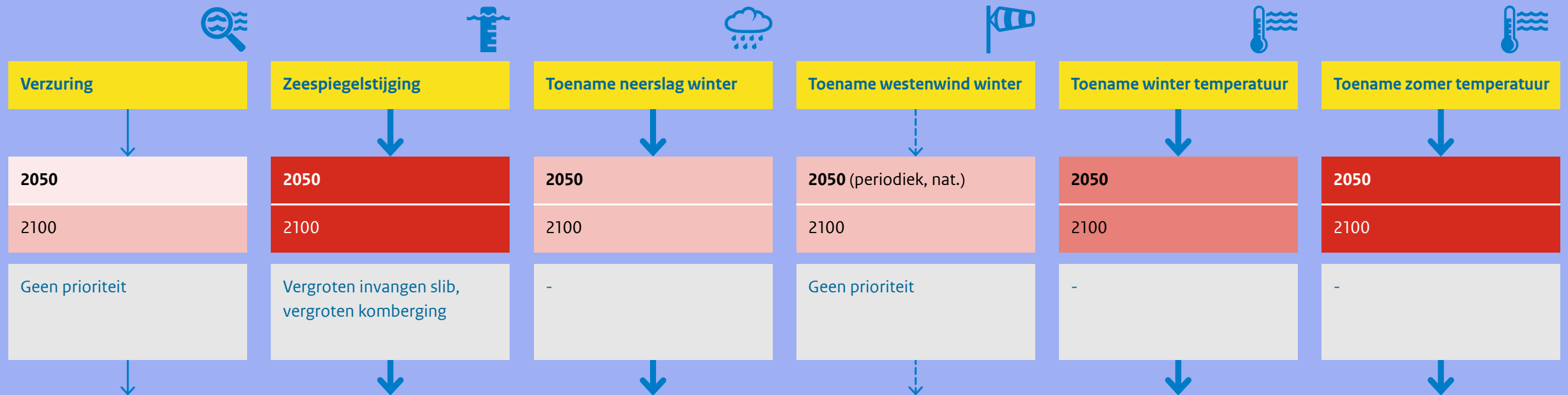
Herstel van dynamiek



Verbeteren waterkwaliteit



■ Niet kwetsbaar ■ Matig kwetsbaar ■ Kwetsbaar ■ Zeer kwetsbaar



Vergroten van weerstand door vergroten dynamiek en diversiteit:

- Verzachten overgangen, verzilten binnendijks, vergroten kwelders
- Invangen slib buitendijks voor minder slib in Eems-Dollard
- Vergroten mossel- en oesterbanken voor diversiteit en slibhuishouding
- Herstellen zoutgradienten en vistrek mogelijkheden
- Aanleg langsdammen tegen rivier insnijding

Pijlers van klimaatrobustheid:

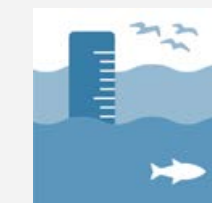
Natuurlijke verbindingen



Vergroten diversiteit



Herstel van dynamiek



Verbeteren waterkwaliteit



■ Niet kwetsbaar ■ Matig kwetsbaar ■ Kwetsbaar ■ Zeer kwetsbaar

Samenvatting

voedselvoorziening van vis en vogels. In de zomer kunnen zuurstoftekorten optreden. In delen van het Waddengebied (Marsdiep) neemt het zoutgehalte af door toename van de rivierafvoer in de winter. De ecologische gevolgen hiervan zijn beperkt. Veranderingen in windpatronen zijn van invloed op erosie en sedimentatiepatronen en ook op de waterstand, maar deze veranderingen zijn in principe periodiek. Veranderingen in de zuurgraad zijn vooralsnog vooral een gevolg van verschuivingen in waterkwaliteit en de dynamiek van organisch materiaal. Zinnige maatregelen zijn het vergroten van de komberging van de Waddenzee, het verzachten van harde overgangen (natuurlijke kwelders) en het invangen van slib, bijvoorbeeld in combinatie met het vergroten van het areaal van mossel- en oesterbanken.

Ga naar infographic Waddenzee en Eems-Dollard

Zuidwestelijke Delta

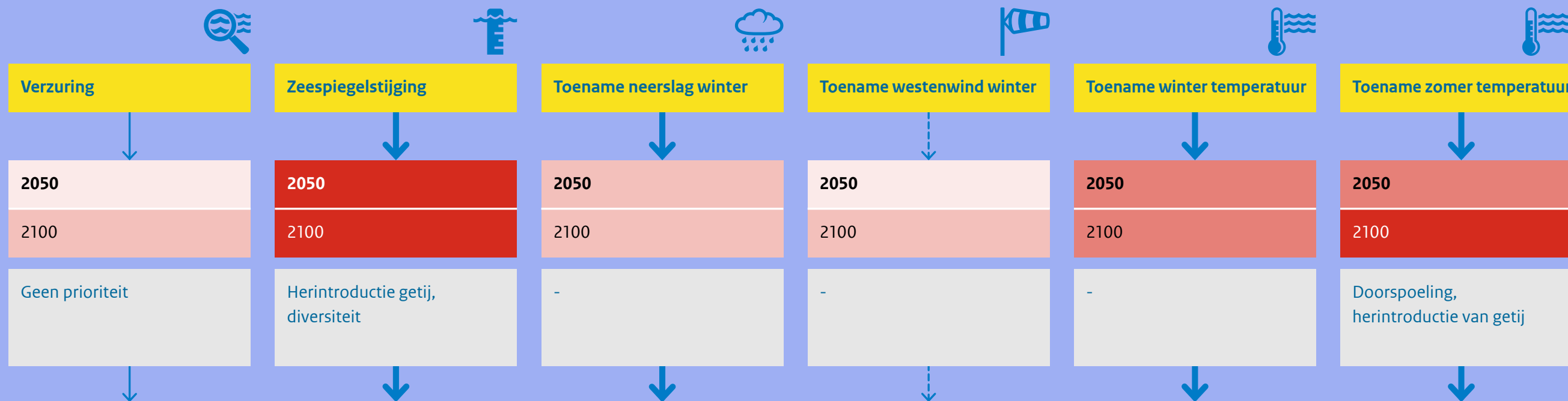
De zuidwestelijke delta is zeer divers, met zoute, brakke en zoete wateren met een verschillende mate van dynamiek, ruimtelijke diversiteit en connectiviteit. Een deel van de effecten is vergelijkbaar met die in het IJsselmeergebied, zoals toename van de kans op algenbloei, stratificatie en zuurstoftekort in het Volkerak en in de Grevelingen. Meer dan elders zijn er effecten op de overgang van zout naar zoet en op de brakke en zoete getijdegebieden, juist ook in combinatie met maatregelen zoals de doorspoeling van het Veerse

Meer en de Kier in het Haringvliet. Door de stijging van de zeespiegel zullen stormvloedkeringen vaker gesloten moeten worden waardoor vistrek belemmerd kan worden en grotere fluctuaties in zoutgehaltes kunnen optreden. Het bodemleven kan daardoor worden geschaad. In wateren zoals het Volkerak kan in droge zomers de doorspoeling verslechteren met algenbloei als gevolg. Ook de Westerschelde kan in zulke situaties vertroebelen. Herintroductie van getij kan in enkele



deltawateren een belangrijk instrument zijn om de klimaatrobustheid te vergroten. Hetzelfde geldt voor het versterken van gradiënten en het verzachten van overgangen, bijvoorbeeld door ontpolderingen en het versterken van intergetijdenatuur.

Ga naar infographic Zuidwestelijke delta



Vergroten van weerstand door vergroten dynamiek en diversiteit:

- Herintroductie getij
- Versterken ruimtelijke diversiteit (bijv. natuureilanden)
- Ontpoldering t.b.v. intergetijdenatuur
- Herstel van zoutgradienten en vistrek mogelijkheden

Pijlers van klimaatrobustheid:

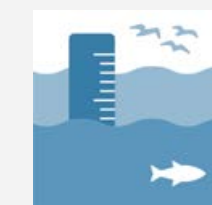
Natuurlijke verbindingen



Vergroten diversiteit



Herstel van dynamiek



Verbeteren waterkwaliteit



■ Niet kwetsbaar ■ Matig kwetsbaar ■ Kwetsbaar ■ Zeer kwetsbaar

Introductie

Toekomstbestendige grote wateren waar hoogwaardige natuur goed samengaat met een krachtige economie. Dat is de ambitie van 33 projecten die worden uitgevoerd in het kader van de programmatische aanpak grote wateren (PAGW). Door klimaatverandering neemt de druk op de grotere wateren toe. Hierdoor kan de ecologische waterkwaliteit, ondanks de kaderrichtlijn water (KRW) maatregelen, verslechteren. Daarom is het belangrijk voor KRW en PAGW om te weten wat die effecten van klimaatverandering op de ecologische waterkwaliteit kunnen zijn. Hiervoor is voorliggende klimaatscan uitgevoerd. Deze geeft een overzicht van kenmerken van klimaatverandering en effecten op de Nederlandse grote wateren.

De grote waterstaatkundige ingrepen in de vorige eeuw maakten Nederland veilig en welvarend. Ze maakten de rivieren geschikt als hoofdtransportassen, brachten bescherming tegen hoogwater en zorgden voor een strategische voorraad zoet water voor landbouw, natuur en drinkwaterbereiding. De grote ingrepen hebben ook een keerzijde. In grote wateren zoals Grevelingen, Eems-Dollard, Waddenzee, Oosterschelde, Rijn en Maas en IJsselmeergebied veranderden de natuurlijke stromen van water, zand en slib en daarmee de ecologische waterkwaliteit en de natuur. Kenmerkende leefgebieden in een delta voor planten en dieren - zoals de afwisseling van ondiepe delen en diepe geulen, overstromingsvlaktes, intergetij-

dengebieden en moeras - gingen verloren en migratieroutes werden geblokkeerd. Daarvoor in de plaats kwamen nieuwe leefgebieden in de vorm van zoete en zoute meren, gestuwde rivieren en een halfopen zeearm zoals de Oosterschelde.

Begin 2018 hebben de ministers van infrastructuur en waterstaat en landbouw, natuur en voedselkwaliteit de ambitie uitgesproken om tot 2050 diverse maatregelen te nemen die nodig zijn om te komen tot “toekomstbestendige grote wateren waar hoogwaardige natuur goed samengaat met een krachtige economie”. De maatregelen zijn voornamelijk gericht op het terugbrengen van de natuurlijke dynamiek van het water en de ecologische processen die daarbij horen.

Klimaat als uitdaging

Naast waterstaatkundige ingrepen zijn er meer factoren die het ecologische functioneren van de grote wateren beïnvloeden, waaronder klimaatverandering. Dit document – de klimaatscan – geeft een overzicht van kenmerken van klimaatverandering en effecten op de Nederlandse grote wateren. De effecten verschillen per type watersysteem: een estuarium is vooral gevoelig voor zeespiegelstijging, een meer voor temperatuurstijging en de rivieren zijn weer kwetsbaar voor veranderingen in afvoer en dicht bij zee voor zoutindringing. Er is daarom gekozen voor een uitsplitsing naar vier watersystemen: het IJsselmeergebied (h. 5), het rivierengebied (h. 6), de Waddenzee en Eems-Dollard (h.7) en de Zuidwestelijke Delta (h. 8). Dit zijn vier relevante systemen voor PAGW.

De focus ligt op de fysische drukfactoren die van belang zijn voor het ecologisch functioneren van een watersysteem in de brede zin van het woord, dat wil zeggen inclusief land-water overgangen en overstromingszones. Sociaaleconomische gevolgen, bijvoorbeeld voor de drinkwatervoorziening, de aan- en afvoer van landbouwwater, de opbrengst van visserij of recreatiemogelijkheden worden hier niet besproken.

De klimaatscan is geschreven voor en met input van PAGW-betrokkenen. Tijdens overleggen met gebruikers hebben de auteurs wensen en vragen opgehaald en is gereflecteerd op conceptversies. De inhoudelijke check is gedaan via een viertal gesprekken met experts buiten Deltares. De klimaatscan is gebaseerd op bestaande en beschikbare kennis, zowel nationaal als internationaal. Veel figuren zijn gemaakt op basis van data van het KNMI en Rijkswaterstaat.



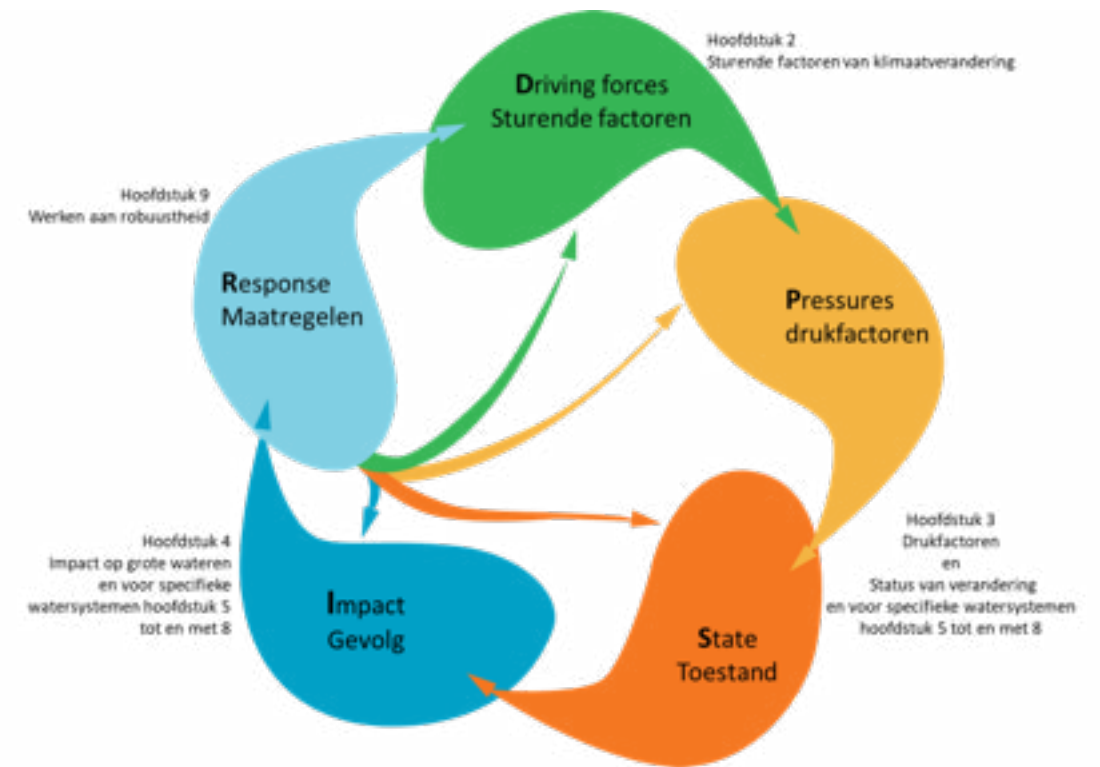
Introductie

Kwalitatief of kwantitatief?

De analyse in dit document heeft een sterk kwalitatieve insteek. Dit komt voort uit het doel om een algemene inventarisatie te maken van mogelijke klimaateffecten op de Nederlandse grote wateren. Naast de voorliggende klimaatscan heeft het PAGW-programma ook behoefte aan meer kwantitatieve inzichten, om PAGW-projecten en maatregelen tegen elkaar af te wegen en te beoordelen: wat levert het meest klimaat robuuste systeem op? Daartoe wordt binnen het PAGW-programma een 'klimaatkompas' ontwikkeld, met de klimaatscan als uitgangspunt. Het klimaatkompas zal die aspecten kwantificeren die hieruit als meest relevant naar voren komen (zie paragraaf 7.6).

Het DPSIR-model

Om verbanden tussen sturende factoren van veranderingen en effecten op de ecologie in samenhang te bespreken maken we gebruik van het DPSIR-concept van de European Environment Agency (EEA). DPSIR staat voor Driving Forces, Pressures, State, Impact and Response. Daarbij zijn 'driving forces' de sturende factoren van klimaatverandering en 'pressures' de drukfactoren die door klimaatverandering ontstaan. Die veranderende drukfactoren bepalen de toestand van het systeem, de 'state'. Onder de noemer van 'impact' worden de consequenties bepaald en de betekenis voor de gestelde doelen en eventuele risico's. Indien nodig volgt er een 'response' om de impact te verkleinen. Dit kunnen technische maatregelen zijn, maar dat hoeft niet per se. Een maatregel kan ingrijpen op de sturende factoren, drukfactoren, toestand of impact. In de figuur hiernaast is de DPSIR-cyclus geschetst. Deze dient eveneens als een leeswijzer voor de klimaatscan.



De DPSIR-cyclus (als rode draad in de klimaatscan).



1 Sturende factoren van klimaatverandering

Wereldwijd verandert het klimaat. Dit gebeurt door natuurlijke factoren, maar sinds het midden van de twintigste eeuw vooral door de invloed van de mens. Dit hoofdstuk spitst zich toe op klimaatverandering in Nederland. Daarbij worden twee factoren besproken die het KNMI samenvat als de belangrijkste ‘driving forces’: de wereldwijde opwarming én veranderingen in lucht- en oceaanstromingen.

Wereldwijde opwarming

De belangrijkste oorzaak van de wereldwijde opwarming is de toename van broeikasgassen, met name CO₂. Broeikasgassen absorberen warmtestraling en zorgen voor een toename van de temperatuur in lagere lagen van de atmosfeer. De concentratie CO₂ in de atmosfeer is sinds het begin van de industriële revolutie met 45% toegenomen. Dit

heeft er wereldwijd toe geleid dat de temperatuur aan de grond 0,9°C is gestegen; op het noordelijk halfrond is de opwarming met een hele graad nog iets sterker. Daarbij is de temperatuuroename min of meer gelijk verdeeld over het jaar (figuur 1.1)

Veranderingen in lucht- en oceaanstromingen

Behalve wereldwijde opwarming spelen ook veranderingen in lucht- en oceaanstromingen een rol bij de klimaatverandering in een bepaalde regio, zoals Nederland. Hoewel nog maar gedeeltelijk wordt begrepen in hoeverre de natuurlijke fluctuaties van deze stromingen door klimaatverandering worden beïnvloed, hebben deze wel een grote invloed op de regionale temperatuur- en neerslagverandering.

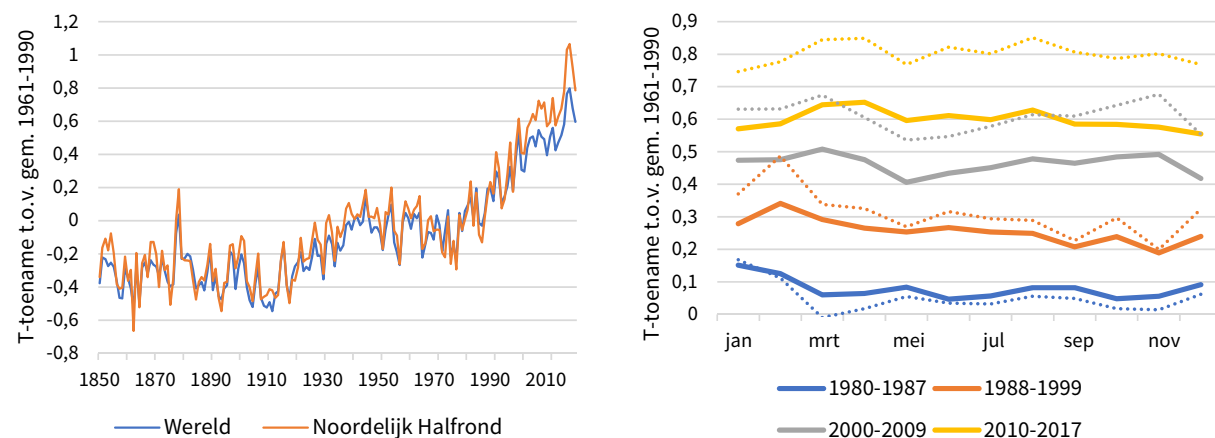
Schommelingen in tijd en ruimte

Er zijn grote verschillen in het verloop van klimaatgrootheden zoals

temperatuur, neerslag of zeespiegelstand tussen de verschillende delen van de wereld. Natuurlijke schommelingen in oceaan- en luchtstromingen, variaties in bijvoorbeeld landgebruik of de hoeveelheid stofdeeltjes in de atmosfeer, fluctuaties in de warmteopslag in oceanen: al deze factoren spelen een rol.

In onze regio heeft onder meer de Atlantische Multidecadale Oscillatie (AMO) invloed: een natuurlijke cyclus in de zeewatertemperatuur van de Noord-Atlantische Oceaan (Van Oldenborgh et al., 2009). De temperatuurvariaties wijken enigszins af van die van de Stille Oceaan. De AMO heeft waarschijnlijk invloed op neerslagpatronen in Noordwest-Europa. Neerslag wordt echter ook beïnvloed door de wereldwijde opwarming zelf, omdat in warme lucht meer waterdamp kan worden opgeslagen.

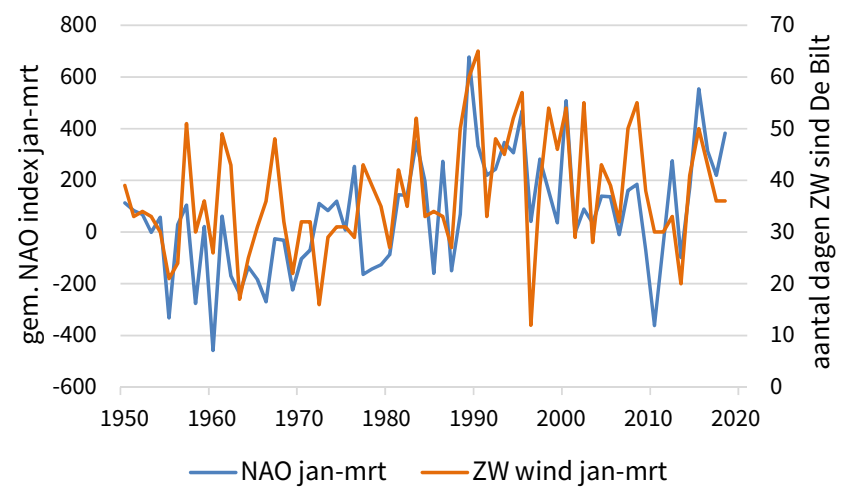
Voor het klimaat in Nederland zijn variaties in de aanvoer van lucht vanaf de Atlantische Oceaan van groot belang. Als maat hiervoor wordt vaak de Noord Atlantische Oscillatie (NAO) gebruikt; deze geeft het verschil in luchtdruk weer tussen de Azoren en IJsland. Bij een groot drukverschil is de NAO-index positief en krijgt Noordwest-Europa veel (zuid)westenwind. Deze wind voert warme Atlantische lucht aan, wat zorgt voor relatief hoge temperaturen en zachte winters. Een overgang van de NAO naar de ‘positieve fase’ omstreeks 1988 heeft in deze periode dan ook bijgedragen aan een versnelling van de opwarming van Nederland (Noordwest-Europa) ten opzichte van de wereldwijde trend (zie paragraaf 2.2.2). Er is veel literatuur over deze ‘shift’, ook



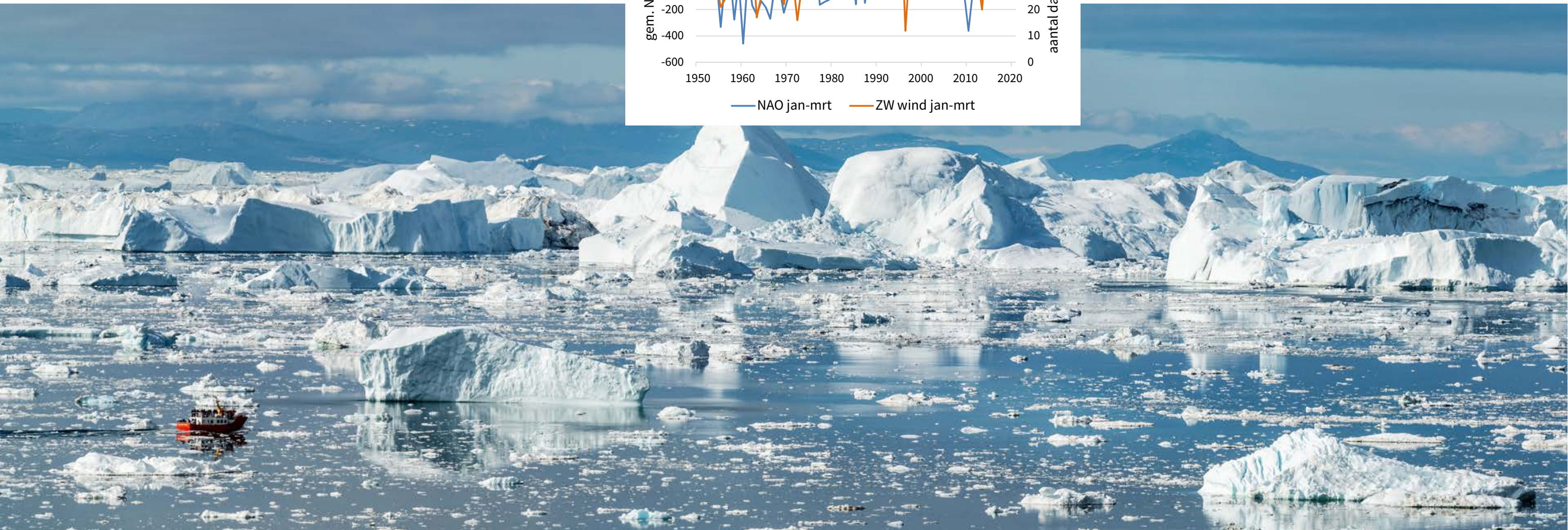
Figuur 1.1. Wereldwijde opwarming. Links: temperatuurtoename op wereldschaal en op het noordelijk halfrond, uitgedrukt in graden verschil ten opzichte van de gemiddelde waarde over de periode 1961-1990. Rechts: verdeling van de temperatuurtoename over het jaar. De doorgetrokken lijnen geven de wereldwijde situatie weer en de onderbroken lijnen de situatie op het noordelijk halfrond. Gegevens Hadley Centre (Brohan et al., 2005).

1 Sturende factoren van klimaatverandering

met betrekking tot effecten op ecologie (bijvoorbeeld: (Laat & Cork, 2013; Reid, 2016; Alheit et al., 2005)). In de zomer is de invloed van de NAO kleiner, omdat het weer van West-Europa dan niet alleen door de luchtaanvoer wordt bepaald maar ook door bijvoorbeeld lokale feedback processen tussen land en atmosfeer.



Figuur 1.2. Gemiddelde NAO-index voor de maanden januari t/m maart en het aantal dagen zuidwestenwind in deze periode in De Bilt (vectorgemiddelde windrichting per etmaal tussen 180 en 270 graden). Gegevens www.knmi.nl.



2 Huidige en toekomstige drukfactoren

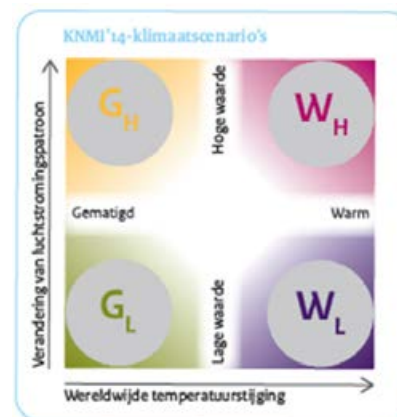
Dit hoofdstuk beschrijft zes drukfactoren voor Nederland die voortkomen uit klimaatverandering: temperatuurstijging, zeespiegelstijging, veranderingen in patronen van neerslag en rivierafvoer, windklimaat, mist/zonnestraling en verzuring van het water. Per drukfactor komen zowel de scenario's voor Nederland aan bod, als de huidige status ofwel toestand.

2.1 Werken met klimaatscenario's

Hoe het klimaat exact gaat veranderen en welk weer daarbij hoort, is onbekend. Daarom wordt gebruik gemaakt van klimaatscenario's, die verschillende, plausibele beelden geven van de mogelijke richting waarin het klimaat en de bijbehorende weerfenomenen kunnen veranderen. De scenario's hebben geen voorspellende waarde, maar zijn zeer geschikt om de weerbaarheid van natuur en samenleving voor veranderende klimaatomstandigheden te verkennen.

KNMI-scenario's 2014

Het KNMI heeft wereldwijde modelprojecties en onderzoeksresultaten vertaald naar scenario's voor Nederland. De wereldwijde temperatuurstijging en veranderingen in luchtstromingen vormen de basis voor deze 'KNMI 2014 scenario's' (figuur 2.1). Ze geven de verandering rond 2050 en 2085 weer ten opzichte van het klimaat in de periode 1981-2010. De scenario's beschrijven zowel een aantal generieke als scenario-specifieke veranderingen.



Figuur 2.1. De KNMI-klimaatscenario's uit 2014. De vier scenario's verschillen in de mate waarin de wereldwijde temperatuur stijgt ('gematigd' en 'warm') en de mogelijke verandering van het luchtstromingspatroon ('lage waarde' en 'hoge waarde').

Hoewel de KNMI-scenario's verschillen, hebben ze ook overeenkomsten: de temperatuur blijft stijgen, het tempo van zeespiegelstijging neemt toe, zachte winters en hete (droge) zomers komen vaker voor, de (extreme) winterneerslag neemt toe, de intensiteit van extreme regenbuien in de zomer neemt toe, hagel en onweer worden heviger.

Deltascenario's

Op basis van de KNMI-klimaatscenario's en toekomstverkenningen welvaart en leefomgeving -scenario's zijn Deltascenario's ontwikkeld, die mogelijke toekomstbeelden voor waterbeheer schetsen voor zowel klimatologische als sociaaleconomische ontwikkelingen, inclusief de

onzekerheden. Daarbij worden gevolgen beschreven voor onder meer de rivierafvoeren, verstedelijking, landgebruik en opgaven voor waterveiligheid en zoetwatervoorziening (meer informatie over de Deltascenario's op www.deltacommissaris.nl).

Het zichtjaar van de Deltascenario's is 2050, met een doorkijk naar het einde van de eeuw. Deze Deltascenario's kunnen behulpzaam zijn bij het identificeren en selecteren van kansrijke strategieën om klimaatverandering het hoofd te bieden. De Deltascenario's zijn in de eerste plaats bedoeld voor gebruik binnen het Deltaprogramma.



2 Huidige en toekomstige drukfactoren

2.2 Temperatuurstijging

2.2.1 Scenario's

Volgens de KNMI-scenario's gaat de opwarming van Nederland door. Zachte winters en hete (droge) zomers komen vaker voor. Het verloop van de wereldwijde opwarming hangt uiteraard sterk af van de uitstoot van broeikasgassen. Het IPCC introduceerde in 2014 de representative concentration pathways (RCP's). Dit zijn afgeleide broeikasgasemissies en veranderingen in landgebruik, die voortkomen uit verschillende scenario's van mondiale socio-economische ontwikkelingen. Het al dan niet slagen van de emissie-reductieafspraken uit 2015 speelt daarbij een rol van betekenis. In deze scenario's varieert de wereldwijde toename van de luchttemperatuur van circa 1,5 tot 4°C in 2100.

In 2015 sloten 195 landen het 'klimaatakkoord van Parijs'. Het akkoord heeft als belangrijkste doelstelling dat de opwarming van de aarde beperkt moet blijven tot ruim beneden 2 graden in 2100. Het streven daarbij is dat de temperatuur niet meer dan 1,5 graad oploopt: dit is de limiet die cruciaal geacht wordt voor de poolgebieden, koraalriffen en bewoners van laag liggende eilanden en kuststreken.

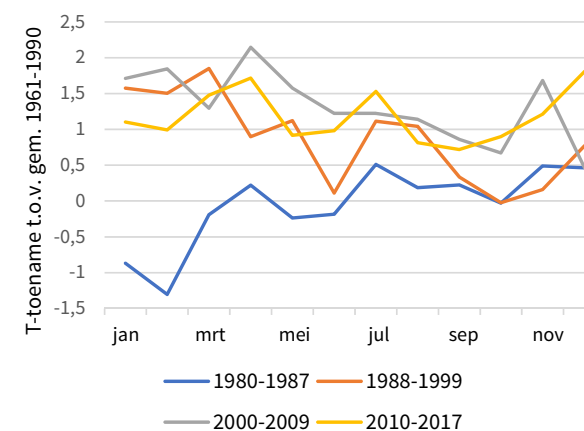
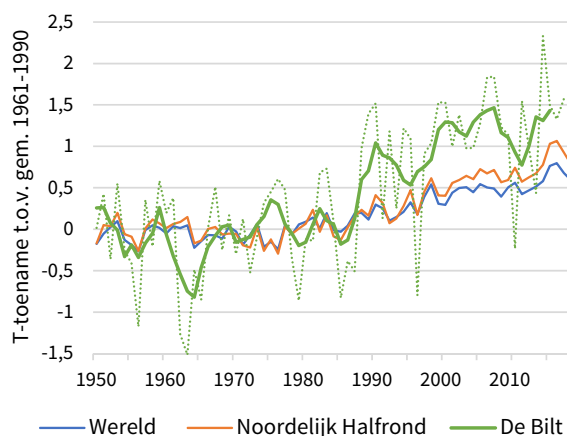
Het IPCC-rapport 'global warming of 1.5°C' (2018) laat zien dat er bij de huidige 0,9°C opwarming al sterke effecten zichtbaar zijn en dat de verschillen tussen 1,5 en 2°C enorm zijn. Beperking tot 1,5°C opwarming is technisch mogelijk, maar zal een nooit eerder vertoonde wereldwijde inspanning vragen. De menselijke CO₂-emissie zou in

2030 met 45% gedaald moeten zijn en in 2050 met 100%, eventueel door actieve verwijdering uit de atmosfeer.

2.2.2 Veranderingen tot nu toe

In Nederland zijn gedurende de afgelopen eeuw de veranderingen in een aantal klimaatvariabelen aanzienlijk sterker geweest dan gemiddeld op wereldschaal. Dat geldt voor de opwarming, maar mogelijk ook voor de verzuring van de Noordzee (zie paragraaf 2.7). Bij een opwarming van 0,9°C op wereldschaal (2006-2015 t.o.v. 1850-1900) steeg de temperatuur in Nederland met bijna 1,7°C (figuur 2.2).

In de tweede helft van de jaren '80 van de vorige eeuw was vooral een versterking van temperatuurtoename in de wintermaanden te zien. Geleidelijk heeft deze versterkte toename zich ook in de zomer voltrokken. Dit zijn twee min of meer afzonderlijke processen met de volgende oorzaken:

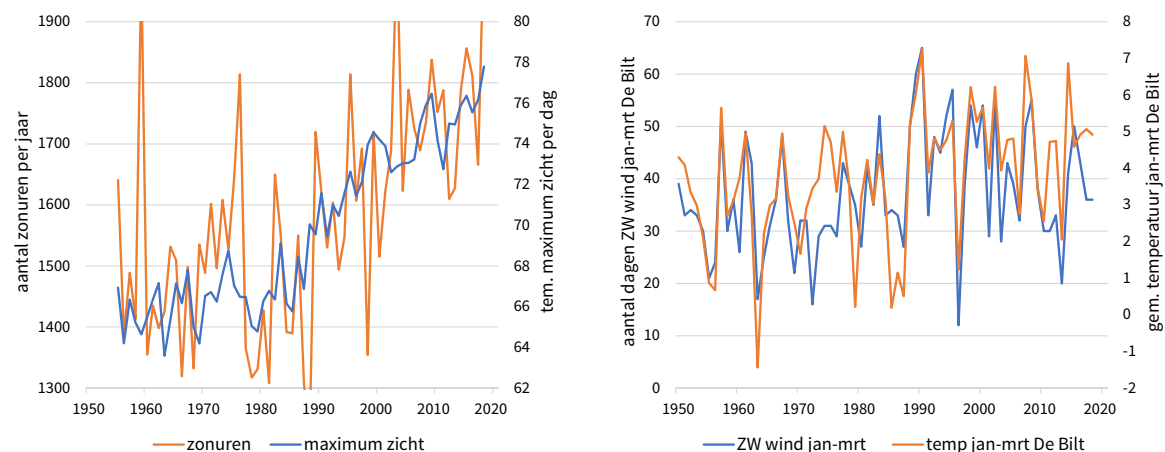


Figuur 2.2. Versterkte opwarming in Nederland.
De linker grafiek toont de temperatuurtoename in De Bilt, vergeleken met de toename op wereldschaal en op het noordelijk halfrond (gegevens Hadley Centre, aangevuld naar Brohan et al., 2005). De temperatuurtoename is hierbij uitgedrukt in graden verschil met de gemiddelde waarde over de periode 1961-1990. De rechtergrafiek laat zien hoe de temperatuurtoename in De Bilt over het jaar is verdeeld. Gegevens www.knmi.nl.

Versterkte temperatuurstijging in de zomer

De versterkte toename van de zomertemperatuur begon omstreeks 1980, maar voltrok zich geleidelijk. Dit hangt waarschijnlijk samen met de verbetering van de luchtkwaliteit, vooral met de afname van zwaveldioxide. Door bepaalde chemische reacties in de atmosfeer vormt dit gas 'sulfaat-aerosolen', deeltjes in de lucht die als condensatiekern dienen voor waterdamp. Die deeltjes zorgen voor verstrooiing en terugkaatsing van zonlicht, waardoor de lucht minder opwarmt. Luchtverontreiniging heeft de opwarming in de jaren 1960 en 1970 dus vertraagd. Vanaf 1980 verbeterde de luchtkwaliteit, en dat is duidelijk terug te zien in de afname van mist en de toename van zicht, zonuren en instraling (figuur 2.3). De verbetering van de luchtkwaliteit is nog steeds gaande en zorgt voor extra opwarming in de daglichturen. Dit proces bereikt natuurlijk uiteindelijk een limiet; de lucht kan niet oneindig schoner blijven worden.

2 Huidige en toekomstige drukfactoren



Figuur 2.3. Versterkte opwarming in winter en zomer.

Links: oorzaken van de versterkte opwarming in de zomer. Vanaf 1980 was er een geleidelijke toename van het gemiddeld maximum zicht per dag en het totaal aantal zonuren per jaar in De Bilt.

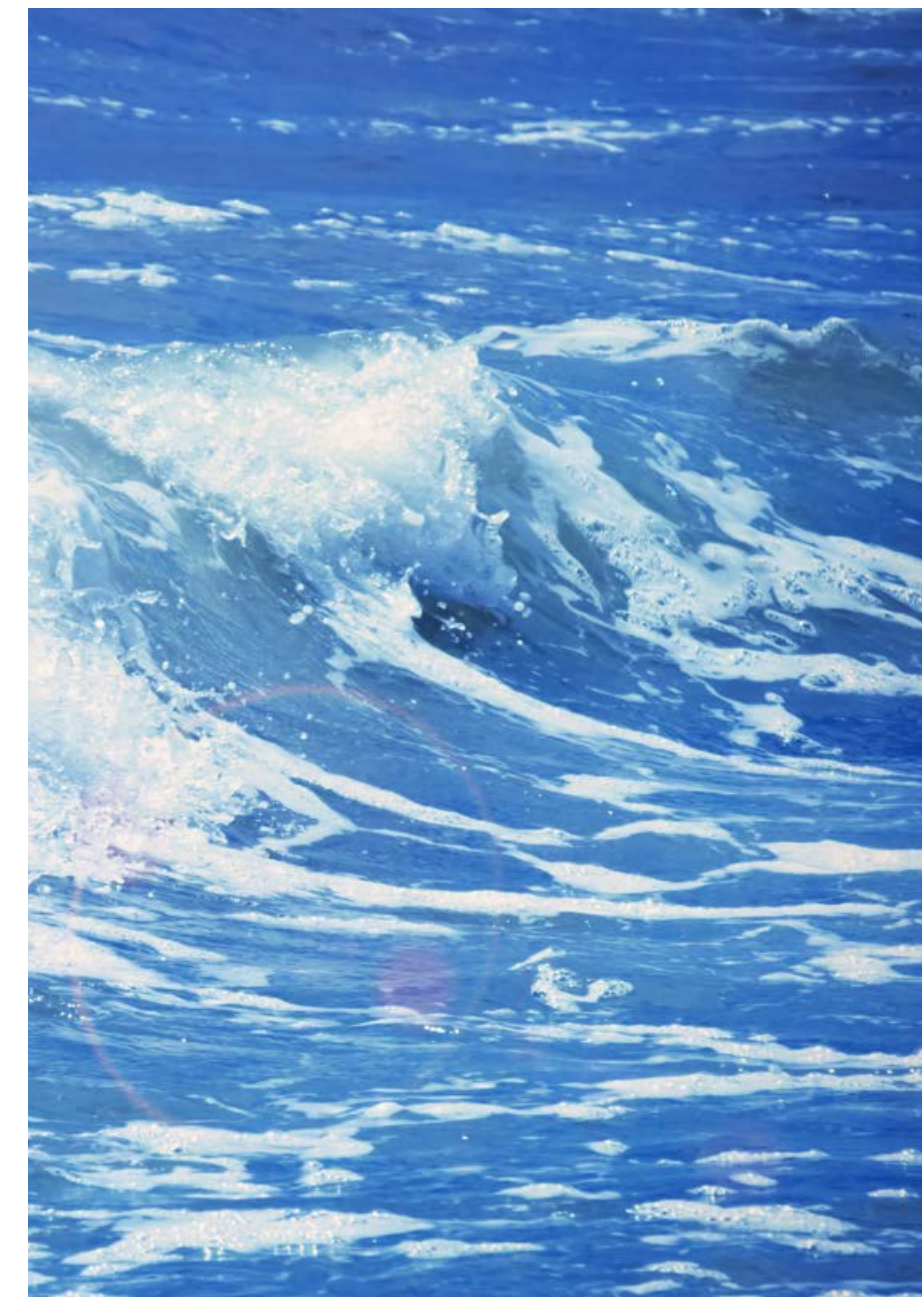
Rechts: versterkte opwarming in de winter en de frequentie van wind uit zuidwestelijke richting. De figuur laat in 1988 een abrupte toename zien van het aantal dagen met zuidwestenwind en de gemiddelde temperatuur in De Bilt in januari – maart. Gegevens www.knmi.nl.

Versterkte temperatuurstijging in de winter

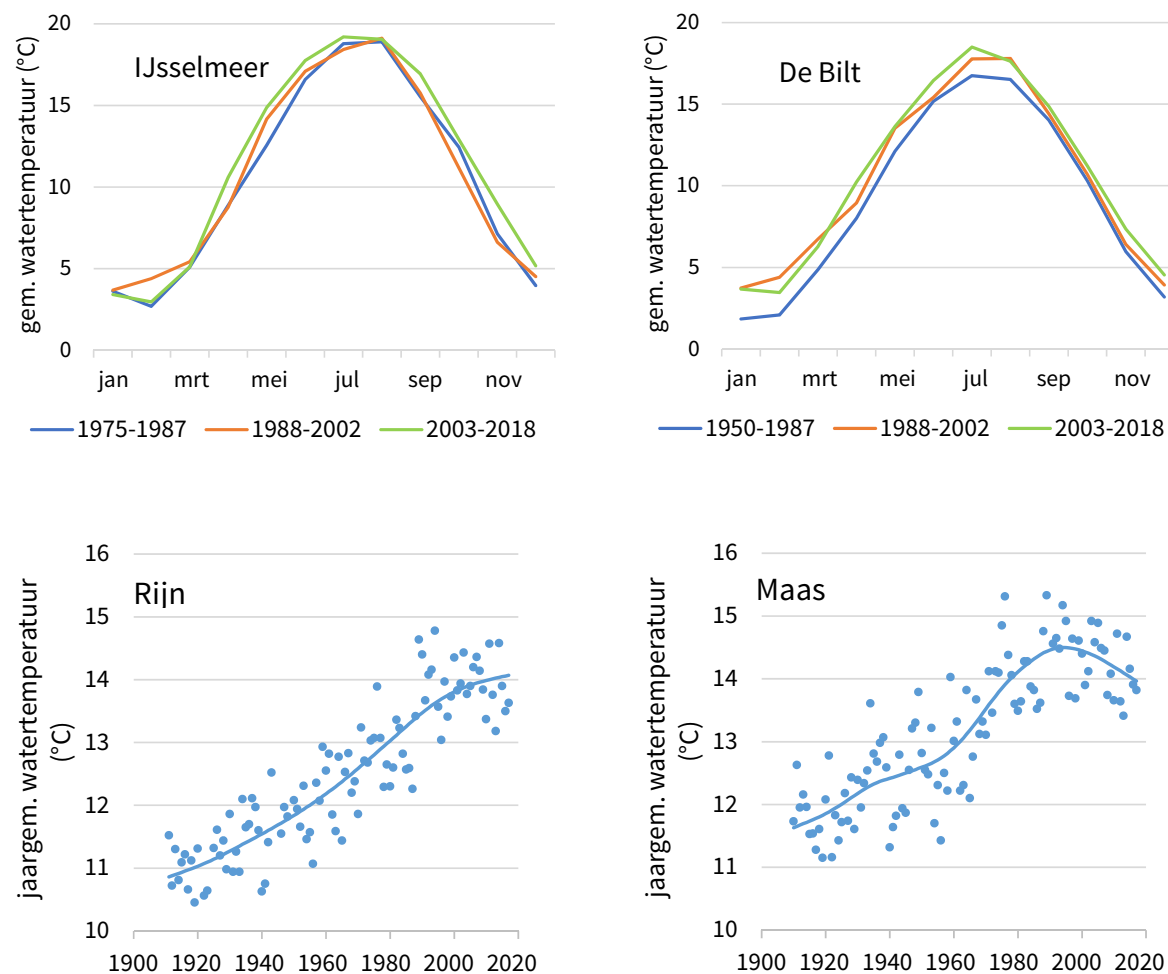
Ook in de winter draagt de betere luchtkwaliteit – en daarmee de toename van instraling – bij aan de versterkte temperatuurstijging. Een andere oorzaak is de vrij abrupte toename van het luchtdrukverschil tussen de Azoren en IJsland in 1988 (de NAO-index werd positief). Dat zorgde voor veel westenwind en voor zachte winters in NW Europa. Daardoor is de gemiddelde wintertemperatuur relatief sterk en langdurig toegenomen (figuur 2.3). Absoluut gezien is de toename in de winter en het voorjaar even groot als die in de zomer, maar de effecten op bijvoorbeeld ijsbedekking of de aanvang van het groeiseizoen zijn groot (figuur 2.4). Later nam het drukverschil weer enigszins af, waardoor de stijging van de gemiddelde wintertemperaturen afnam.

Ontwikkelingen watertemperatuur

In het algemeen werkt de opwarming van de atmosfeer vertraagd en gedempt door in de opwarming van waterlichamen, vooral bij diepe wateren. De ondiepe wateren in Nederland reageren echter relatief snel op veranderingen in de luchttemperatuur. Dat geldt ook voor de relatief ondiepe Noordzee (Herman et al., 2014; Tsimplis et al., 2006). Hoewel goede, langjarige meetreeksen van watertemperatuur schaars zijn, laten bijvoorbeeld beschikbare data uit het Marsdiep of het IJsselmeer zien dat de watertemperatuur toeneemt.



2 Huidige en toekomstige drukfactoren

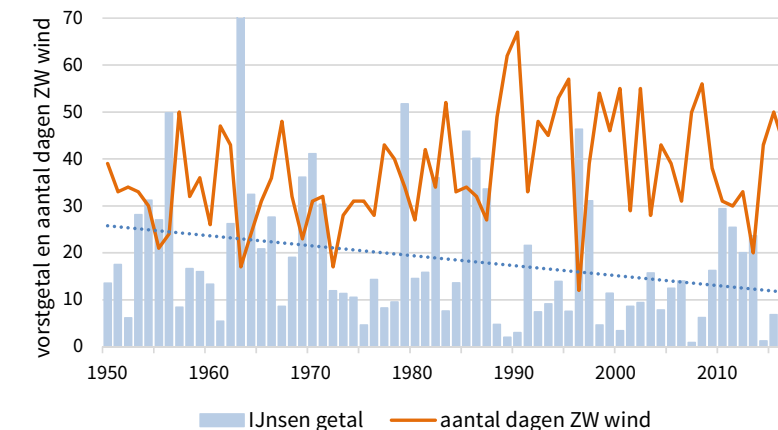


Figuur 2.4. Verandering in temperaturen gedurende het jaar.

De figuur linksboven geeft het gemiddelde seizoensverloop van de luchttemperatuur in De Bilt weer voor verschillende perioden. Gegevens www.knmi.nl. De rechtergrafiek toont hetzelfde voor de watertemperatuur in het IJsselmeer. Deze grafiek is gebaseerd op veel minder frequent verzamelde gegevens. Gegevens RWS. De onderste twee grafieken geven de ontwikkelingen weer in de watertemperatuur van de Rijn bij Lobith (links) en de Maas bij Eijsden (rechts). Bron: www.clo.nl (PBL), gegevens RWS.

In de rivieren is deze toename nog eens versterkt door lozingen van koelwater. Deze warmtelozingen verklaren ongeveer 1/3 deel van de opwarming van het water. Een afname van de temperatuur in de Maas na 2000 is waarschijnlijk een gevolg van afname van dergelijke lozingen (figuur 2.4).

Door de hogere wintertemperaturen zijn de grote wateren inmiddels minder vaak bedekt met ijs. Dit komt onder meer tot uiting in een negatieve trend van het jaarlijkse vorstgetal van IJnsen (figuur 2.5). Dit getal geeft een indruk van de strengheid van de winter (IJnsen, 1988) en is gebaseerd op het aantal vorstdagen (minimumtemperatuur negatief), het aantal ijsdagen (maximum eveneens negatief) en het aantal zeer koude dagen (minimum < -10°C). De fluctuaties worden deels verklaard door de veranderingen in de NAO en de frequentie van westenwind.



Figuur 2.5. Vergelijking van het aantal dagen zuidwestenwind in de maanden januari t/m maart in De Bilt en het vorstgetal van IJnsen (gegevens www.knmi.nl).

2 Huidige en toekomstige drukfactoren

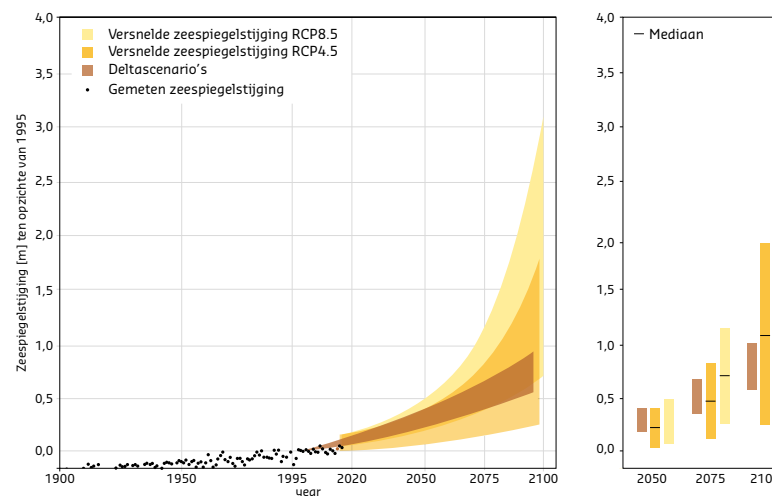
2.3 Zeespiegelstijging

2.3.1 Scenario's

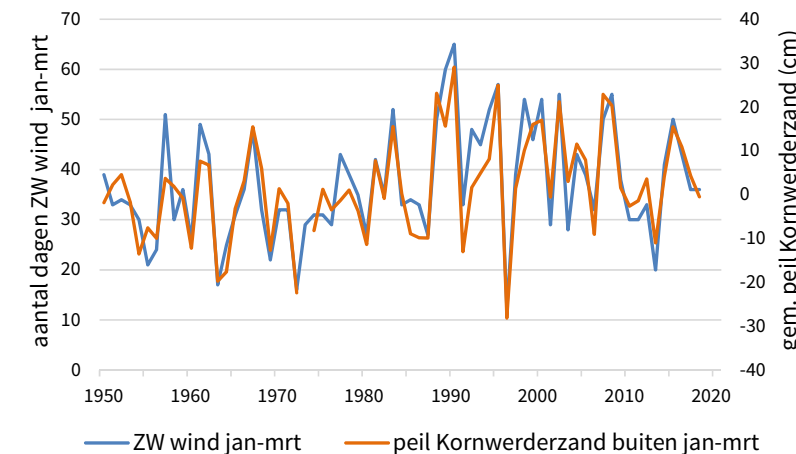
Op wereldschaal bedraagt de zeespiegelstijging over de afgelopen eeuw ongeveer 19 cm. Dit wordt vooral veroorzaakt door de uitzetting van het warmer wordende zeewater. In de toekomst zal de bijdrage van smeltend landijs steeds belangrijker worden. De huidige scenario's voor het Deltaprogramma gaan voor Nederland uit van een zeespiegelstijging tussen 0,35 meter en 1 meter tot 2100. Recente wetenschappelijke inzichten over Groenland en Antarctica zijn aanleiding geweest voor een analyse van mogelijke scenario's en gevolgen van een versnelling van de zeespiegelstijging voor Nederland (Haasnoot et al., 2018). Zo'n versnelling is dan vooral na 2050 te verwachten (figuur 2.6).

2.3.2 Veranderingen tot nu toe

In Nederland wordt de zeespiegelstijging mede beïnvloed door bodemdaling en langjarige getijcyclus en veranderingen van opstuwings-effecten (figuur 2.7). Nederland heeft van de wereldwijde stijging minder meegekregen dan andere delen van de wereld, maar door 4,5 cm bodemdaling per eeuw komt de stijging toch bijna uit op 19 cm (Baart et al., 2019). De huidige zeespiegelstijging bedraagt 2 mm per jaar. Gerekend vanaf 1900 is dit – gemiddeld over het jaar – vergelijkbaar met de stijging op wereldschaal.



Figuur 2.6. Deze figuur laat zeespiegelscenario's zien volgens KNMI'14 (Deltascenario's) en volgens de IPCC-projecties rcp4.5 En rcp8.5 (Le Bars et al., 2017), alsmede de metingen ten opzichte van 1995 (Baart et al., 2017). De figuur vertegenwoordigt een verkenning onder aanname van versneld massaverlies van ijs op Antarctica en Groenland. De berekeningen hebben geen beleidsmatige status (Haasnoot et al., 2018).



Figuur 2.7. Opstuwung van het kustwater door zuidwestenwind. Aantal dagen zuidwestenwind in De Bilt (vectorgemiddelde windrichting per etmaal 180-270°) en het gemiddelde waterpeil in de Waddenzee bij Kornwerderzand in januari-maart. Gegevens www.knmi.nl (wind) en RWS (waterstanden).



2 Huidige en toekomstige drukfactoren

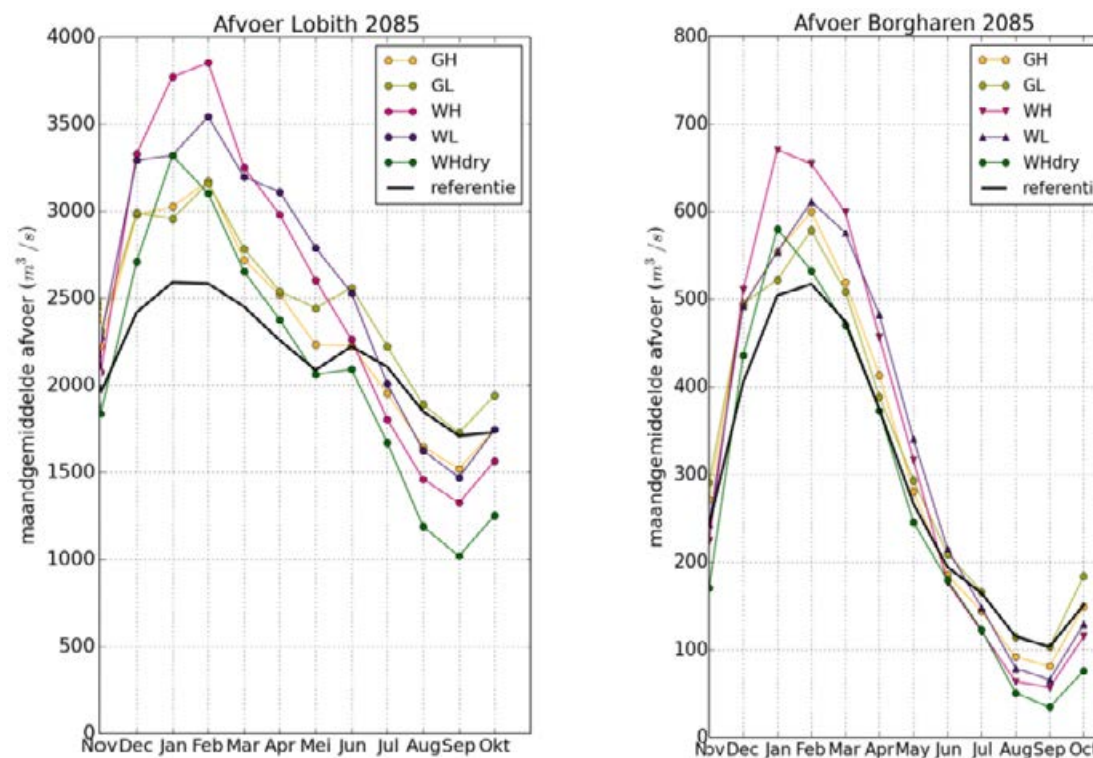
2.4 Veranderingen in patronen van neerslag en rivierafvoer

2.4.1 Scenario's

Volgens de KNMI-scenario's nemen zowel de totale neerslag als de extreme neerslag in de winter toe; in de zomer neemt de intensiteit van extreme regenbuien toe. Verder worden hagel en onweer heviger. In 2015 zijn de KNMI-scenario's 'vertaald' naar scenario's voor rivierafvoer in Lobith en Borgharen (Klijn et al., 2015; figuur 2.8). Vier van deze scenario's geven hogere debieten in de winter en het voorjaar en lagere debieten in de nazomer. Een vijfde afvoerscenario is toegevoegd en gebaseerd op continentale neerslagscenario's, dus verder bovenstrooms dan onze grensstations, om uiting te geven aan omstandigheden met een sterkere uitdroging van het stroomgebied dan in de vier oorspronkelijke scenario's was weergegeven (WHdry scenario). Dat vijfde scenario geeft minder vernatting in de winter, maar meer verdroging in de nazomer. Vooral voor de Maas neemt de kans op stagnatie van het rivierwater dan sterk toe. Het verschil tussen zomer en winter neemt in de Rijn sterk toe en gaat meer lijken op dat van een regenrivier zoals de Maas (Klijn et al., 2015).

2.4.2 Veranderingen tot nu toe

De totale hoeveelheid neerslag per jaar in Nederland is tussen 1910 en 2013 toegenomen met 26% (KNMI). De neerslag nam toe in alle seizoenen behalve in de (vroeg) zomer (figuur 2.9).

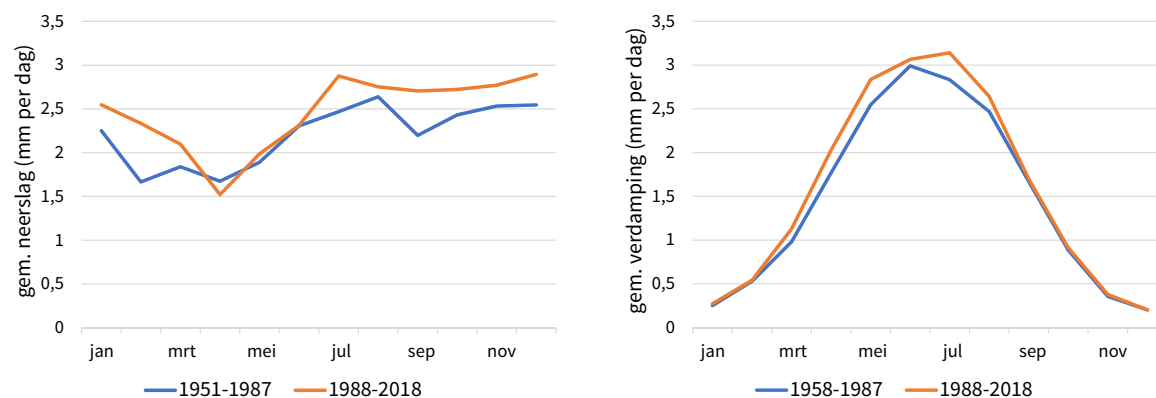


Figuur 2.8. Afvoerscenario's van de Rijn en de Maas voor 2085. Gebruikt zijn de vier KNMI-scenario's en whdry, gebaseerd op continentale neerslagscenario's (zie tekst) (Klijn et al., 2015).

Daarbij geldt dat het aantal regendagen (met meer dan 0,1 mm) niet veranderde. Wel nam het aantal dagen met gematigd extreme neerslag (meer dan 10 mm in de winter en meer dan 20 mm in de zomer) toe, met name in de kustgebieden. De hoeveelheid neerslag die in de vorm van zware buien viel, nam nog sterker toe.



2 Huidige en toekomstige drukfactoren



Figuur 2.9. Veranderingen in het seizoenspatroon van neerslag (links) en verdamping (rechts) in De Bilt. Gegevens www.KNMI.nl.

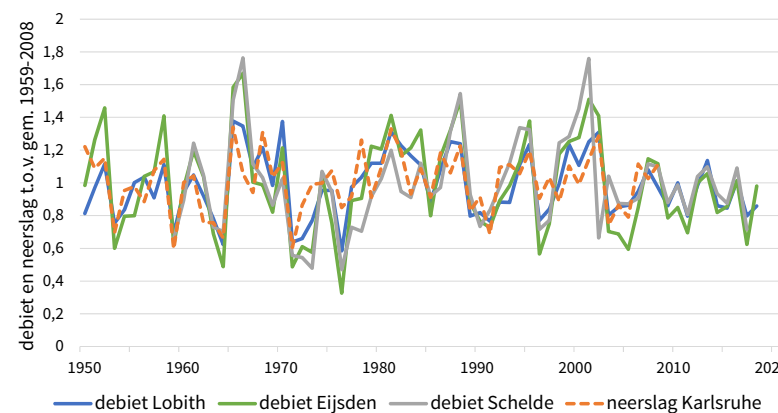
De verdamping in De Bilt nam tussen 1958 en 2013 toe met 12%. Dit komt door de toename van temperatuur en de zonnestraling, waarbij beide factoren vanaf 1983 ongeveer evenveel effect hebben gehad (KNMI).

De jaargemiddelde debieten van de rivieren vertonen grote fluctuaties. Deze vertonen een verband met de neerslagpatronen in gebieden die bovenstrooms van de meetpunten liggen. De patronen van de jaardebieten van de Rijn en de Maas komen sterk overeen, net zoals die van de Maas en de Schelde. De patronen van Rijn en Schelde vertonen minder overeenkomsten.

Resumerend lijken de gezamenlijke fluctuaties van jaar op jaar niet volledig random (figuur 2.10). Vaak komen er clusters van jaren voor met hoge of lage debieten, die dan dus in alle drie de rivieren tegelijk voorkomen. Mogelijk is er een relatie met klimatologische mechanismen zoals de AMO. De lage debieten in de periode 1971-1976

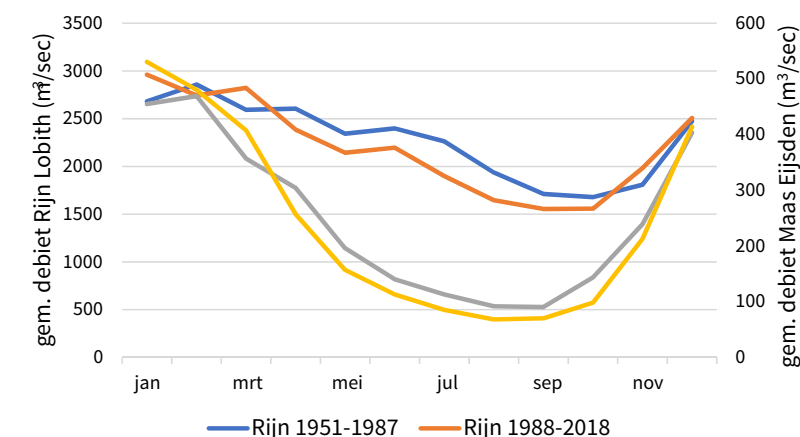
gingen bijvoorbeeld samen met uitzonderlijk lage waarden van de AMO-index; de correlatie over de gehele periode is echter zwak. Door de overeenkomst tussen de rivieren hebben de meerjarige fluctuaties van debieten grote invloed op de aanvoer van water en stoffen naar benedenstrooms gelegen wateren.

Figuur 2.10. Fluctuaties in de afvoer van de rivieren. Patronen in jaargemiddelde debieten van Rijn, Maas en Schelde, vergeleken met de neerslag langs de Rijn, verder bovenstrooms bij Karlsruhe. Gegevens RWS (debieten) en Deutscher Wetterdienst (neerslag Karlsruhe).



Door de grote fluctuaties in jaardebieten zijn trends in de afvoerpatronen over kortere perioden niet gauw significant. Uit vergelijking van de debieten van Rijn en Maas tussen de perioden

1951-1987 en 1988-2016 blijkt dat de gemiddelde debieten afnamen in de maanden april t/m oktober (figuur 2.11). In de winter is geen duidelijke verandering te zien. Naast de trend over de lange termijn zijn de meerjarige fluctuaties relevant omdat die in combinatie met andere veranderingen (bijvoorbeeld in waterkwaliteit) relatief abrupte veranderingen kunnen bewerkstelligen.



Figuur 2.11. Afname van de gemiddelde rivierafvoer in de zomer; seizoenspatronen in de afvoer van de Rijn en de Maas in twee opeenvolgende perioden. Gegevens RWS.

2 Huidige en toekomstige drukfactoren

2.5 Wind

2.5.1 Scenario's

De KNMI-scenario's geven slechts kleine veranderingen in de windsnelheid. Het aantal dagen met westenwind in de winter kan iets toenemen in de beide H-scenario's (hoge waarde in verandering van het luchtstromingspatroon, zie figuur 2.1). Maar de natuurlijke variatie is groot.

2.5.2 Veranderingen tot nu toe

Er zijn geen duidelijke doorgaande trends te vinden in het aantal waargenomen stormen langs de Nederlandse kust en in het Waddengebied. Wel is de frequentie van (zuid) westenwinden in de winter toegenomen. Dit hangt samen met een vrij abrupte toename van het luchtdrukverschil tussen de Azoren en IJsland rond 1988 (de NAO-index werd positief). Later nam het drukverschil weer enigszins af (zie figuur 1.2).



2 Huidige en toekomstige drukfactoren

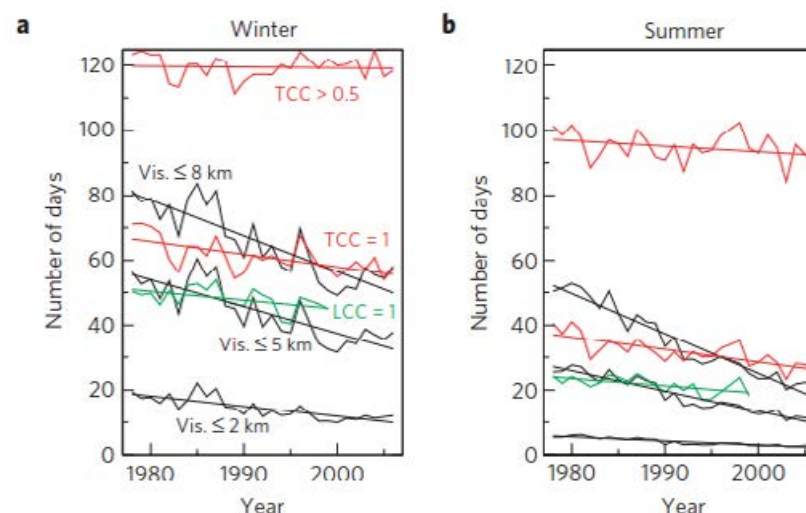
2.6 Mist en instraling

2.6.1 Scenario's

Het aantal dagen met mist neemt af en het zicht verbetert. Verder neemt de instraling ofwel hoeveelheid zonnestraling nabij het aardoppervlak licht toe.

2.6.2 Veranderingen tot nu toe

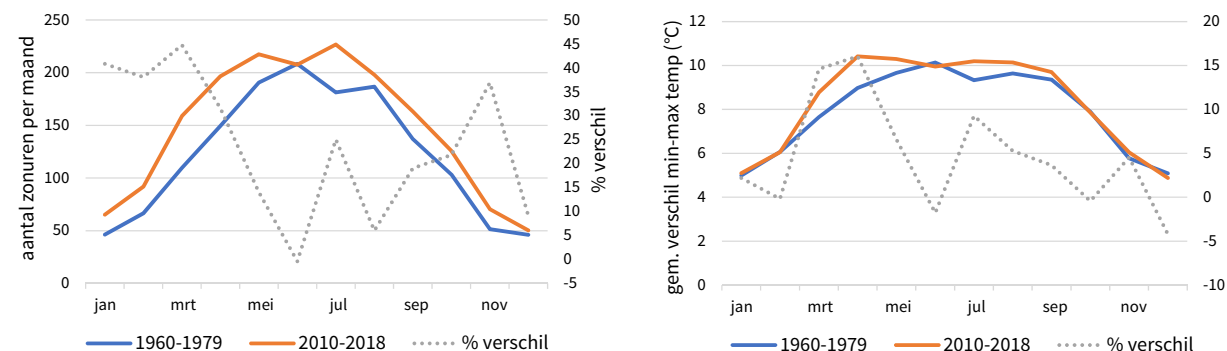
Door de verbeterde luchtkwaliteit is het aantal dagen met mist per jaar de afgelopen decennia flink afgenomen en het zicht verbeterd, zie figuur 2.12. Hierdoor is ook het aantal zonuren toegenomen, vooral in het voorjaar. De extra energie die hierdoor op het aardoppervlak aankomt zorgt voor extra opwarming van lucht, bodem en water (bovenop andere factoren). Dit aspect is al in paragraaf 2.2.2 Aan de orde gekomen (zie ook figuur 2.3). De verbetering van de luchtkwaliteit en het zicht is nog steeds gaande, maar lijkt over het afgelopen decennium af te vlakken. Een verdere verbetering van de luchtkwaliteit en dus vergroting van de instraling (en temperatuursverhoging) lijkt waarschijnlijk, als er strengere maatregelen tegen de luchtverontreiniging worden genomen, maar is natuurlijk gelimiteerd.



Figuur 2.12. Ontwikkeling van gemiddeld aantal dagen met beperkt zicht en wolkenbedekking (vis=visibility, lcc=low cloud cover, tcc=total cloud cover) in de winter (links) en in de zomer (rechts) (Vautard et al., 2009).



De toename van instraling zorgt voor extra opwarming in de daglichturen (zie paragraaf 2.2.2). Doordat instraling alleen overdag plaatsvindt, nemen de temperatuurverschillen tussen dag en nacht toe. Dit effect is het sterkst in maart en april (figuur 2.13).



Figuur 2.13. Verandering in het aantal zonuren per maand. Het aantal zonuren per maand nam vooral in de winter en in het voorjaar toe (links). Het gemiddelde verschil tussen de dag- en nachttemperatuur nam vooral in het voorjaar toe (rechts). Gegevens KNMI.

2 Huidige en toekomstige drukfactoren

2.7 Verzuring van zeewater

2.7.1 Scenario's

De verzuring van zeewater is een wereldwijd proces, dat ook invloed op de Nederlandse wateren kan hebben (Williamson et al., 2017). Dit proces wordt veroorzaakt doordat een groot deel van de CO₂ in de atmosfeer wordt opgenomen door de oceanen en daar in combinatie met water koolzuur vormt. De pH van de oceanen is inmiddels gedaald van 8,2 naar 8,1. Dat betekent een toename van de concentratie van H⁺ ionen met 26%! Een dergelijke verandering kan negatieve effecten hebben op de mogelijkheden voor allerlei zeedieren en bepaalde planktonsoorten om kalkschalen te bouwen en te onderhouden.

Volgens een rapport van de IPCC uit 2014 kan de oceaanverzuring bij het zeer ambitieuze 'RCP 2.6 Scenario' beperkt blijven. Zonder maatregelen kan de pH met meer dan 0,3 schaalpunten extra dalen. Dit betekent dat de concentratie H⁺ ionen in de 21^e eeuw meer dan verdubbelt.

2.7.2 Veranderingen tot nu toe

Vanaf ongeveer 1990 wordt een sterke afname van de pH in de Noordzee gemeten. Dit geldt ook voor meetstations die op 70 km (Noordwijk) en 235 km (Terschelling) uit de kust liggen. De pH is daar gedaald van ongeveer 8,2 naar 7,9, wat een verdubbeling van de concentratie van H⁺ ionen betekent.

Voordat de pH ging afnemen in de Noordzee, nam deze echter eerst toe. Dit

kwam waarschijnlijk mede door andere processen, zoals afname in de aanvoer van voedingsstoffen door de rivieren en minder algenbloei (Salt et al., 2013; Provoost et al., 2010). Wat nu precies de mechanismes zijn achter pH veranderingen is nog onderwerp van studie.

Recent Duits onderzoek constateert ook afname van de pH in zoetwaterreservoirs met 0,3 schaalpunten, die niet door afname van de eutrofiëring zou zijn veroorzaakt. De onderzoekers suggereren sturing door klimaatverandering conform de oceaanverzuring (Weiss et al., 2018).



3 Impact op waterkwaliteit en ecologie

Dit hoofdstuk gaat in op de mogelijke impact van de drukfactoren die worden veroorzaakt door klimaatverandering. De impact verschilt per watersysteem: de gevolgen voor een estuarien systeem zullen anders zijn dan voor rivieren en voor meren. De gevolgen per watersysteem worden in de volgende hoofdstukken verder uitgewerkt. Kwantificering van de impact wordt nog niet gedaan, dat komt in het klimaatkompas.

3.1 Impact van temperatuur

Doordat het water warmer wordt, kunnen levensgemeenschappen verschuiven: koude minnende soorten verdwijnen en warmte minnende soorten komen daarvoor in de plaats. Dit soort effecten zien we vandaag de dag al optreden, ook in onze wateren. De schol trekt zich bijvoorbeeld langzaam terug uit de Waddenzee (Engelhard, 2011). In de zomer komt de temperatuur van het zeewater in de Waddenzee regelmatig boven de 20 graden Celsius uit. Bij deze relatief hogere temperaturen neemt bij de schol de groei af. Daarentegen wordt het groeiseizoen van garnalen in de Waddenzee door het warmere water verlengd, waardoor deze zich kunnen uitbreiden.

Ook sommige moeras- en watervogels vertonen een noordwaartse verschuiving van hun verspreidingsgebied. Een voorbeeld van een moerasvogel die zich recent op deze manier vanuit het zuiden in Nederland gevestigd heeft is de cetti's zanger. Aan de andere kant

overwinteren sommige noordelijke watervogels zoals zaagbekken in afnemende aantallen in Nederland omdat de ijsbedekking van de Oostzee afneemt (www.sovon.nl) en foerageergebieden in noordelijker streken langer beschikbaar zijn. Ook op het niveau van complete soortgroepen zijn inmiddels noordwaartse verschuivingen binnen Europa vastgesteld via een methode die verschuivingen in het zwaartepunt van het verspreidingsgebied van een groot aantal soorten volgt (CTI of Community Temperature Index; Van Swaay et al., 2018).

Verschuivingen van het voortplantingstijdstip of de start van de groei komen door het veranderende klimaat ook voor. Er zijn vele voorbeelden van onder meer voorjaarsplanten (op het land, maar ook op de oever en in het water, zoals waterlelie) die vroeger zijn gaan bloeien; ook treden de herfstkleuren in het najaar later op (zie natuurkalender via www.naturetoday.com). Voor spiering in het IJsselmeer zijn er aanwijzingen dat de paaitijd met enkele weken is vervoegd (figuur 4.2; Noordhuis, 2010). De verschuivingen beïnvloeden de complexe interacties tussen predator en prooi.

Warmere winters hebben invloed op de opbouw van kokkel- en mosselbanken in de Waddenzee. Na de sterke achteruitgang van kokkel- en mosselbanken door overbevissing in de jaren '80 en '90, blijft herstel van de schelpdierbestanden uit. De minder koude winters in de afgelopen tien jaar blijken negatieve gevolgen te hebben voor de ontwikkeling van schelpdieren. De predatoren van het schelpdierbroed – zoals kleine garnalen – houden namelijk niet van de kou. Door het

uitblijven van strenge winters in de laatste tien jaar is de aangroei beperkt gebleven.

Een hogere watertemperatuur kan leiden tot diverse problemen. Belangrijk is dat de oplosbaarheid van zuurstof significant lager wordt. In de literatuur (Mooij et al., 2005; Dionisio Pires & Kramer, 2018) wordt vaak een toename gerapporteerd van:

- De primaire productie, grotere kans op algenbloei en verschuiving naar blauwalgen, sterkere groei van waterplanten;
- Productie van secundaire producenten, bijvoorbeeld via de toename van het aantal generaties bij zoöplankton door verlenging van het groeiseizoen;
- De kans op stabiel troebele watersystemen;
- De kans op botulisme en andere ziektes;
- Sterfte-incidenten door hitte (overschrijden van maximale temperatuur voor bijvoorbeeld vis en schelpdieren) en zuurstoftekort.



3 Impact op waterkwaliteit en ecologie

Nieuwsflits

De gevolgen van de hittegolven van 2018 en 2019 staan model voor wat de stijgende temperatuur op lange termijn voor ons in petto heeft. Hierna volgen enkele illustraties daarvan uit het nieuws.



Figuur 3.1. De groene soep (blauwalg) die oprukt bij de Pietersplas in de Maas. Op de achtergrond de Belgische sluis van Ternaaijen. © Marc Schols.



Figuur 3.2. Algenbloei in de Maas bij Maastricht (begin augustus 2019). Net als in de warme zomer van 2018 trad ook in 2019 (blauw)algenbloei op in de Maas, op de foto zichtbaar als groene 'strepen' op het wateroppervlak. Er werd geen zichtbare stroming waargenomen op het ogenblik dat de foto werd genomen.

Zomer 2018: Maas verandert in een groene soep

Tijdens de lange warme periode – gecombineerd met een lage rivierwaterstand – zat de Maas bomvol met blauwalgen. Zo'n explosieve uitbraak was nog niet eerder waargenomen in een stromende rivier. Stromen deed de Maas ook nauwelijks, door de segmentatie (verstuwings) en lage waterstand (Waterforum, 2018, 9 juli). Begin augustus 2019 zijn in de Maas bij Maastricht ook al algen gesignaleerd (pers. com. Gerben van Geest).

Zomer 2018: Extreme kokkelsterfte op droogvallende platen Nederlandse kustwateren (wur.nl)

Kokkels zijn massaal gestorven op de droogvallende platen in de Waddenzee, de Oosterschelde en de Westerschelde. Dit is vastgesteld in de periode van 25 juli tot 15 augustus door onderzoekers van Wageningen Marine Research (WMR, K. Troost) en visserijkundige ambtenaren in de Waddenzee en Zeeuwse wateren. Op veel plaatsen waren de platen bezaaid met stervende en pas gestorven kokkels, al dan niet met het vlees nog in de schelpen. De meest voor de hand liggende doodsoorzaak lijkt de buitengewoon lange hittegolf. Mogelijk heeft dit niet alleen met hoge watertemperaturen te maken, maar met opwarming van de kokkels in hun schelp tijdens laag water door de sterke instraling van zonlicht. De extreem hoge kokkelsterfte is slecht nieuws voor vogels en vissers.

Zomer 2019: Massale vissterfte bij de Oostvaardersplassen

Eind juli werden luchttemperaturen gemeten van 40°C, waardoor ook de temperatuur van het water in het moerasgebied is gestegen. De hogere temperatuur van het water heeft geleid tot lagere oplosbaarheid van zuurstof. Dit is mogelijk versterkt door toenemende dichtheden van algen die zuurstof gebruiken in de nacht. Dit had massale vissterfte tot gevolg (Omroep Flevoland, 28 juli 2019).



Figuur 3.3. Vissterfte aan de rand van de Oostvaardersplassen (28 juli 2019).

3 Impact op waterkwaliteit en ecologie

3.2 Koolstofcyclus en broeikasgassen

CO₂ in water speelt een cruciale rol bij de primaire productie door algen of waterplanten. Er is onderzoek gedaan naar de verandering van dit proces die kan optreden als het water warmer wordt. In een notendop: een toename van CO₂ in de lucht leidt tot meer CO₂ in het water en beïnvloedt de primaire productie. Uit onderzoek van het NIOO blijkt dat de broeikasgasemissie uit het water daardoor potentieel kan toenemen (Velthuis, 2018). Deze emissie kan bestaan uit CO₂ of uit de veel sterkere broeikasgassen NH₄ of NO₂. Het is een uiterst complex geheel en nog volop in onderzoek zowel bij universiteiten als bij adviesbureaus (o.a. WiBo, Arcadis, RoyalHaskoning/DHV, Sweco) en kennisinstututen (Deltares, B-ware, WUR). Voor de evaluatie van PAGW-maatregelen is dit een lastig te kwantificeren onderdeel. Zaak is om de kennisontwikkeling hier op de voet te volgen.

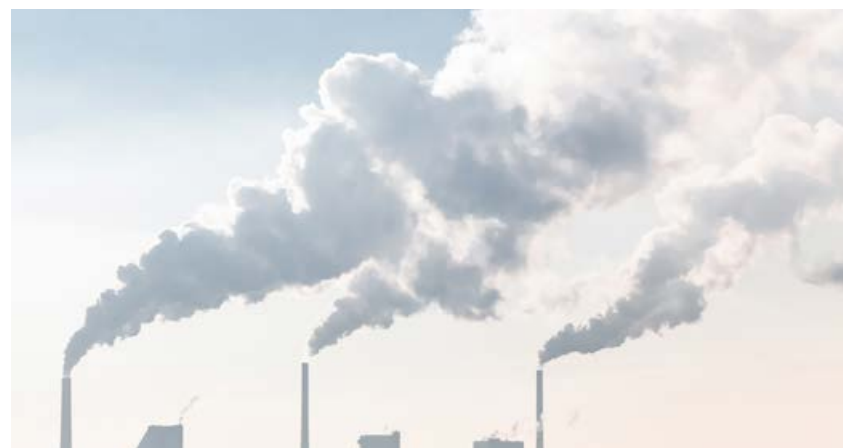
3.3 Zeespiegelstijging

Door de stijgende zeespiegel kan intergetijdengebied op den duur 'verdrinken'. Dat komt doordat de sedimentatie de stijgende zeespiegel niet meer kan bijhouden. In het geval van verdrinking is duidelijk sprake van verlies van het intergetijdenhabitat en aangrenzend buitendijks habitat.

Ook heeft de stijgende zeespiegel invloed op de mogelijkheden

om te spuien en op de frequentie waarmee beschermingsmiddelen tegen hoogwater moeten worden ingezet. Doordat de mogelijkheden voor spuien onder vrij verval afnemen, moet de beheerder eerder overgaan tot pompen. Dit heeft consequenties voor de connectiviteit tussen wateren. Pompen kan stroomsnelheden en trekmogelijkheden van vis en ongewervelden (kreeftachtigen) beïnvloeden. De overstap naar pompen zal ook leiden tot verlies van peildynamiek in de meren. Het peil wordt namelijk veel strakker gehandhaafd. Bij toenemende regulering van het peil zal de kwaliteit van de habitats op de grens van land en water afnemen.

Door de stijgende zeespiegel kan het zoute water verder de rivieren of meren indringen. In combinatie met lagere afvoeren van rivieren kan dit verzilting van de riviermonding opleveren. Dit kan naast negatieve ook positieve invloed hebben op de natuur; het creëert extra habitatdiversiteit.



Nieuwsflits

Zomer 2018: Verzilting IJsselmeer

Uit metingen is gebleken dat het zoutgehalte in een deel van het IJsselmeer een tijd lang hoger is geweest dan de door het drinkwaterbedrijf gehanteerde norm van 150 mg/l. De verhoging was lokaal maar heeft er wel toe geleid dat de drinkwaterwinning door PWN gestopt moest worden (www.nu.nl, 22 augustus 2018).

Januari 2019: Haringvlietsluizen na lage rivierstanden alsnog geopend

Het openen van sluizen in de Haringvlietdam vormt een cruciale stap in het herstel van de natuurlijke dynamiek tussen zee en rivier en is belangrijk voor trekvisen zoals de zalm en de fint. Door de droogte van 2018 moest het openen van de sluizen echter enkele keren worden uitgesteld. De lage waterstand in de rivieren zorgde voor te weinig tegendruk, waardoor het zoute water landinwaarts zou kunnen oprukken met problemen voor natuur, landbouw en drinkwaterbedrijven tot gevolg. De geplande opening in september 2018 kon daarom pas plaatsvinden in januari 2019. Het vermoeden is dat dit geen effect heeft gehad op de vistrek.

3 Impact op waterkwaliteit en ecologie

3.4 Exoten

Exoten, ook wel uitheemse soorten genoemd, zijn dieren of planten die door menselijk handelen terechtkomen in een gebied waar ze van oorsprong niet voorkomen en waar ze kunnen overleven en uitbreiden. Soms is dat handelen opzettelijk, zoals de Japanse duizendknoop, die ooit is meegebracht uit het verre oosten, of de tiggervlokreeft, die in de jaren 1960 als visvoer is uitgezet in het IJsselmeer. Onopzettelijk kan natuurlijk ook. Denk aan ontsnapte huisdieren (bijvoorbeeld de nijlgans), vijverplanten (waterteunisbloem), soorten uit de aquariumhandel (zoetwaterkreeften) of (larven van) soorten die zijn meegekomen met ballastwater van schepen (Chinese wolhandkrab, vele estuariene soorten). De driehoeksmossel kon de grote wateren bereiken doordat ten behoeve van de scheepvaart rivieren met elkaar verbonden werden door kanalen. Dat geldt ook voor de zwartbekgrondel.

Soorten waarvan het leefgebied opschuift als gevolg van klimaatverandering worden niet tot de exoten gerekend. Toch kunnen ze overlast veroorzaken en worden daarom vaak onder de noemer van exoot geschaard. Een bekend voorbeeld, maar zonder relatie met de grote wateren, is het voorkomen van de eikenprocessierups. Onderzoek van De Natuurkalender toont aan dat hogere temperaturen in het voorjaar en de zomer maar ook minder neerslag in september de kans op voorkomen van

de eikenprocessierups vergroot. Sinds 1991, het eerste voorkomen in Noord-Brabant, heeft de rups zich steeds verder naar het noorden verspreid. Het voorjaar van 2019 werd ook gekenmerkt door veel overlast van deze rups.

Nieuwsflits

Waterteunisbloem rukt op langs Maas

De afgelopen jaren is de Waterteunisbloem sterk toegenomen in verschillende plassen langs de gestuwde Maas. Dit roept de vraag op of langs de Nederlandse rivieren een vergelijkbare situatie ontstaat als langs de Allier in Frankrijk, waar veel uiterwaardplassen inmiddels zijn dichtgegroeid met deze soort. Dominantie van deze soort kan ten koste gaan van inheemse soorten, en heeft ook grote effecten op de macrofauna- en visgemeenschap. Op het eiland Tiengemeten in het Hollandsch Diep is sinds een aantal jaar een nauw verwante exoot aangetroffen, namelijk de Kleine waterteunisbloem. Deze soort wordt hier intensief bestreden, maar is desondanks nog niet verdwenen. De vraag is of hierdoor andere waterplanten verdwijnen en of over enkele jaren uiterwaardplassen langs de Rijn vol zullen staan met Waterteunisbloemen.



Figuur 3.4. Waterteunisbloem woekerend in een plas bij de gestuwde Maas (foto Jan Roelofs).

3 Impact op waterkwaliteit en ecologie

3.5 Afname van diversiteit

Klimaatverandering leidt naar verwachting tot een afname van de diversiteit aan soorten. Op wereldschaal worden bijvoorbeeld enorme verliezen aan gemeenschappen en habitats verwacht bij koraalriffen en in de poolstreken en hooggebergten. Koraalriffen herbergen duizenden vissoorten en levensgemeenschappen met de hoogste diversiteit op aarde (IUCN). In het IPCC-rapport 'Global Warming of 1.5°C' (2018) wordt gesteld dat bij de 2°C wereld opwarming (doel Parijs Akkoord) 99% van de koraalriffen verloren gaat en bij een zeer ambitieuze beperking tot 1.5° opwarming 'slechts' 70-90%. In bedreigde gebieden zoals hooggebergten kunnen zulke processen ook nog eens versneld worden door verlies van genetische diversiteit, als de steeds meer geïsoleerd rakende populaties van een soort uitsterven (Bálint et al., 2011).

De effecten in onze grote wateren zullen minder drastisch zijn. Toch is ook hier de verwachting dat het effect op de diversiteit negatief zal zijn (Mooij et al., 2005), Bijvoorbeeld als gevolg van toenemende kansen op algenbloei, hittestress en ziektes, en door combinatie met andere stressfactoren zoals veranderingen in waterkwaliteit, intensief gebruik en een lage habitatdiversiteit en -kwaliteit.

3.6 Effect op KRW en Natura 2000

De afname van het aantal aanwezige soorten kan een negatief effect hebben op de score van KRW-deelmaatlatten die de diversiteit betreffen, zoals bij macrofyten en macrofauna. De scores zeggen echter niet direct iets over de oorzaken van de veranderingen. Dezelfde score kan ook door andere stressfactoren (bijvoorbeeld eutrofiëring) worden veroorzaakt. Het effect van klimaatverandering moet dus in samenhang worden bekeken met deze andere stressfactoren.

Habitatverlies en sterfte-incidenten kunnen negatieve effecten hebben op de staat van instandhouding van Natura 2000 habitats en soorten. Door de afname van arealen van leefgebieden en voedselbeschikbaarheid worden ook doelsoorten negatief beïnvloed. Zo kan de massale sterfte van cruciale voedselsoorten (spiering, zandspiering) of de komst van exoten (zwartbekgrondels) effect hebben op de visstand en daarmee op de aantallen en/of het broedsucces van visetende vogels zoals aalscholvers, zaagbekken en sterns.

Het probleem van de KRW en N2000 is dat de methodiek zich focust op het wel of niet voorkomen van habitats en soorten. Dit is vanuit de doelen van deze richtlijnen – verbeteren waterkwaliteit en behoud natuur – begrijpelijk. Beide richtlijnen kunnen echter niet meebewegen met de gevolgen van klimaatverandering. Indien levensgemeenschappen verschuiven door klimaatverandering zoals al waargenomen

wordt (zie paragraaf 3.1), worden soort-specifieke doelen niet gehaald. Het lijkt aannemelijk dat als de KRW-doelen nu niet worden gehaald, ze met de huidige trend in klimaatverandering ook in 2027 niet worden gehaald. Voor de PAGW-doelen is er daarom voor gekozen om vooral de voorwaarden te scheppen voor een systeem dat in een gewenste toestand kan blijven, met soorten die een vergelijkbare functie hebben als de beschermde soorten, ondanks veranderende omstandigheden.



4 Het IJsselmeergebied

Het IJsselmeergebied omvat een tiental grote wateren. Het zijn grote en middelgrote, ondiepe zoetwatermeren, met een licht basisch karakter ('gebufferd'), waar het water kort tot zeer lang verblijft. De meren zijn restanten van de Zuiderzee. Het brakke, estuariene verleden speelt nog altijd een rol, bijvoorbeeld via de waterbalans, bodemchemie en brakke kwel. Ook de oorspronkelijke ruimtelijke variatie van de Zuiderzee is nog steeds zichtbaar. In de verschillende compartimenten die er zijn ontstaan, variëren de (combinaties van) habitats in tijd en ruimte en daarmee de flora en fauna. Door compartimentering zijn de dynamiek en connectiviteit van het IJsselmeergebied echter ingeperkt. Mede door een gefixeerd en tegennatuurlijk peil zijn de land-water overgangen relatief abrupt en weinig dynamisch.

Dit hoofdstuk gaat dieper in op de kenmerken van het IJsselmeergebied en op effecten van klimaatverandering. Dit gebeurt aan de hand van de zes drukfactoren die in hoofdstuk 3 zijn weergegeven.

4.1 Specifieke kenmerken van het gebied

De meren in het IJsselmeergebied kunnen – gezien vanuit het stroomgebied van Rijn en IJssel – worden ingedeeld in ruwweg

vier typen (zie tabel 1):

- Het Ketelmeer. Dit vormt min of meer een verlengstuk van de IJssel. Het water verblijft er zeer kort en de flora en fauna vertonen een aantal rivierkenmerken.
- Het IJsselmeer. Dit meer wordt gekenmerkt door een zeer groot oppervlak en een beperkte diepte. Het meer sluit aan op de Waddenzee en ondervindt een relatief grote invloed van de IJssel.
- Het Markermeer; hier is de invloed van de IJssel beperkt. Het

meer kenmerkt zich door een grote slibvracht, een zeer lange verblijftijd van het water, een zeer groot oppervlak en een beperkte diepte.

- De (overige) randmeren. Deze zijn zeer ondiep en hebben een relatief kleine 'strijklengte' (maximum afstand waarover de wind ongehinderd over het water kan waaien). Het water wordt vooral lokaal aangevoerd en verblijft middellang in de randmeren. Er komen veel waterplanten en mosselen voor.

Tabel 1. Kenmerken van de tien meren van het IJsselmeergebied die tot de rijkswateren worden gerekend.

Meer	Oppervlakte	Diepte (mediaan)	Verblijftijd	Belangrijkste bron
Ketelmeer	3232	3,75	3 dagen	IJssel
IJsselmeer	113687	4,63	3-4 maand	IJssel
Markermeer	69535	3,93	1-1,5 jaar	Divers
Overige randmeren	Zwarte Meer	1772	10 dagen – 1 maand	Zwarte Water
	Vossemeer	331	0,87	Drontermeer
	Drontermeer	562	0,82	Veluwemeer
	Veluwemeer	3128	1,09	Flevoland
	Wolderwijd/Nuldernauw	2541	1,90	Flevoland
	Eemmeer/Nijkerkernauw	1522	1,80	Eem
Gooimeer	2567	2,63	1,8 maand	Eemmeer

4 Het IJsselmeergebied

4.2 Relevante ontwikkelingen naast klimaatverandering

4.2.1 Veranderingen in waterkwaliteit

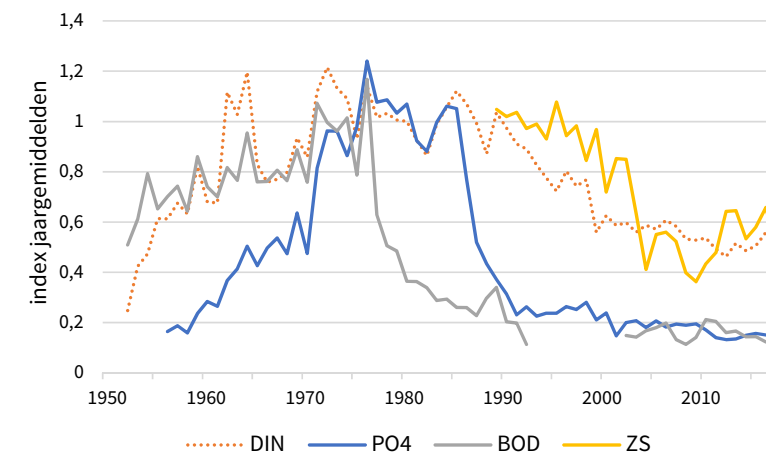
In de loop der jaren is de waterkwaliteit van de meren op verschillende manieren veranderd. De aanvoer van water vanuit de Rijntakken zorgde sinds de jaren 1970 voor drie periodes van relatief sterke veranderingen (figuur 4.1). Deze werden primair veroorzaakt door specifiek beleid, maar de patronen van verandering hingen tevens samen met klimatologische en hydrologische gebeurtenissen:

- Vanaf 1977-1980 nam de chemische en organische verontreiniging af (onder meer geïndiceerd door dalend zuurstofverbruik in rottingsprocessen figuur 4.1). Dit viel samen met de verbetering van de luchtkwaliteit en de toename van het zicht vanaf 1980, die door hetzelfde pakket van maatregelen werden veroorzaakt.
- Tussen 1985-1990 nam de hoeveelheid fosfaat af, vooral door inspanningen van Duitsland om de waterkwaliteit te verbeteren. De effecten daarvan op het IJsselmeergebied werden versterkt door de lage rivierdebieten in de jaren 1989-1993, waardoor de belasting op de meren sterker daalde dan de concentratie in de rivier. Deze veranderingen gingen ook min of meer samen met de veranderingen in luchtstromingen, die leidden tot toename van (zuid)westenwind vanaf 1988 (zie paragraaf 2.2).

- Vanaf 2003 nam de concentratie aan zwevend stof af. Dit was vooral het gevolg van de afname van anorganisch zwevend stof, ook in de winter, wanneer in de rivier nauwelijks algen aanwezig zijn. Het effect hiervan op het IJsselmeergebied werd versterkt door lage rivierdebieten na 2003.

De belangrijkste verandering in het IJsselmeergebied in de meest recente decennia is de afname van de eutrofiëring. Vanaf het midden van de jaren 1980 is de voedselrijkdom steeds verder afgenomen. Ongeveer sinds 2005 is de aanvoer van fosfaten vanuit de Rijntakken weer min of meer natuurlijk. Deze afname is gepaard gegaan met veranderingen in het voedselweb in de meren, bijvoorbeeld in de soortensamenstelling van het fytoplankton en de hoeveelheid waterplanten. De visbiomassa nam af, net als de voedingswaarde van mosselen. Daarmee namen vis- en macrofauna-etende vogels af, terwijl planteneters toenamen (Noordhuis et al., 2014). De timing van deze veranderingen is mede beïnvloed door meerjarige fluctuaties in klimatologische factoren, bijvoorbeeld via neerslag en rivierdebieten.

Door de geringe diepte en grote kansen voor waterplanten domineerden in de randmeren de positieve effecten van de afnemende eutrofiëring (toename van diversiteit); in het diepere IJsselmeer en Markermeer de negatieve (afname van voedselkwaliteit).



Figuur 4.1. Vier grote veranderingen in de waterkwaliteit van de Rijn bij Lobith. PO4 = opgelost fosfaat, DIN = opgelost stikstof, BOD = biochemisch zuurstofverbruik, ZS = zwevend stof. Gegevens RWS.

4.2.2 Veranderingen in gebruik

De meren worden steeds intensiever gebruikt. De recreatie neemt toe – mede door de toenemende (water)temperaturen – en windmolens en in de nabije toekomst mogelijk ook zonnepanelen leggen steeds meer beslag op de ruimte. De effecten hiervan op de weerstand en robuustheid van het systeem zullen per locatie verschillen. Terwijl recreatie in het algemeen een negatief effect heeft op diversiteit, hebben windmolens en zonnepanelen complexe gevolgen die op onderdelen positief zouden kunnen zijn.

4 Het IJsselmeergebied

4.3 Effecten van klimaatverandering in het IJsselmeergebied

4.3.1 Inleiding

Hoewel de meren verschillen, hebben ze ook veel overeenkomsten. Het zijn allemaal middelgrote tot (zeer) grote veranderde tot kunstmatige, ondiepe zoetwatermeren. Met uitzondering van het Ketelmeer verblijft het water er relatief lang. Door deze combinatie van kenmerken – vooral het grote oppervlak en de geringe diepte – zijn de meren gevoelig voor veranderingen in windregimes en ijsbedekking en voor veranderingen in instraling, neerslag en verdamping. Deze laatste factoren hebben effect op de waterbalans.

Hoe groter de meren, hoe sterker deze invloeden. De gevoeligheid wordt versterkt door de beperkte habitatdiversiteit en (peil)dynamiek in de meren. Daarnaast zijn er verschillen tussen de meren, bijvoorbeeld in de gevoeligheid voor zeespiegelstijging (IJsselmeer) of veranderingen in rivierdebieten (Ketelmeer).

4.3.2 Toenemende temperatuur

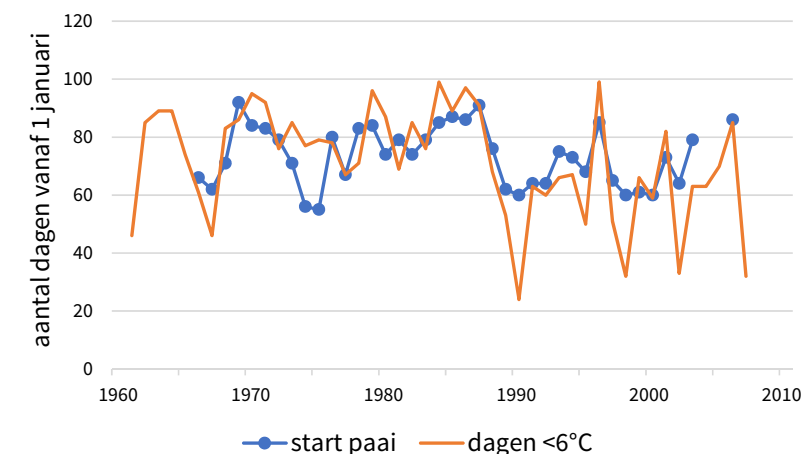
De effecten van de opwarming van het IJsselmeergebied hangen samen met verschillen tussen de zomer en de winter.



Winter

De watertemperatuur in de winter neemt toe. Dit wordt versterkt door de NAO-omslag in 1988 (zie paragraaf 2.2), waardoor in de maanden december-maart meer zachte atlantische lucht wordt aangevoerd. Door de hogere temperaturen neemt de kans op ijsbedekking af waardoor de wind meer vat kan krijgen op het water en de turbulentie toeneemt.

Verder zorgen de hogere temperaturen én de toename van de instraling rondom mei voor het vroeger intreden van het voorjaar. Hierdoor begint het groeiseizoen eerder en duurt het langer. Voor spiering in het IJsselmeer zijn er aanwijzingen dat de paaitijd met enkele weken is vervroegd (figuur 4.2; Noordhuis, 2010). In theorie kan dit problemen geven als de eieren uitkomen voordat er voedsel voor de vislarven beschikbaar is. Het kan bijvoorbeeld gebeuren dat belangrijke voedselsoorten zoals watervlooien zich nog niet hebben uitgebreid, doordat ze sterker reageren op daglengte dan op temperatuur. In dit geval is dit met de beschikbare gegevens niet aan te tonen, maar met name in de terrestrische ecologie is het ontstaan van zulke gevallen van 'mismatching' herhaaldelijk gedocumenteerd.

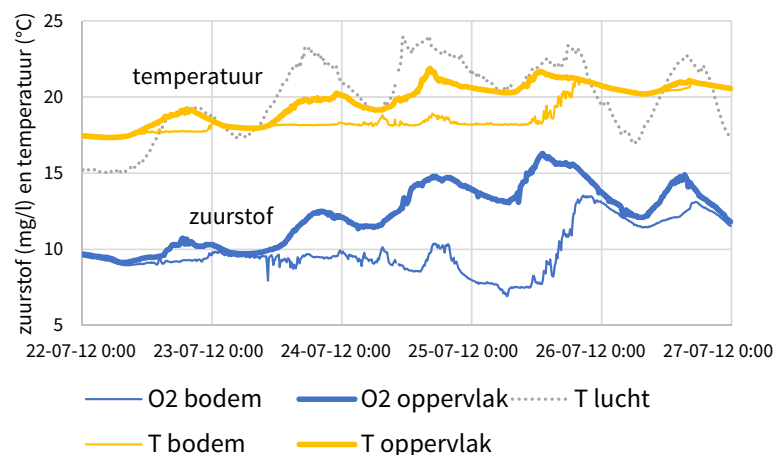
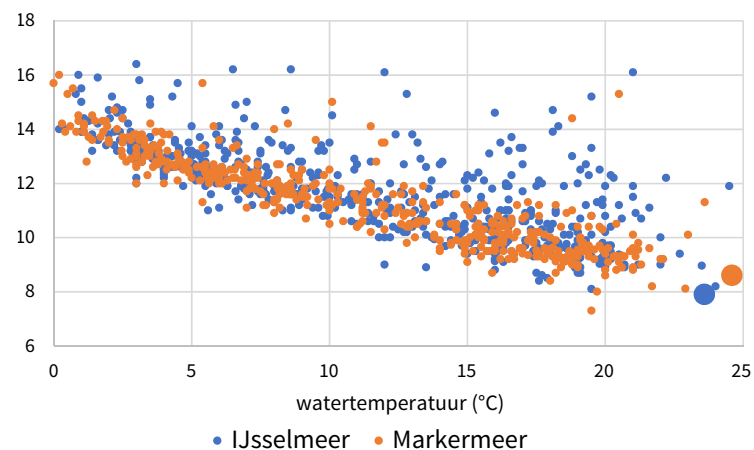


Figuur 4.2. Tijdverloop van de aanvang van het voorjaar in het IJsselmeer. Te zien is dat het aantal dagen dat het kouder is dan 6°C na 1988 afneemt en dat de spiering gemiddeld eerder paait (afname gemiddelde dagnummer van de paai). (Noordhuis, 2010). Temperatuurgegevens KNMI; paaigegevens spiering WMR, IJmuiden.

Zomer

Ook in de zomer neemt de temperatuur van het water toe. De toenemende instraling versterkt dit proces. Dit heeft tot gevolg dat zuurstof slechter oplost en de kans op stratificatie toeneemt. Dit effect is vooral relevant in het Markermeer en het IJsselmeer, waar in het iets diepere water vaak dag-stratificatie optreedt. Tijdens hittegolven kan deze stratificatie meerdere dagen aanhouden en gepaard gaan met afname van zuurstofconcentraties (figuur 4.3). In extreme situaties treedt massale sterfte op van vis of bodemfauna, in het bijzonder de

4 Het IJsselmeergebied



Figuur 4.3. Effecten van de opwarming van het IJsselmeer en het Markermeer in de winter en de zomer. Links: relatie tussen zomertemperatuur en zuurstof (afzonderlijke meetwaarden). Bij hogere watertemperaturen neemt de zuurstofconcentratie af. De hittegolf van 2006 is weergegeven met vergrote symbolen: er trad toen massale sterfte van zowel spiering als driehoeksmossel op. Gegevens RWS.

Rechts: zomertemperatuur en stratificatie. Deze figuur geeft drie dagen aanhoudende stratificatie (verschil tussen bovenste en onderste waterlaag) weer binnen een periode van vijf dagen in het IJsselmeer, in temperatuur (bovenste set; oranje = water, grijs = lucht) en zuurstofconcentraties (onderste set in blauw). De dikke lijnen geven de waarden onder het oppervlak aan, de dunne lijnen vlak boven de bodem. Gegevens RWS.

oude ‘sleutelsoorten’ spiering en driehoeksmossel (Noordhuis, 2010).

Langdurige stratificatie komt overigens alleen voor in enkele grote zandwinputten (Eemmeer).

Los van de afname van de zuurstofconcentratie kunnen ook de hoge watertemperaturen in de zomer schadelijk zijn voor verschillende diersoorten.

De randmeren zijn aanzienlijk minder gevoelig voor deze effecten, zowel in de winter als in de zomer. De kans op turbulentie is kleiner, doordat de randmeren verder landinwaarts liggen en eerder dichtvriezen. Verder zijn de meren minder gevoelig voor de wind vanwege kleinere strijklengtes.

In de zomer geldt dat de randmeren – afgezien van grote zandwinputten – te ondiep zijn voor stratificatie; ook zijn ze door de grote arealen waterplanten minder gevoelig voor zuurstoftekort.

Verder is de diversiteit aan flora en fauna groter, zodat sterfte van een enkele soort minder impact heeft.

De effecten van opwarming zijn ten dele vergelijkbaar met die van een toename van voedselrijkdom. Beide kunnen resulteren in algenbloei en in een toenemende kans op troebel water met weinig planten en een lage diversiteit. Klimaatverandering kan dus betekenen dat we te maken krijgen met negatieve effecten die vergelijkbaar zijn met die

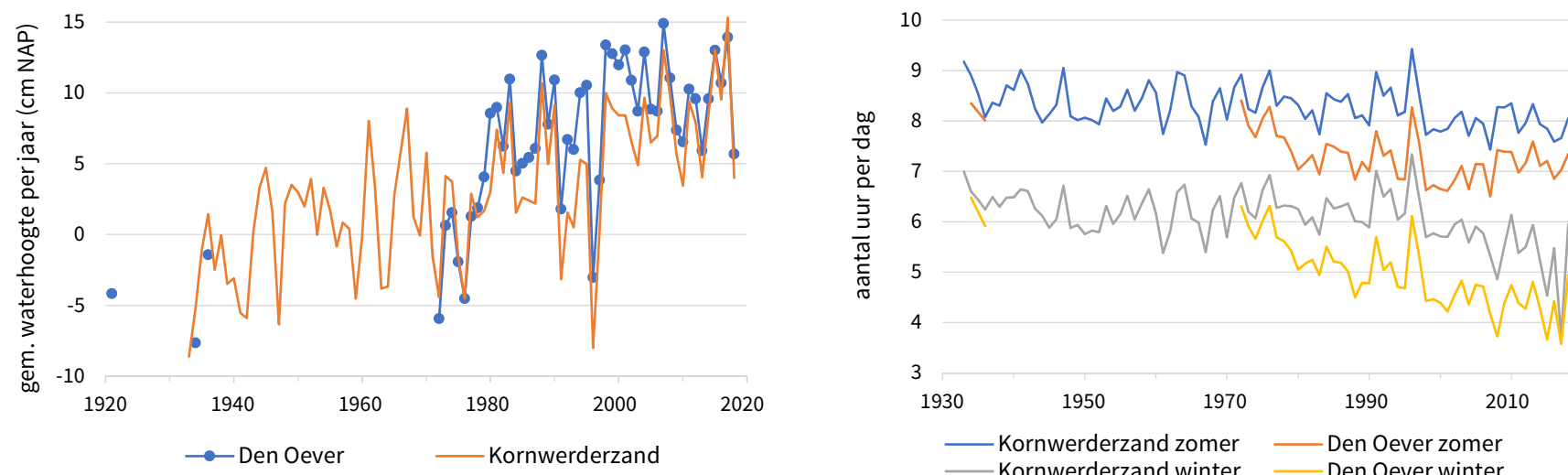
van een hoge voedselrijkdom. Het nemen van maatregelen tegen eutrofiëring zouden dus ook gunstig kunnen zijn voor het opvangen van de effecten van klimaatverandering. Een oligotroof meer zou dan beter bestand zijn tegen de negatieve effecten van opwarming (Mooij et al., 2005).

4.3.3 Zeespiegelstijging

In de Waddenzee bedraagt de zeespiegelstijging ongeveer 2 mm per jaar; sinds 1900 is het peil ongeveer 20 cm gestegen (Haasnoot et al., 2018; Baart et al., 2017). De stijgende zeespiegel heeft twee belangrijke effecten voor het IJsselmeergebied:

- De mogelijkheden van het spuien onder vrij verval nemen af, zodat er bij behoud van het huidige IJsselmeerpeil steeds vaker pompen ingezet moeten worden. Bij Den Oever is het gemiddelde peil in de Waddenzee de laatste decennia sterker gestegen dan bij Kornwerderzand, waardoor ook de spui mogelijkheden sterker zijn afgenomen (figuur 4.4). Aan het realiseren van pompcapaciteit wordt momenteel gewerkt. Een neveneffect van het inzetten van pompen is dat het (winter)peil strakker gehandhaafd kan worden dan onder vrij verval alleen. De peildynamiek neemt daardoor af, met mogelijk negatieve gevolgen voor de ecologie.
- De kans op zoutindringing – bijvoorbeeld via brakke kwel – neemt toe. Dit speelt vooral een rol in het IJsselmeer nabij de Afsluitdijk. Ecologisch gezien is dit eerder een kans dan een probleem, omdat het ruimtelijke diversiteit toevoegt en de migratie van vis en schaaldieren bevordert.

4 Het IJsselmeergebied



Figuur 4.4. Zeespiegelstijging en spuumogelijkheid bij de Afsluitdijk. Links: Zeespiegel buiten de Afsluitdijk. De patronen en waarden bij Den Oever wijken enigszins af van die bij Kornwerderzand, waarschijnlijk in verband met ontwikkelingen in de morfologie van de Waddenzee. Gegevens RWS. Rechts: Aantal uren per dag dat theoretisch gespuid kan worden onder vrij verval; aantal uren dat het water in de Waddenzee lager is dan 10 cm onder de (oude) streefpeilen van -40 cm (winter) en -20 cm (zomer) in het IJsselmeer (men stopt doorgaans met spuien als de Waddenzee 10 cm lager staat dan het IJsselmeerniveau, om zoutindringing te voorkomen). Gegevens RWS.

4.3.4 Veranderende patronen in neerslag, rivierafvoer en verdamping

In 2015 zijn de KNMI-scenario's 'vertaald' naar scenario's voor rivierafvoeren (zie paragraaf 2.4). Alle scenario's geven hogere debieten in de winter en het voorjaar en mogelijk lagere debieten in de zomer. In de winter kan daardoor de aanvoer van stoffen toenemen, terwijl de verblijftijd van het water in de meren afneemt. In de zomer gebeurt het omgekeerde: de aanvoer van stoffen kan verminderen, terwijl de verblijftijd van het water toeneemt.

Verder zullen andere rivierdebieten leiden tot veranderingen in de stroomsnelheden, wat effect kan hebben op de visintrek van en naar meren. Tot nu toe is de toename van rivierdebieten in de winter nog niet waargenomen, wel een lichte afname in de zomer.

Als gevolg van het grote oppervlak van het IJsselmeer en het Markermeer hebben neerslag en verdamping een relatief grote invloed op de waterbalans. Toename van neerslag in de winter en van verdamping in de zomer kunnen daardoor respectievelijk een relatief

sterke afname van de winter- en toename van de zomerverblijftijd tot gevolg hebben. Daarmee neemt ook het verschil tussen verblijftijden in de winter en zomer toe.

4.3.5 Veranderende windpatronen

Zoals in paragraaf 2.4 is beschreven, is de frequentie van zuidwestenwinden in de winter toegenomen. Door de geringe diepte en het grote oppervlak zijn het IJsselmeer en het Markermeer hier gevoeliger voor dan veel andere wateren.

De snelheden van wind uit het (zuid)westen zijn gemiddeld hoger dan die van winden uit andere richtingen. Een effect daarvan is dat de turbulentie én de scheefstand van het water in de winter toenemen.

Daarnaast heeft de zuidwestenwind via opstuwing van het kustwater effect op zeespiegel langs de kust en op de temperatuur van het water in de winter (via de aanvoer van zachte atlantische lucht). Daardoor neemt de kans op ijsbedekking af en neemt de turbulentie toe.

Vanwege de relatie met de noord atlantische oscillatie zijn deze effecten in principe periodiek. Dat geldt in de praktijk vooral voor wind en turbulentie. Door de natuurlijke oscillatie in combinatie met de wereldwijde veranderingen verlopen sommige aspecten van klimaatverandering bij ons in de praktijk min of meer stapsgewijs.

4.3.6 Instraling

De toename van zonuren en instraling (vooral in het voorjaar) heeft een relatief groot effect op de opwarming van de grote en ondiepe meren. In paragraaf 2.6 wordt de achtergrond hiervan toegelicht.

4 Het IJsselmeergebied

Naast het broeikaseffect draagt ook de toenemende instraling bij aan de temperatuurstijging. Omdat de instraling van januari tot april relatief het sterkst toeneemt, draagt dit vooral bij aan het eerder aanvangen van het groeiseizoen. Dit heeft gevolgen voor soorten die in het voorjaar op temperatuur reageren. Daarnaast zorgt de toename van zonuren mogelijk voor vervroeging van de cycli van soorten die primair door daglengte worden gestuurd. De schijnbare vervroeging in toename van plankton in het voorjaar in sommige meetreeksen vergt echter nog nader onderzoek. In een meer in China (Taihu) is een sterke correlatie gevonden tussen (uren)zonneshijn en de start en

duur van de bloei van cyanobacteriën (Zhang et al., 2016).

Doordat instraling alleen overdag plaatsvindt, nemen de temperatuurverschillen tussen dag en nacht toe. Dit effect is het sterkst in maart en april. Dit kan gevolgen hebben voor de fauna. Van sommige diersoorten is bijvoorbeeld bekend dat te grote temperatuurfluctuaties nadelig zijn voor de energiehuishouding. Bij de driehoeksmossel wordt de voortplanting verstoord, doordat de uitstoot van mannelijke en vrouwelijke geslachtsproducten niet meer synchroon verloopt. Dit is vooral problematisch in zeer ondiepe systemen (<1,5 meter), omdat daar de verschillen tussen dag en nacht het sterkst zijn.

4.3.7 Verzuring

Dit is een potentieel effect (zie paragraaf 2.7). Het gaat om afname van de pH als gevolg van het oplossen van grotere hoeveelheden CO₂ vanuit de atmosfeer. Een afname van de pH heeft in het IJsselmeergebied wel plaatsgevonden, maar die is ten minste deels veroorzaakt doordat de algenbloei is verminderd als gevolg van afname van de voedselrijkdom. Een mogelijke klimaat gebonden verzuring is dus tot nu toe gemaskeerd door de veranderingen in waterkwaliteit.



5 Het Rivierengebied

Het rivierengebied kan worden ingedeeld in 11 ‘clusters’ van riviertrajecten in het boven- en benedenrivierengebied. Door verschillende fysieke eigenschappen van deze trajecten reageren de clusters ieder op een andere manier op klimaatverandering. Dit hoofdstuk gaat hierop dieper in.

5.1 Specifieke kenmerken van het gebied

De 11 clusters van het boven- en benedenrivierengebied zijn weergegeven in tabel 2 en tabel 3. Voor het bovenrivierengebied is gebruik gemaakt van informatie uit ‘smartrivers’ (www.smartrivers.nl). Voor het benedenrivierengebied is gebruik gemaakt van gegevens over getijslag (data Rijkswaterstaat) en zoutindringing (Beumer et al., 2009).

Bovenrivierengebied

In het bovenrivierengebied wordt onderscheid gemaakt tussen de Maas en de Rijn, op grond van verhang- en afvoercharacteristieken. De Maas is een regenrivier, terwijl de Rijn een combinatie is van een regen- en een gletsjerrivier. De verschillen in peilregime en verhang weerspiegelen zich in duidelijke verschillen in de soortensamenstelling tussen beide rivieren.

Benedenrivierengebied

De clusterindeling van wateren in het benedenrivierengebied is gebaseerd op verschillen in zoutindringing en getijslag (zie tabel 3). Op dit ogenblik is er een duidelijke gradiënt in zoutindringing, van dagelijks in overgangswateren (zoals de nieuwe waterweg) tot zelden voor zoetwatergetijdenwateren die meer stroomopwaarts liggen (zoals de Brabantse Biesbosch en getijden Lek).

Bij de getijdenamplitude wordt onderscheid gemaakt tussen een grote (circa 0,6 meter) en een kleine getijslag (0,3 meter). Deze amplitude kan veranderen door stijging van de zeespiegel en door wijzigingen in de rivierafvoer.

Tabel 2. Kenmerken van de riviertrajecten van het bovenrivierengebied van de Rijn en Maas die tot de rijkswateren worden gerekend. De kolom ‘peilvariatie’ beschrijft de fluctuaties van het rivierpeil tijdens het groeiseizoen (mei – oktober).

	Riviertraject	Peil-variatie	Peilregime bij lage afvoeren	Cluster
Rijn (bovenrivierengebied)	Noordelijke IJssel (Deventer – Kampen)	Klein	Ongestuwd	A
	Zuidelijke IJssel (Arnhem – Deventer)	Matig-groot	Ongestuwd	B
	Gestuwde delen Neder-Rijn/Lek (Arnhem – stuw Hagestein)	Klein	Gestuwd	C
	Boven-Rijn, Gelderse Poort, Waal	Groot	Ongestuwd	D
Maas (bovenrivierengebied)	Grensmaas (grindrivier)	Groot	Ongestuwd	E
	Bovenmaas, Maasplassengebied en Zandmaas (veelal zandbodem, toevoer van pleistoceen kwelwater vanuit aangrenzend terrassenlandschap)	Klein	Gestuwd	F
	Bedijkte Maas (karakter laaglandrivier)	Klein	Gestuwd	G

5 Het Rivierengebied

5.2 Relevante ontwikkelingen naast klimaatverandering

5.2.1 Veranderingen in waterkwaliteit

In de Rijn zijn sinds 1970 drie periodes geweest waarin de waterkwaliteit sterk is veranderd: afname van chemische en organische verontreiniging (vanaf 1977-1980), afname van fosfaat (van 1985-1990) en afname van zwevend stof (vanaf 2003; zie paragraaf 4.2.1).

5.2.2 Volledige bedijking

De bedijking van de grote rivieren was rond 1350 gereed (Kleinhans et al., 2013; Klijn et al., 2018). Daarmee nam de overstromingsvlakte van de Rijn en Maas fors af. Met name de laagdynamische delen van de uiterwaarden, die op grote afstand van de rivier liggen, zijn sindsdien permanent van de rivier afgesneden. Verder zorgt de bedijking ervoor dat de rivieren hun sediment alleen nog maar kunnen afzetten in de uiterwaarden langs de oevers en niet meer in de komgebieden tussen de rivieren. De uiterwaarden hogen hierdoor versneld op. In het kader

van ‘ruimte voor de rivier’ zijn in recente jaren de winterdijken op verschillende plekken landinwaarts verplaatst, waardoor het rivierwater meer ruimte krijgt tijdens overstromingen. Een voorbeeld hiervan is het gebied Munnikenland nabij slot Loevestein, dat nu als natuurgebied is ingericht.

5.2.3 Geen natuurlijke verjonging van het winterbed

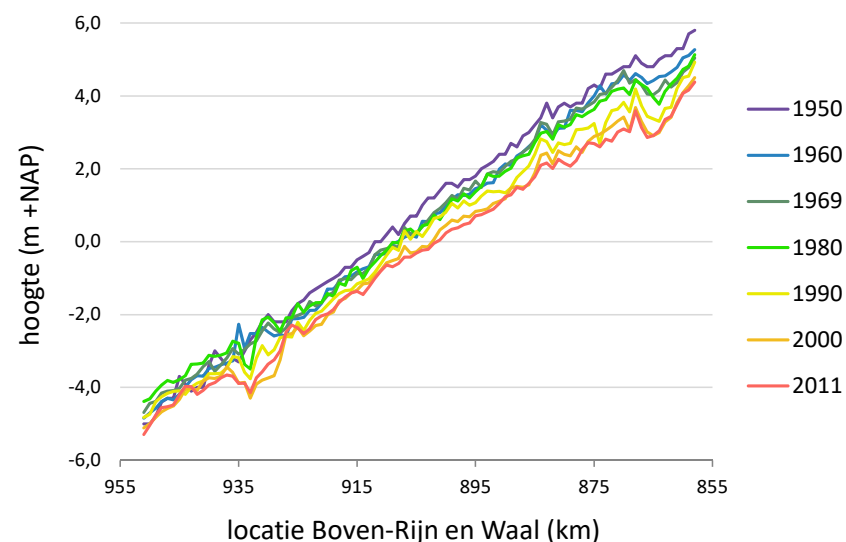
Tot aan het einde van de 19^e eeuw kon de rivier zich in zijwaartse richting verplaatsen, waarbij zowel afslag van de oevers optrad, als afzettingen van nieuw sediment op andere locaties. De Rijn en Maas schuurden de oevers van buitenbochten uit en zetten sediment in de binnenbochten af. Doordat beide processen het sterkst zijn in de tweede helft van de bochten, wandelden de meanderbochten stroomafwaarts en vond voortdurende verjonging plaats van het winterbed. Oude delen werden opgeruimd en jonge nieuwe delen werden gevormd (Klijn et al., 2018). Dit proces kwam echter tot stilstand door de aanleg van kribben waarmee begonnen werd aan het einde van de 19^{de} eeuw.

Deze kribben verhinderen dat de geul zich verplaatst, waardoor er nauwelijks meer erosie optreedt (Kleinhans et al., 2013). Hierdoor vindt ook geen aanwas van nieuw land plaats, en verouderen de uiterwaarden. Dit gaat gepaard met verlies aan milieudiversiteit, en daarmee aan biodiversiteit. Voor de natuurlijke morfodynamiek, en de hiermee samenhangende natuurwaarden, is de vastlegging van de hoofdstroom dus zeer nadelig geweest (Klijn et al., 2018).

Tabel 3. Kenmerken van riviertrajecten van het benedenrivierengebied die tot de rijkswateren worden gerekend.

	Riviertraject	Zout-indringing	Getijslag	Cluster
Rijn-Maas monding (beneden-rivierengebied)	Nieuwe Waterweg, Hartel-, Ca-land-, Beerkanaal; Nieuwe Maas, Oude Maas (benedenstrooms Hartelkanaal)	Dagelijks	Groot	H
	Haringvliet	Dagelijks (beperkt gebied)	Klein	I
	Oude Maas (bovenstrooms Hartelkanaal)	Zelden	Groot	J
	Slidrechtse Biesbosch	Niet	Groot	J
	Getijden Lek	Niet	Groot	J
	Dordtsche Biesbosch	Niet	Klein	K
	De Merwedese	Niet	Klein	K
	Hollandse IJssel	Niet	Klein	K
	Brabantsche Biesbosch	Niet	Klein	K
	Getijdenmaas	Niet	Klein	K
	Afgedamde Maas	Niet	Klein	K
	Bergsche Maas	Niet	Klein	K
	Hollandsch Diep	Niet	Klein	K

5 Het Rivierengebied



Figuur 5.1. De ontwikkeling van de hoogteligging van de bodem van het zomerbed van de boven-Rijn en Waal sinds 1950 (op basis van gegevens van Arjen Sieben, Rijkswaterstaat; figuur overgenomen uit Klijn et al., 2019). Rivier-kilometer 855 en 955 corresponderen ongeveer met resp. de plaatsen Lobith en Gorinchem.

5.2.4 Rivierinsnijding

Op dit moment vinden uitschuring en daling van de rivierbodem van de Rijntakken plaats, in het bijzonder van de vrij afstromende Waal en IJssel. Deze insnijding is het gevolg van de aanleg van kribben, waardoor het zomerbed versmalde en er bodemerosie optrad. Sindsdien graaft de rivier zich steeds dieper in het landschap in. Verder treedt er nauwelijks sedimentatie op, omdat er geen nieuw sediment wordt aangevoerd uit Duitsland of via oeverafslag (zie paragraaf 5.2.5).

Door de kribben is dat proces niet meer mogelijk.

De daling van de rivierbedding gaat extra snel op plaatsen waar de bochten in de rivier voor de scheepvaart zijn afgesneden. Het effect van een bochtafsnijding is dat de rivier zich bovenstrooms hiervan insnijdt, omdat de rivier daar sneller gaat stromen. Die insnijding breidt zich op den duur nog verder uit, waardoor de rivierbodem uiteindelijk als geheel lager komt te liggen (Klijn et al., 2018).

De afgelopen 150 jaar is de rivierbodem circa 2 meter gedaald door het uitschuren van de rivierbodem (figuur 6.1) Terwijl de uiterwaarden circa 1 meter hoger zijn geworden door sedimentatie van zand en klei tijdens rivieroverstromingen. Door de normalisatie is er dus een sterke tweedeling ontstaan in het rivierenlandschap, met een diepe, zichzelf insnijdende geul die geflankeerd wordt door hoge, verdroogde uiterwaarden (Kleinhans et al., 2013).

5.2.5 Verstoorde sedimentbalans

Door de stuwen in de Maas en Nederrijn-Lek is de morfologische dynamiek sterk verminderd (Klijn et al., 2018). De aanvoer van sediment uit de stroomgebieden is verstoord door stuwdammen in verschillende zijrivieren en kanalisaties van stukken van de Rijn en Maas (Klijn, et al., 2018; Kleinhans et al., 2013). Het water kan de stuwen passeren, maar het grovere sediment (zand en grind) niet. Hierdoor zandt de bodem bovenstrooms van dammen en stuwen aan, terwijl de rivier benedenstrooms van deze dammen en stuwen een

sedimenttekort heeft, waardoor uitschuring en insnijding van de rivierbodem optreedt.

In Duitsland is de bodem onder de Rijn verzakt als gevolg van mijnbouw. Deze verzakkingen vangen ook zand en grind in.

5.2.6 Vegetatie-onderhoud

De vegetatie in het winterbed van de rivieren is dichter en hoger dan twintig jaar geleden en biedt hierdoor meer weerstand aan het water dat bij hoge rivierafvoer door de uiterwaarden stroomt. Een ruige begroeiing in de uiterwaarden kan de doorstroming bij hoogwater belemmeren. Dit vergroot de kans op extra hoge rivierpeilen en daarmee het risico op overstromingen. De verwachting is dat hoog water in de grote rivieren – als gevolg van klimaatontwikkeling – vaker zal voorkomen. Rivieren moeten dit water vlot kunnen afvoeren. Goed beheer en onderhoud van de begroeiing in de uiterwaarden is dus erg belangrijk.

De afgelopen jaren heeft Rijkswaterstaat het programma Stroomlijn uitgevoerd, waarbij achterstallig onderhoud is uitgevoerd. In het kader van dit programma is een groot oppervlak aan ruwe vegetatie (ruigtes, struwelen en bos) verwijderd uit de 'stroombaant' van de rivier. De stroombaant is het deel van de rivier dat bij hoog water het meeste water afvoert. Deze delen van de uiterwaarden moeten ook in de toekomst gevrijwaard blijven van vegetatie. Als referentiejaar hiervoor is de aanwezige vegetatie in de uiterwaarden in 1997 aangehouden.

5 Het Rivierengebied

5.3 Effecten van klimaatverandering voor het rivierengebied

Levensgemeenschappen in rivieren zijn vooral gevoelig voor verandering in de afvoer (resultierend in gewijzigde stroomsnelheden, rivierpeilen en daarmee grondwaterstanden in uiterwaarden) en watertemperatuur. In het beneden-rivierengebied spelen zeespiegelstijging en verzilting ook een grote rol. Effecten van verzuring zijn minder relevant voor deze systemen, en worden daarom niet verder behandeld.

5.3.1 Toenemende temperatuur

Als gevolg van klimaatverandering neemt de temperatuur van het water toe, wat – direct en indirect – invloed heeft op het rivierecosysteem. Soorten kunnen verdwijnen of verschijnen. Soorten verdwijnen omdat ze zich niet kunnen handhaven bij temperaturen die, tijdelijk of zelfs meer permanent, boven bepaalde drempelwaardes uitkomen. Van meerdere vissoorten is bekend dat met de opwarming van de winters de paai met enkele weken is vervroegd. In theorie kan dit problemen geven als het voedsel voor de vislarven nog niet beschikbaar is als de eieren uitkomen.

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

5.3.2 Zeespiegelstijging

De komende decennia zal de zeespiegel naar verwachting versneld stijgen. Dit proces kan mogelijk (veel) sneller verlopen dan tot nu is aangenomen bij de Deltascenario's (Haasnoot et al., 2018; zie figuur 3.6). Door zeespiegelstijging lopen de zoet- en brakwatergetijdengebieden in het benedenrivierengebied het risico om (volledig) te verdrinken. De sedimentatie van zand en klei tijdens rivieroverstromingen kan dit effect tegengaan, waardoor de hoogte van het land kan 'meegroeien' met het stijgende zeeniveau. In het beneden-rivierengebied zijn deze mogelijkheden echter beperkt, door de afname van sedimentconcentraties van de Rijn en Maas (Van der Deijl, 2018). In de Brabantse Biesbosch resulteren grotere afvoerpieken overwegend in een netto afname van de sedimentatie in het gebied, vooral als gevolg van de lage sedimentconcentratie in het Rijnwater (Verschelling, 2018; Van der Deijl, 2018).

De amplitude van het getij (springtij, doodtij) heeft een relatief klein effect op de slibhuishouding in de Brabantse Biesbosch.

Een gedeelte van dit gebied zal waarschijnlijk verdrinken als gevolg van een stijgende zeespiegel (Verschelling, 2018); (Van der Deijl, 2018). Een ander effect van zeespiegelstijging is dat er meer zout water stroomopwaarts doordringt. De verzilting wordt versterkt bij lage rivierafvoeren, als het zoute water tot ver stroomopwaarts kan oprukken. Hierdoor kunnen aanzienlijke delen van het huidige zoetwatergetijdengebied brak of zout worden, waardoor kenmerkende soorten van deze gebieden achteruit kunnen gaan en andere soorten zich kunnen vestigen.

5.3.3 Veranderende patronen in rivierafvoer, neerslag en verdamping

In 2015 zijn de KNMI-scenario's 'vertaald' naar scenario's voor rivierafvoeren van de Rijn bij Lobith en de Maas bij Borgharen (zie paragraaf 2.1). Die geven een toename te zien van de afvoer in de winter en een mogelijke afname in de zomer. De afvoer van de rivier heeft invloed op verschillende factoren die van invloed zijn op de ecologie, zoals veranderende erosie- en sedimentatiepatronen, stroomsnelheden, rivierpeilen en concentraties van nutriënten en andere stoffen.

Erosie- en sedimentatiepatronen

Gewijzigde afvoerpatronen van rivieren gaan gepaard met veranderingen in erosie- en sedimentatiepatronen. Hierdoor veranderen zowel de hoogteligging als de bodemsamenstelling, die beide cruciale randvoorwaarden zijn voor het ecologisch functioneren en daarmee ook voor de soortensamenstelling. Op een groot schaalniveau zijn de wijzigingen in dynamiek tussen riviertrajecten van belang, evenals veranderingen in de mate van rivierinsnijding. Deze processen zijn bijvoorbeeld van invloed op het functioneren van nevengeulen: voldoen deze nog steeds aan de beoogde functie bij lage rivierafvoeren en voortgaande bodemerosie? Op lokaal schaalniveau bepaalt de variatie in bodemsamenstelling de kansen voor robuuste riviernatuur en biodiversiteit; voor een juiste effectinschatting is daarom gedetailleerde kennis nodig van sedimentatie- en erosieprocessen, waarbij een koppeling wordt gelegd tussen bovengenoemde tijd- en ruimteschalen.

5 Het Rivierengebied

Stroomsnelheden

Veranderingen in rivierafvoer leiden ook tot andere stroomsnelheden van het water. Vooral in gestuwde rivierpanden bestaat de kans dat de waterstroming tijdens lage rivierafvoeren vrijwel tot stilstand komt. Dit heeft grote gevolgen voor rheofiele (stroomminnende) soorten, waar rivieren nu juist mede hun natuurwaarde aan ontleen. Bovendien bestaat bij een lage rivierafvoer de kans op een tijdelijke algenbloei. Deze risico's zijn reëel: in de droge zomer van 2018 trad bijvoorbeeld blauwalgenbloei op in de gestuwde Maas, terwijl in de vrij afstromende Waal ook piekconcentraties van chlorofyl werden gemeten tijdens een periode van lage rivierafvoer in het voorjaar van 2011. Algenbloei vermindert de helderheid van het water en vergroot het risico op zuurstofloosheid. Hiernaast kunnen veranderingen in stroomsnelheden ook effect hebben op visintrek. Een verlaagde rivierafvoer kan ook gepaard gaan met een grotere zoutindringing, wat eveneens de soortensamenstelling sterk kan beïnvloeden. Dit speelt echter vooral in het benedenrivierengebied (zie paragraaf 5.1).

Rivierpeilen

Fluctuaties in het rivierpeil (en – bijgevolg – waterdiepte) hebben een grote invloed op de natuur. Zo bepaalt de waterdiepte de mogelijkheden voor waterplantengroei en (paai- en opgroei) -condities voor vis en macrofauna. Door de hogere rivierafvoer neemt in de wintermaanden de kans op overstroming van uiterwaarden toe, terwijl in de zomerperiode juist meer droogval kan optreden. Lage rivierstanden hebben eveneens een grote invloed. Dit geldt niet alleen voor de hoofdstroom van de rivier, maar ook voor de aangrenzende uiterwaarden. Tijdens lage rivierpeilen infiltreert er namelijk water vanuit plassen in de uiterwaarden naar de rivier, waardoor het waterpeil in die plassen daalt en ze (deels) kunnen droogvallen. Rivierinsnijding kan de effecten van lagere rivierafvoeren versterken. Hierbij moet echter opgemerkt worden dat de bodemsamenstelling een grote invloed heeft op grondwaterstromingen in uiterwaarden. Vooral de variatie in bodemsamenstelling is van belang, zowel in de lengterichting van de rivier als dwars erop. Hiernaast speelt kwel vanuit aangrenzende pleistocene zandgronden een belangrijke rol. Met name in uiterwaarden langs de Maas is een grote toevoer van kwel vanuit de aangrenzende terrassen, maar ook langs de neder-Rijn en IJssel treedt lokaal sterke kwel op. Op dit ogenblik is er nog onvoldoende kennis over grondwaterstanden in uiterwaarden; inzicht hierin is belang voor een juiste voorspelling. Voor de effecten van klimaatverandering op de ecologie is het van belang welke soorten er verdwijnen als gevolg van de toegenomen peildynamiek en veranderde kwelintensiteit, en welke soorten hiervoor

in de plaats komen. In het deelproject 'klimaatverandering en rivieren' (KPP-PAGW) wordt dit in 2019 onderzocht.

Chemie

Veranderingen in de rivierafvoer hebben op verschillende manieren invloed op nutriëntenkringlopen in het riviersysteem. Door toegenomen neerslag tijdens de wintermaanden kunnen meer nutriënten uitspoelen naar de rivier, terwijl lage rivierafvoeren en hoge temperaturen tot 'indikking' van het water leiden, met hogere concentraties van nutriënten (en andere stoffen) tot gevolg. Hogere concentraties van nutriënten vergroten de kans op algenbloei, vooral bij lage rivierafvoer (zie hierboven). Ook kan een verhoging van de chloride-concentratie tot vertraging van de groei van waterplanten leiden (Van den Brink, 1994) of tot wijzigingen in de soortensamenstelling van macrofauna. Verhoging van concentraties van toxische stoffen (denk aan restanten van geneesmiddelen of gewasbeschermingsmiddelen) kan ook gevolgen hebben voor de ecologie.

Neerslag en verdamping

De toename van neerslag in de winter en verdamping in de zomer is in het rivierengebied minder van belang voor de ecologie dan in grote meren, omdat deze effecten relatief klein zijn ten opzichte van veranderingen in rivierafvoer. Niettemin kunnen verdamping en neerslag wel een belangrijke rol spelen in stilstaande wateren (zoals uiterwaardplassen en stuwpanden met een geringe toevoer van rivierwater). Het effect van veranderingen in rivierpeilen kan hierdoor worden versterkt.

5 Het Rivierengebied

5.3.4 Veranderende windpatronen en verzuring

Veranderende windpatronen zijn in het rivierengebied van ondergeschikt belang ten opzichte van veranderingen in rivierafvoeren. Niettemin is in het benedenrivierengebied vastgesteld dat een toename in windsnelheid tot een verminderde sedimentatie kan leiden (Verschelling, 2018; Van der Deijl, 2018).

5.3.5 Instraling

De afgelopen decennia is de instraling toegenomen, met name in het voorjaar, zie paragraaf 2.6. Dit heeft vooral effect op de watertemperatuur van betrekkelijk ondiepe watersystemen, zoals (mogelijk) de Grensmaas (deels gemaskeerd door afname van koelwaterlozing). Deze opwarming komt bovenop de temperatuurtoename in de winter door wereldwijde opwarming en de (tijdelijke) toename van zuidwestenwind. Hoe groot het aandeel van toegenomen zinstraling op de stijgende watertemperaturen in de rivieren is, is op dit moment onduidelijk.



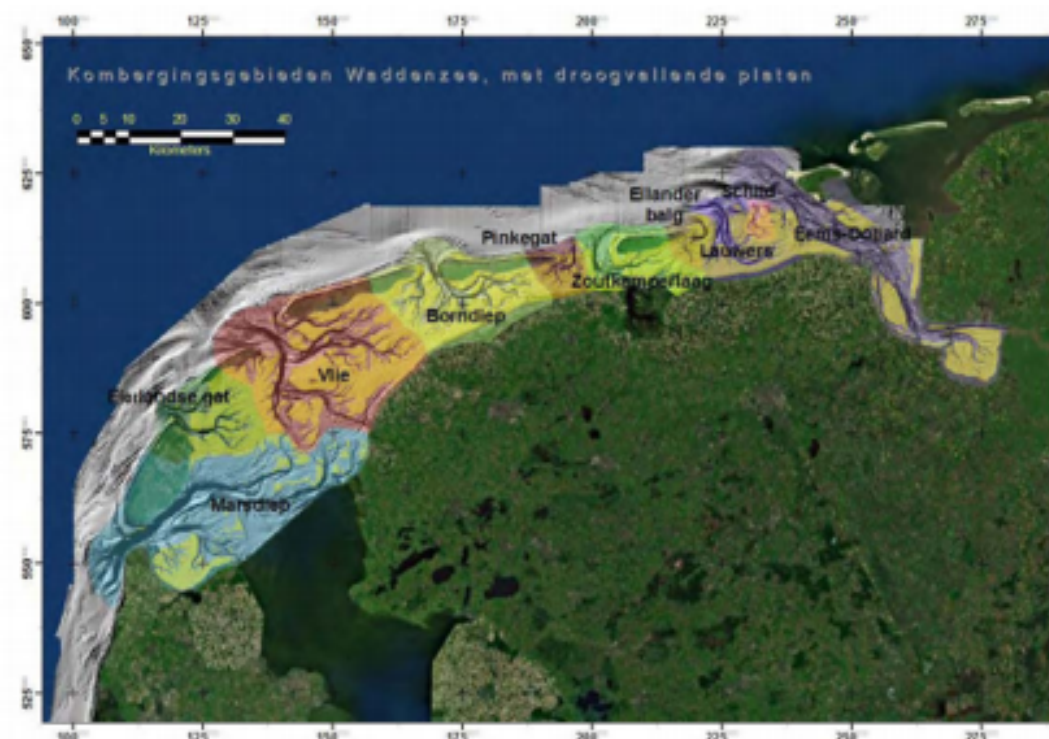
6 De Waddenzee en Eems-Dollard

Het Waddengebied is een uniek wetland met een grote variatie aan landschappen met geulenstelsels en droogvallende platen en kwelders. Sinds 2009 is het gebied aangewezen als een UNESCO-werelderfgoed gebied. Het Waddengebied reikt tot voorbij de grenzen van Nederland. Het totale oppervlak bedraagt bijna 15.000 km², waarvan 4.000 km² in Nederland ligt. Dit hoofdstuk zoomt in op het Nederlandse deel van het Waddengebied en daarbij het Eems estuarium.

6.1 Specifieke kenmerken van het gebied

Sedimentdynamiek Waddenzee

De Waddenzee is een getijdensysteem dat wordt afgeschermd door de Waddeneilanden met zeegaten tussen de eilanden en de Noordzeekust. Het staat in open verbinding met de Noordzee en het Eems estuarium en wisselt daarmee sediment en nutriënten uit (Common Wadden Sea Secretariat, 2017). De Nederlandse Waddenzee loopt van den helder tot het Eems estuarium inclusief de Dollard; de Eems is de enige iets grotere rivier die in de Nederlandse Waddenzee uitkomt; hoewel de afvoer beperkt is, zijn de stroomsnelheden door de getijwerking relatief groot. Andere zoetwaterbronnen zijn afwateringen vanuit de polders, en de spui van zoet water vanaf het IJsselmeer en het Lauwersmeer.



Figuur 6.1. Nederlandse Waddenzee met kombergingsgebieden (Van Duren et al., 2009).

Het Eems-estuarium tot en met de Dollard wordt tevens tot het Waddengebied gerekend. In het Eems-estuarium ligt een belangrijke scheepvaartroute, waarvan de vaargeul de afgelopen tientallen jaren een aantal keer is verdiept. Het onderhoud van de vaargeul en van de havens die aan het estuarium liggen, levert veel sediment op dat wordt verspreid. Ook ander onderhoud, zoals het baggeren van andere vaargeulen en havens is een bron van sediment. Daarnaast is de Waddenzee via de spuisluizen in de Afsluitdijk (eenzijdig) verbonden met het IJsselmeer en de daarin uitmondende IJssel (de noordelijkste Rijntak) en ook via spuisluizen met het Lauwersmeer en de daarin uitmondende Hunze.

De sedimentdynamiek ondergaat nog steeds veranderingen als gevolg van het afsluiten van de Zuiderzee, het Lauwersmeer en van de inpoldering van kwelders. Hierdoor is de komberging (de ruimte voor het water dat de Waddenzee in en uitstroomt met elk getij) sterk afgenomen. Dit heeft geleid tot sterke veranderingen in de morfologie en de ecologie.

De Nederlandse Waddenzee wordt onderverdeeld in kombergingsgebieden (figuur 6.1). Dit zijn gebieden rondom een zeegat, waar de in- en uitvoer van sediment (zand en slib) vanuit en naar de Noordzee

6 De Waddenzee en Eems-Dollard

gedomineerd wordt door het desbetreffende zeegat. Daarnaast wordt vaak onderscheid gemaakt tussen de oostelijke Waddenzee (grofweg het gebied rond Ameland en Schiermonnikoog) en de westelijke Waddenzee (ten westen daarvan).

Het Waddengebied heeft zich gedurende de afgelopen 8.000 jaar ontwikkeld en is daarmee op geologische schaal relatief jong; de westelijke Waddenzee is nog veel jonger (Common Wadden Sea Secretariat, 2017). De ontwikkeling is een gevolg van de balans tussen relatieve zeespiegelstijging en het aanbod van sediment uit de Noordzee (Wang et al., 2018). De Dollard is gevormd door meerdere stormvloedende rond 1500 en is ook relatief jong. Het gebied was aanvankelijk veel groter, maar is door landaanwinningswerken en inpolderingen verkleind. Momenteel lijkt de oostelijke Waddenzee in een dynamisch evenwicht te zijn met de zeespiegelstijging.

De aanleg van de Afsluitdijk heeft de bodemontwikkeling in het westelijk gedeelte van de Waddenzee sterk beïnvloed en de reactie erop is nog niet gestopt. Duidelijk is wel dat het kombergingsgebied van het Marsdiep (tussen Texel en Den Helder) een veel dieper systeem is – en zal blijven – dan de andere kombergingsgebieden. De westelijke Waddenzee is daardoor gevoeliger voor versnelde zeespiegelstijging dan de oostelijke Waddenzee.

Grote rijkdom aan habitats en organismen

Het Waddengebied is een nationaal en internationaal beschermd

intergetijdengebied en kenmerkt zich door een grote variatie aan leefgebieden, met verschillende gradiënten in morfologie, stroming, korrelgrootteverdeling, saliniteit, diepte en droogvalduur. Deze bijzondere fysische omstandigheden zijn van groot belang voor de natuur van de Waddenzee (Janssen et al., 2017). De variatie in leefgebieden biedt plaats aan een grote rijkdom aan soorten, van vislarven en mosselbanken tot vogels en zeehonden. Grote verschillen in wind, golven, stroming en waterstanden in tijd en ruimte zijn verantwoordelijk voor een hoge dynamiek in dit systeem. Dit zorgt voor een constante verandering van de leefgebieden en verjonging van natuurlijke structuren, zoals mosselbanken en kwelders. Deze verschillende stadia van habitats zijn belangrijk voor de diversiteit, omdat juist de intermediaire habitats de grootste diversiteit kennen ten opzichte van jonge en verouderde habitats (Van Duren et al., 2009). Wel zijn er plaatselijk problemen met bijvoorbeeld gebrek aan verjonging van kwelders of het behoud van mosselbanken, zoals in de Dollard.

De dynamische landschappen vormen een hoogproductief leefgebied voor meer dan 10.000 soorten planten en dieren. De kwelders bijvoorbeeld bevatten zo'n 2.300 verschillende soorten, en de overige mariene en brakke zones zo'n 2.700 soorten (Common Wadden Sea Secretariat, 2017). De productieve en ondiepe kustzone van de Waddenzee is een belangrijk opgroei gebied (kinderkamer) voor jonge vissoorten, waaronder commerciële vis zoals de schol (Walker, 2015).

Sinds de 80^{er} jaren is de visbiomassa en dichtheid opvallend afgenomen, zijn warmwatersoorten toegenomen en koudwatersoorten (in mindere mate) afgenomen. Ook de kinderkamerfunctie is afgenomen voor m.n. schol (Van Walraven, 2017; Van der Veer, 2015). Het Waddengebied is internationaal vooral bekend als belangrijke tussenstop voor een groot aantal verschillende soorten watervogels, die tijdens de trek van noord naar zuid en vice versa aansterken in de Waddenzee (Blew et al., 2017). Ook is het gebied cruciaal voor de gewone en de grijze zeehond.

Biobouwers

In en op de getijdeplaten van de Waddenzee leven verschillende organismen die een sterke invloed hebben op de sedimentbewegingen van het gebied. Sommige soorten zorgen voor het losmaken van het sediment (destabilisatie), andere soorten zijn verantwoordelijk voor het vastleggen van zand en slib (stabilisatie zoals bijvoorbeeld kiezelwieren). Hieronder zijn soorten die dichte banken en riffen vormen (kokerwormen, schelpdieren, zeegras). Soorten van deze laatste groep worden biobouwers genoemd. Door hun stabiliserende werking, hun invloed op de waterkwaliteit en hun rol als voedselbron voor vogelsoorten en hoge diversiteit, hebben deze soorten een grote invloed op de rest van het voedselweb. Voorbeelden van biobouwers in de Waddenzee zijn jonge plantensoorten (pionierssoorten) op de kwelders, klein zeegras, litorale mossel- en oesterbanken (Van Duren et al., 2009; Troost et al., 2015).

6 De Waddenzee en Eems-Dollard

6.2 Relevante ontwikkelingen naast klimaatverandering

Het Waddengebied is sterk onderhevig aan menselijke activiteiten zowel binnen het gebied, als erbuiten. Dit leidt tot een verstoring van de zand- en slibbalans en een afname aan de diversiteit aan habitats en soorten.

De invloed van menselijke activiteiten is zo groot, dat het haast onmogelijk is om van een autonome ontwikkeling te spreken.

Veel ingrepen uit het verleden hebben invloed op de balans tussen sedimentatie en erosieprocessen en daarmee op de morfologische ontwikkeling van de Waddenzee. Voorbeelden van deze menselijke activiteiten zijn de afsluiting en inpolderingen van de Zuiderzee in 1932 en het Lauwersmeer in 1969. Deze activiteiten zorgen nog steeds voor verhoogde erosie van de kustzone en sedimentatie in de getijdenbekkens.

Hierdoor groeien de platen sterker aan dan de zeespiegels-tijging, een proces dat op de lange termijn naar verwachting omkeert voor sommige kombergingsgebieden (Wang et al., 2018). Verder wordt aangenomen dat het systeem door de aanleg van de Afsluitdijk troebeler is geworden; dit wordt, naast onder meer ziekte, gezien als een belangrijke oorzaak van het vrijwel volledig verdwijnen van groot zeegras in de Nederlandse Waddenzee (Van Duren et al., 2009; Van Katwijk, 2015).

Door inpolderingen in Noord-Nederland en het afsluiten van de Lauwerszee en de Zuiderzee nam het kwelderoppervlak in de loop der eeuwen sterk af, hoewel het oppervlak sinds 100-150 jaar weer iets toe is genomen. Door bevissing zijn eind jaren '80 grote gebieden met mosselbanken verdwenen; ook hier treedt voorzichtig herstel op (Van Duren et al., 2009).

Naast ingrepen uit het verleden, hebben ook huidige activiteiten – zoals visserij, delfstoffenwinning, het baggeren van vaargeulen en vooroeversuppleties – invloed op het ecosysteem van de Waddenzee. De winning van gas en zout zorgt voor (diepe) bodemdaling. De baggervolumes nemen de afgelopen 10 jaar toe, vooral in het gebied tussen holwerd-Ameland (Walker, 2015). Baggeren en storten kan effect hebben op het evenwicht tussen water en sediment en daardoor op het doorzicht. Dit kan negatieve gevolgen hebben voor biota zoals mosselen en zeegrassen (Van der Zee et al., 2017). Commerciële visserij in de Waddenzee beperkt zich tot garnalen en schelpdier-visserij. Mosselvisserij is momenteel nog wel toegestaan, maar het oogsten van mosselzaad wordt zo mogelijk per 2020 aan banden gelegd (Baarse, 2014).

Het in het oosten gelegen Eems-Dollard estuarium ondervindt vooral problemen met de troebelheid van de waterkolom. Dit komt onder andere door een toename van het getij als gevolg van inpolderingen en de verdieping van de vaargeul (Van Maren et al., 2016). Met name de hoge sedimentconcentraties in de waterkolom hebben een grote impact op de primaire productie door fytoplankton. De extreem hoge slibconcentraties in de Eemsrivier veroorzaken zuurstofloosheid in bepaalde gebieden met drastische gevolgen voor de ecologie, zoals vissterfte en de vorming van een barrière voor soorten die naar het achterland doortrekken. Beide processen dragen bij aan een ecologische degradatie van het Eems-Dollard gebied. Voor het estuarium geldt de Natura 2000 doelstelling 'kwaliteitsverbetering'.

De (grootschalige) morfologische ontwikkeling van de Waddenzee, en de daarmee samenhangende veranderingen in habitats zijn sterk bepalend voor de kwaliteit van het ecosysteem. Het is daarom belangrijk om de invloed van menselijke ingrepen op de morfologie goed te begrijpen en te kunnen voorspellen. Door de vele ingrepen en activiteiten in het gebied is het echter lastig om causale verbanden te kunnen leggen tussen ontwikkelingen en activiteiten en de invloed daarvan op veranderingen in de ecologie, mede omdat de morfologische ontwikkelingen zich op grote tijd- en ruimteschalen afspelen.

6 De Waddenzee en Eems-Dollard

6.3 Effecten van klimaatverandering

6.3.1 Temperatuurstijging

De temperatuur van het water in de Waddenzee is sinds de jaren '60 van de vorige eeuw met ongeveer 1,5 °C toegenomen (figuur 6.2). De temperatuurstijging volgt de trends van de luchttemperatuur in noordwest-Europa.

Veranderingen in de temperatuur kunnen invloed hebben op de aanwezigheid van soorten, zoals trekvogels (die zich aanpassen aan voedselbeschikbaarheid en temperatuur) en vis.

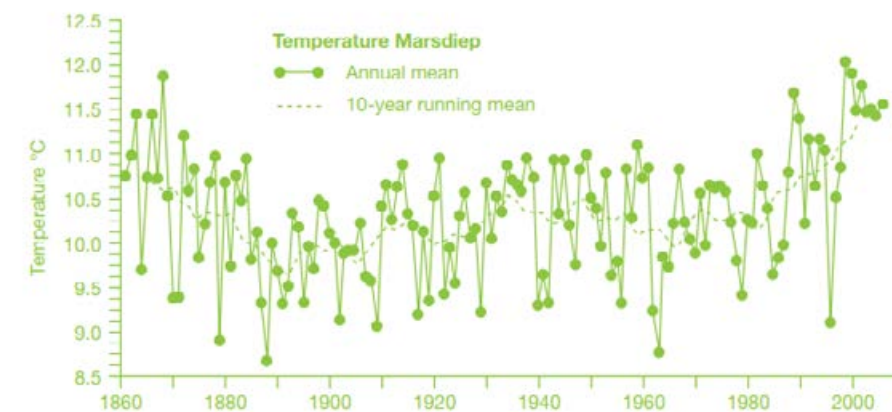
Door de stijgende watertemperatuur krijgen warmte minnende soorten een groter aandeel in de gemeenschap, terwijl de koude minnende soorten afnemen (Van der Veer, 2015). De kinderka-merfunctie is de afgelopen 30 jaar afgenomen, evenals het trofische niveau van met name de pelagische vis.

Vissoorten zoals de zeebaars en de dwergtong, die al in de Waddenzee voorkwamen, gedijen goed bij de warmere temperaturen en zijn toegenomen (Philippart et al., 2017). De hogere temperaturen en het eerder intreden van het voorjaar kunnen zorgen voor verschillen in het tijdstip van voorkomen van soorten die sterk van elkaar afhankelijk zijn. Hierdoor kan 'mismatching' ontstaan, met name tussen predatoren en hun prooi. Doordat er in de zachtere winters meer predatoren van schelpdieren overleven en de sterftkans in de zomer toeneemt

bij hogere watertemperaturen, neemt de aanwas van schelpdieren af. Er zijn met name lagere aantallen mosselen en kokkels geobserveerd na zachte winters. Omdat deze een belangrijke voedselbron vormen voor verschillende vogels – die belangrijke delen van hun leven doorbrengen in het Waddengebied en daarna doortrekken naar andere gebieden – heeft dit zijn weerslag op organismen in én buiten het Waddengebied (Kabat et al., 2009; Philippart et al., 2017). Of een dergelijke mismatch zich uiteindelijk weer herstelt, en hoe lang dat dan duurt, is nog onbekend.

De zachtere winters zorgen er daarnaast voor dat de wadplaten minder snel bevroren. Daardoor zijn verschillende wormen in grotere aantallen aanwezig en is er meer (en langduriger) voedsel beschikbaar voor overwinterende vogels. De temperatuurveranderingen hebben de afgelopen decennia een verschuiving van overwinterende wadvogels naar het noorden veroorzaakt, waardoor er een toename is in vogels in het Waddengebied (Philippart et al., 2017).

Tenslotte kan de stijgende temperatuur de zuurstofconcentratie van het zeewater verlagen. Dit kan invloed hebben op schelpdieren en op vissoorten die belangrijk zijn voor de Waddenzee, zoals de puitaal (Kabat et al., 2009). De afname van aanwas van nonnetje is ook wel gekoppeld aan stijgende watertemperaturen in de westelijke Waddenzee, alhoewel de correlaties niet eenduidig zijn (Beukema, 2017). Deze veranderingen kunnen alle doorwerken op het functioneren en de dynamiek van het voedselweb. De mate waarin en de snelheid waarmee dit zal plaatsvinden zijn echter niet duidelijk.



Figuur 6.2. Temperatuur van het Marsdiep (Kabat et al., 2009).

6.3.2 Zeespiegelstijging

Sinds 1926 – het jaar waarin de metingen aanvingen – is duidelijk dat er sneller sediment in het Waddengebied bezinkt dan dat de zeespiegel stijgt. Als gevolg van de indamming van de Zuiderzee en de Lauwerszee is de sedimentaanvoer toegenomen en zijn de intergetijdenplaten verhoogd (Wang et al., 2018).

Vooraf in de westelijke Waddenzee echter kan er op termijn te weinig zand beschikbaar zijn, om de groei van de intergetijdenplaten in evenwicht te houden met de zeespiegelstijging.

Als de zeespiegel sneller gaat stijgen, neemt de vraag naar sediment in de kombergingsgebieden toe; er ontstaat meer 'accomodatieruimte'. Als (vertraagde) reactie hierop zal de (netto) import van sediment door het zeegat stijgen, waarbij de aanvoer van zand beperkt is ten opzichte van de aanvoer van slib. Er zal zich een nieuw dynamisch evenwicht

6 De Waddenzee en Eems-Dollard

instellen waarbij de bodem meegroeit met de zeespiegel, mits er genoeg sediment door het zeegat kan worden getransporteerd om de sedimentvraag bij te houden (ofwel: als de maximaal mogelijke sedimenttransporten door het zeegat groot genoeg zijn). Zo niet, dan begint een langzaam en langdurig proces van verdrinken, waarbij het gebied relatief steeds lager komt te liggen ten opzichte van de zeespiegel. De mate waarin een gebied kan meegroeien met zeespiegelstijging is afhankelijk van de locatie binnen het kombergingsgebied. Locaties waar veel slib kan sedimenteren, zullen sterker meegroeien.

Naast zeespiegelstijging speelt ook bodemdaling als gevolg van gas en- zoutwinning een rol in met name het oosten van de Waddenzee. Die bodemdaling wordt momenteel volledig gecompenseerd door sedimentatie van zand en slib, wat past bij het dynamisch evenwicht waar dit deel van de Waddenzee zich in bevindt. Bij versnelde zeespiegelstijging (Wang et al., 2018) kan die compensatie onvoldoende worden.

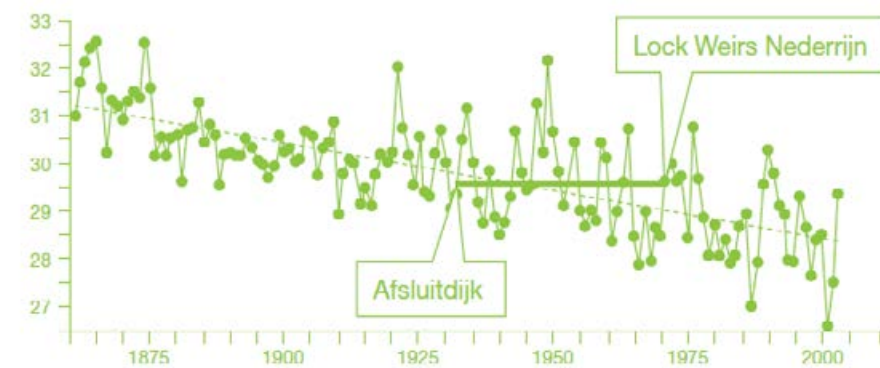
Verlies van intergetijdengebieden en wadplaten zou resulteren in het verdwijnen van habitats voor verschillende vogelsoorten die op de wadplaten uitrusten en naar eten zoeken. Afhankelijk van de snelheid en de mate van het verlies van intergetijdengebieden, kan een ander type ecosysteem ontstaan. Estuariene en lagunaire systemen kunnen

in elkaars verlengde liggen, afhankelijk van een stijgende of dalende zeespiegel en de netto aan- of afvoer van zand vanuit de zee en/of de rivieren. Voor typische schelpdieren die op de wadplaten te vinden zijn geldt dat de meeste soorten ook in ondiepe kustwateren voor kunnen komen. Deze situatie komt bijvoorbeeld voor in de ondiepe kustzone van de voordelta. Kokkels en nonnetjes komen hier wel voor in het ondiepe intergetijdengebied. Belangrijke factoren hierbij zijn de sedimentsamenstelling en vermoedelijk ook de stroming en golfwerking.

Afhankelijk van temperatuur, saliniteit en de aanwezigheid van predatoren (garnalen, grote vis, vogels) kan de kinderkamerfunctie voor juveniele vis wel behouden blijven.

6.3.3 Veranderingen in patronen van neerslag en rivierafvoer

Als gevolg van de afvoer van zoetwater uit het IJsselmeer en het waterstandsbeheer in de Rijn, is het zoutgehalte in het Marsdiep in de periode 1875-2009 afgenomen (figuur 6.3). Dit heeft naar verwachting weinig invloed op de ecologie, vanwege de tolerantie van vele schelpdieren in de Waddenzee voor brak water (Kabat et al., 2009). Als in de toekomst het overschot aan zoetwater niet kan worden opgevangen in het IJsselmeer en als gevolg daarvan een aantal dagen naar het wad gespuid moet worden, wordt een grotere impact van de 'verzoeting' verwacht (Kabat et al., 2009).



Figuur 6.3. Gemiddeld jaarlijks zoutgehalte (saliniteit) in het Marsdiep. Bron: NIOZ; (Kabat et al., 2009).

6.3.4 Veranderende windpatronen

Er zijn geen duidelijke doorgaande trends te vinden in de waargenomen stormen langs de Nederlandse kust en in het Waddengebied. Wind kan vooral in het Waddengebied invloed hebben op de vorming van golven en de wateropzet bij stormvloed (Kabat et al., 2009). Vanwege het ondiepe karakter van de Waddenzee kan de wind wel sterk bijdragen aan de variabiliteit in de zeespiegel (Vermeersen et al., 2018), en daardoor mogelijk indirect bijdragen aan de gevolgen van zeespiegelstijging.

6 De Waddenzee en Eems-Dollard

6.3.5 Instraling

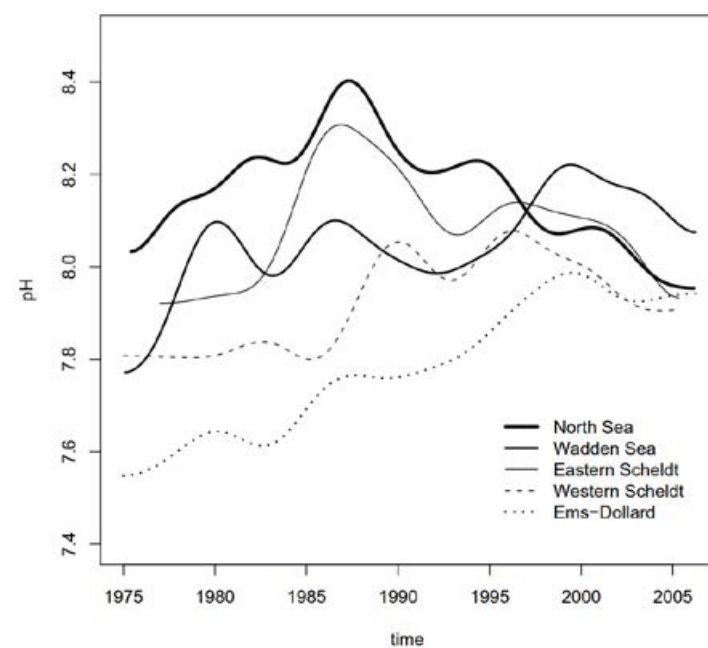
Zoals eerder aangegeven in paragraaf 2.6 is er sinds de jaren '80 sprake van een duidelijke verbetering van de luchtkwaliteit. Daardoor komen er minder dagen met beperkt zicht en mist voor en is de instraling door de zon toegenomen. De toename van de (lucht) temperatuur over deze periode wordt voor een deel aan dit fenomeen toegeschreven. Watertemperatuur volgt de trend van de luchttemperatuur, zeker in de relatief ondiepe Waddenzee.

Indien de luchtkwaliteit verder verbetert, zal dit (indirect) verder bijdragen aan de opwarming van de atmosfeer. In theorie kan de toename van de instraling effect hebben op algengroei: meer licht in het vroege voorjaar zou de groei van algen kunnen vervroegen. Het is echter de verwachting dat de temperatuurstijging en veranderingen in nutriënten vooral effect zullen hebben op algenbloeien. Er zijn geen studies (gevonden) waarin dergelijke relaties voor zonnescijn (instraling) en gangbare algen in de Waddenzee of Noordzee hebben onderzocht.

6.3.6 Verzuring van zeewater

Verzuring van zeewater kan schelpdieren negatief beïnvloeden, omdat deze de kalk – die nodig is voor de vorming van hun schelpen – moeilijker aan het verzuurde water kunnen onttrekken. Dit proces kan ook een rol spelen in de Waddenzee. De schelpsamenstelling van bijvoorbeeld mosselen kan veranderen als gevolg van verzuring van zeewater, wat ze gevoeliger kan maken voor predatie (Fitzer et al., 2015).

De afgelopen 40 jaar heeft de pH sterk gefluctueerd; in de Eems-Dollard is deze zelfs gestegen (Provoost et al., 2010; figuur 6.4). Omdat de zuurgraad/alkaliniteit van het zeewater sterk gekoppeld is aan de dynamiek van organisch materiaal (primaire productie, afbraak), duiden deze fluctuaties vooral op veranderingen in deze dynamiek.



Figuur 6.4. Fluctuatie van pH in de Waddenzee de afgelopen 40 jaar en in de Eems-Dollard (Provoost et al., 2010).



7 De Zuidwestelijke Delta

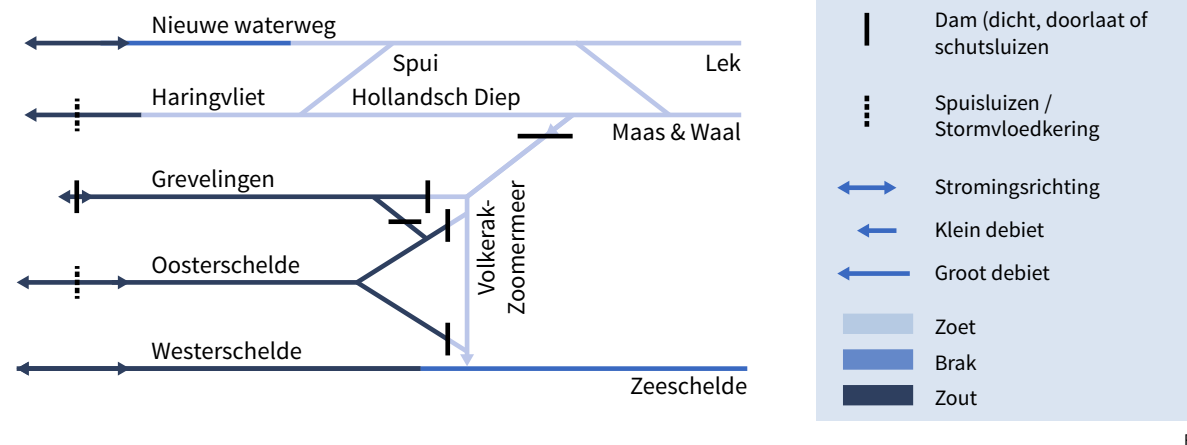
7.1 Specifieke kenmerken van het gebied

De Zuidwestelijke Delta is een divers gebied met verschillende waterbekkens die sterk beïnvloed zijn door de Deltawerken. Het (ecologisch) functioneren van de verschillende waterbekkens wordt bepaald door de specifieke kenmerken: is het bekken zoet of zout, is er getijdebeweging en hoeveel uitwisseling is er met zee en met zoet water vanuit de rivier?

Van de verschillende waterbekkens hebben de Westerschelde en de Nieuwe Waterweg nog het karakter van een volledig open estuarium, met getijdebeweging en bij de Westerschelde – op Vlaams grondgebied – een overgang van zout, naar brak en naar zoet water. Ook de Oosterschelde heeft nog een open verbinding met zee en gedempt getij, maar wordt beschermd door een stormvloedkering die – ongeveer eens per jaar – bij hoogwater dicht gaat. De Grevelingen, het Veerse Meer en het Haringvliet zijn afgesloten van zee met een dam met spuisluizen. Het grotendeels zoete Haringvliet heeft via het spui een verbinding met de nieuwe waterweg. Het Volkerak-Zoommeer ontvangt bij de Volkeraksluizen zoet water uit het Hollandsch Diep en watert af bij de Krammersluizen op de Oosterschelde en via de Rijn-Scheldeverbinding bij de Bathse Spuisluis op de Westerschelde (zie figuur 7.1 en tabel 4).

Variant I: Huidige situatie

Doel: basis, referentie voor andere varianten



Figuur 7.1. Kenmerken van de wateren in de Zuidwestelijke Delta (bron: PBL).

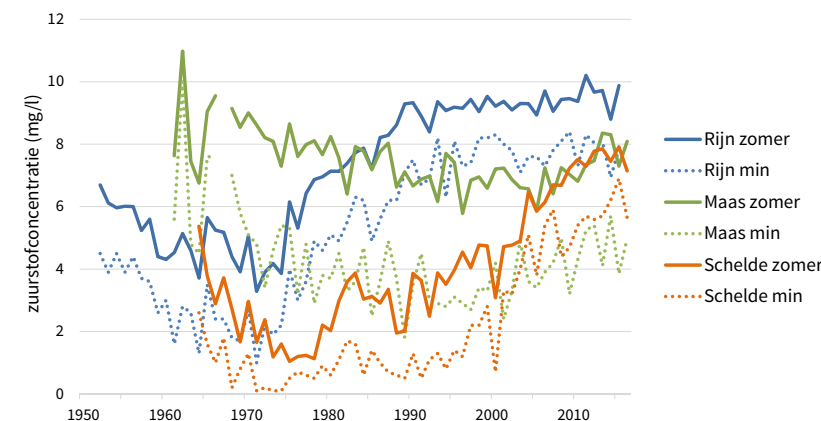
De verschillende kenmerken en autonome ontwikkelingen bepalen de wijze waarop klimaatverandering invloed kan hebben op het systeem van de verschillende bekkens. Verschillende bekkens hebben op dit moment al problemen met waterkwaliteit en ecologie, beperkte vismigratie of zandhonger. Klimaatverandering is daar een extra factor bij. Zeespiegelstijging kan met de bijbehorende opgave voor waterveiligheid grote veranderingen in het gebied bewerkstelligen en zorgen voor het verdrinken van bepaalde habitats.

Voor een aantal wateren in de ZW Delta lopen studie om de effecten van klimaatverandering in beeld te brengen. Voor de Oosterschelde wordt de evaluatie zeespiegelstijging en zandhonger Oosterschelde (EZZO) uitgevoerd en voor de Grevelingen wordt in het kader van getij Grevelingen klimaatverandering meegewogen. Voor het Volkerak-Zoommeer start eind 2019 de verkenning naar klimaatrobustheid van het huidige waterbeheer. Voor de Westerschelde loopt onderzoek en monitoring onder supervisie van de VNVC. Tenslotte is in het kader van de herijking van het Deltaprogramma ZW Delta gekeken naar de houdbaarheid van de voorkeursstrategie. In deze klimaatscan ZW Delta zijn de resultaten deels wel en (grotendeels) nog niet beschikbaar. De effecten beschreven in dit hoofdstuk geven een eerste overzicht dat later – op basis van de uitgevoerde studies – uitgebreid en aangevuld kan en moet worden.

7 De Zuidwestelijke Delta

Tabel 4. Kenmerken van wateren in de Zuidwestelijke Delta.

Naam	Zoet/zout/brak (habitatype)	Getijde/stagnant)	Connectiviteit (zee)	Connectiviteit (rivier)
Nieuwe Waterweg	Brak/zout/zout	Getij-gradient	Open	Ja
Haringvliet	Zoet	Gedempt getij	Dam met spuisluizen (op een kier)	Ja
Volkerak-Zoommeer	Bovenlaag zoet, onderlaag zout	Stagnant	Spuisluizen	Ja (Sluis)
Grevelingen	Zout	Stagnant	Spui Brouwersdam	Nee (wel met Oosterschelde)
Oosterschelde	Zout	Gedempt Getij	Stormvloedkering	Nee
Veerse Meer	Brak-zout	Getij (beperkt)	Met Oosterschelde via doorlaatmiddel Katse Heule	Nee
Westerschelde	Zout/brak	Getij	Open	Ja



Figuur 7.2. Verloop van de gemiddelde en minimum zuurstofconcentraties in de Rijn bij Lobith, de Maas bij Eijsden en de Schelde bij Schaar van Ouden Doel.

7.2 Relevante ontwikkelingen naast klimaatverandering

7.2.1 Veranderingen in waterkwaliteit

Net als in de rivieren zijn er ook in de Zuidwestelijke Delta grote veranderingen opgetreden in waterkwaliteit. De invloeden van de Rijn, de Maas en de Schelde komen hier samen. Op de Grevelingen hebben de rivieren alleen indirect invloed, namelijk via inlaat van water van de Noordzee. Op de Oosterschelde is er daarnaast een kleine instroom van rivierwater via de Krammersluizen. Daardoor zijn de stikstof- en fosfaatconcentraties veel lager dan in het Haringvliet of het Volkerak-Zoommeer.

De waterkwaliteit was in alle drie de rivieren in de jaren '70 en '80 van de vorige eeuw slecht, maar is sindsdien sterk verbeterd. In de Rijn begon het herstel in het midden van de jaren '70, in de andere twee rivieren duurde dat aanzienlijk langer. De Schelde had zelfs tot na de eeuwwisseling te kampen met zeer lage zuurstofconcentraties (figuur 7.2). In het Vlaamse deel van de Schelde (Zeeschelde) trad tussen 2003 en 2008 een duidelijke verbetering op, waarbij de chlorofylconcentraties aanvankelijk toenamen (Vlaams-Nederlandse Scheldecommissie, 2019).

In het Veerse Meer en in de Westerschelde zijn de fosfaatconcentraties de laatste jaren hoger dan in de Rijn. In de Westerschelde komt dit onder andere doordat de Schelde nog steeds twee keer zoveel

fosfaat aanvoert als de Rijn. Door de geïsoleerde ligging van het Veerse Meer was de afname van fosfaatconcentraties in de rivieren daar lange tijd nauwelijks zichtbaar. Pas nadat de slechte waterkwaliteit werd aangepakt door het bevorderen van de uitwisseling van water met de Oosterschelde via doorlaatmiddel de Katse Heule in 2004, nam de fosfaatconcentratie alsnog fors af. Toch is deze nog steeds hoger dan in de Rijn en veel hoger dan in de Oosterschelde (figuur 7.3). Ook in het Volkerak-Zoommeer nam de fosfaatconcentratie lange tijd nauwelijks af. Dit kwam mede door de overgang van een zout systeem met getij naar een min of meer stagnant zoet systeem en door de lokale input van voedingsstoffen vanuit met name de Steenbergse Vliet en de Dintel.

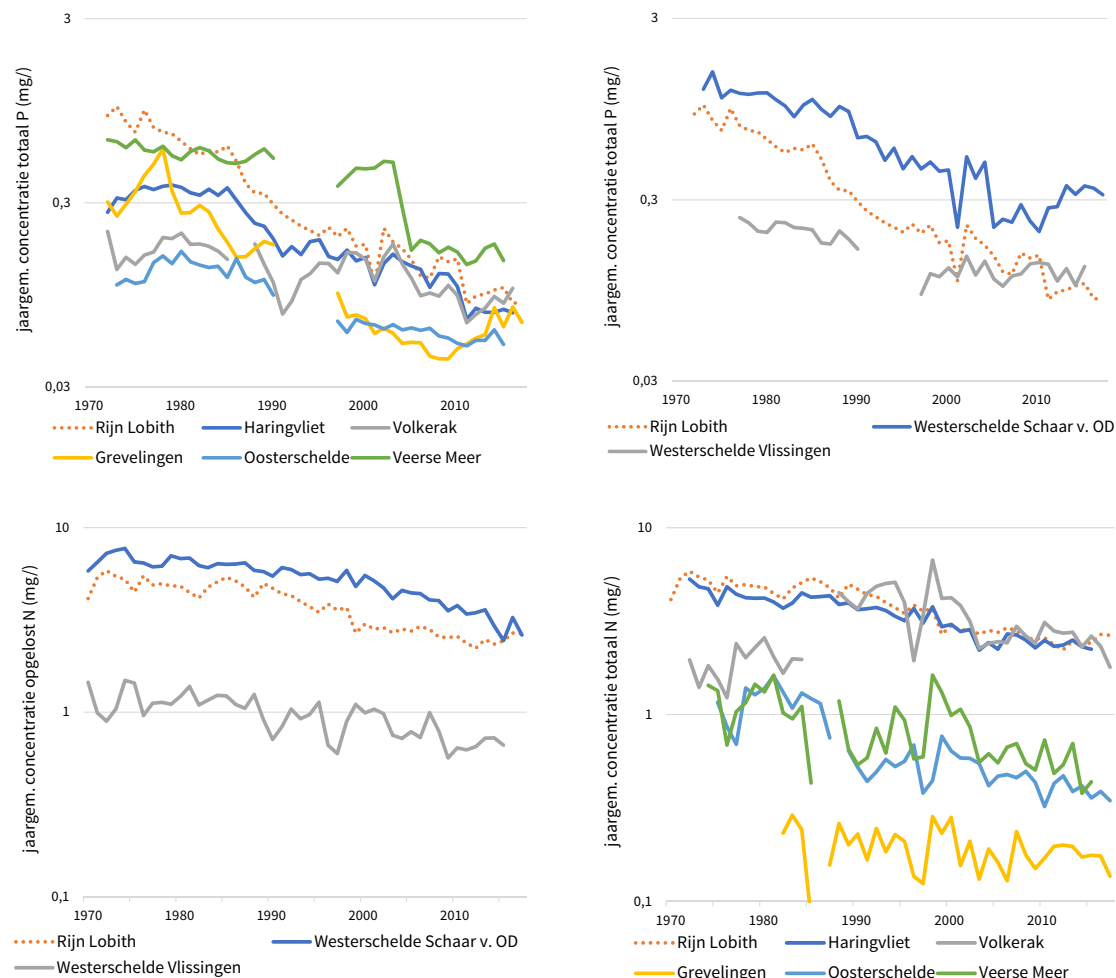
7 De Zuidwestelijke Delta

Inmiddels zijn de fosfaatconcentraties vergelijkbaar met die van het Haringvliet en volgen deze het verloop van fosfaat in de Rijn, met in beide deltawateren een opvallende afname na 2005.

De stikstofconcentraties zijn in de rivieren ook gedaald, maar aanzienlijk minder sterk dan fosfaat. Opvallend is dat de concentratie in het Volkerak na de afsluiting duidelijk toenam. In de zoute wateren zijn de concentraties stikstof in het algemeen lager, met uitzondering van het oostelijke deel van de Westerschelde, waar ze net als de fosfaatconcentraties nog altijd hoger zijn dan in de Rijn.

7.2.2 Veranderingen in inrichting en gebruik

De Deltawerken en recente aanpassingen daarvan hebben grote gevolgen gehad voor de water- en stoffenbalans en de ecologie van de meeste deltawateren. Net als in het IJsselmeergebied heeft de afsluiting van de zeearmen ook in de Zuidwestelijke Delta geleid tot verschillende problemen zoals accumulatie van stoffen en organisch materiaal, afname van diversiteit door andere vormen van peildynamiek, vervlakking van het bodemreliëf (zandhonger) en het verdwijnen van zoutgradiënten. De afgelopen decennia zijn er – als gevolg van de afsluiting – veel verschuivingen geweest in het aantal soorten en de soortensamenstelling. Er zijn veranderingen waargenomen in onder andere het aantal bodemdieren en soorten, vis, fytoplankton, zeegras en (broed)vogels. In wateren zoals de Grevelingen is het beheer van de sluizen een aantal keer gewijzigd en ook dit leidde tot veranderingen en verschuivingen. Hoewel er geen eenduidig beeld is



Figuur 7.3. Gemiddelde fosfaatconcentraties (boven) en gemiddelde concentraties opgelost stikstof (onder) per jaar. Links: verloop van de gemiddelde concentratie totaal fosfaat en stikstof per jaar of per winter in de verschillende deltawateren, vergeleken met het verloop in de Rijn (rode, onderbroken lijn). Rechts: verloop van de gemiddelde concentratie totaal fosfaat en stikstof per winter in de Westerschelde bij Vliissingen, vergeleken met de (grens)locatie Schaar van Ouden Doel en met de Rijn bij Lobith.

te geven, is het duidelijk dat de systemen na de afsluiting nog in ontwikkeling zijn en dat ze gevoelig zijn voor verstoringen. Het verlies aan dynamiek en diversiteit heeft effect op de weerstand van deze waterlichamen tegen verschillende vormen van druk, waaronder klimaatverandering. Een aantal problemen verdient hier nadere toelichting:

Haringvliet

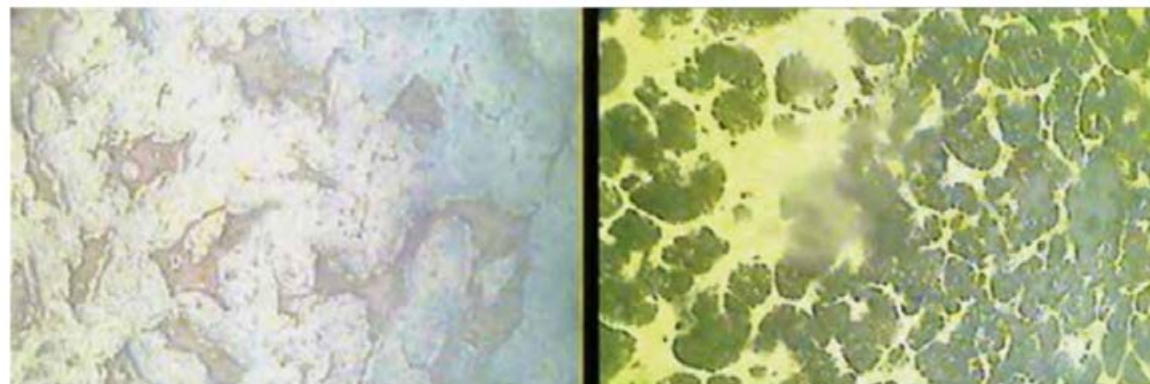
De afsluiting heeft ervoor gezorgd dat de in potentie belangrijkste trekroute van vissoorten zoals zalm, zeeprik, fint, elft en aal naar de paaigebieden min of meer is afgesloten. Ook de leefgebieden van estuariene vissoorten zijn afgesloten geraakt of grotendeels verdwenen, door verlies van het getij en van de zoutgradiënt. Het

recente openen van 'de Kier' (januari 2019) is bedoeld om de mogelijkheden voor vistrek te verbeteren. Vooralsnog worden de sluisen gesloten als de afvoer van de rivieren zo laag is dat zout water te ver stroomopwaarts schuift. Het operationaliseren van het 'kierbeheer' van de haringvlietsluizen zal geleidelijk en via een proces van 'lerend implementeren' worden uitgevoerd en zo nodig worden aangepast. Dit betekent dat het kierbesluit stapsgewijs wordt uitgevoerd en wordt gebaseerd op de ervaringen uit monitoring.

Volkerak-Zoommeer

Het Volkerak is pas in 1987 afgesloten en is dus een van de jongste systemen in de delta. Bij afsluiting was het water zout, met doorspoelen is het zoet gemaakt. Om dit – in dienst van de zoetwatervoorziening van de omliggende landbouwgebieden – zo te houden moet het water continu worden gespoeld met zoet water uit de rivieren.

De fosfaatgehalten zijn pas vrij recent aan het afnemen. Mede door lokale aanvoer zijn de concentraties weinig lager dan in de Rijn, ondanks een verblijftijd van enkele maanden. Hoewel de komst van de quaggamossel rond 2008 enige verlichting leek te brengen, veroorzaakt de bloei van blauwalgen nog steeds overlast. Ondanks de min of meer constante concentratie chlorofyl, nam het aantal algen per liter uiteindelijk weer toe (Weeber et al., 2018). Daarom zijn verkenningen uitgevoerd naar de effecten van de terugkeer van een zoutgradiënt in het Volkerak (Tiessen & Nolte, 2018), uitgewerkt tot



Figuur 7.4. Verschillende verschijningsvormen van witte bacteriematten. Links: witte bacteriemat in combinatie met rottend organisch materiaal (diepte 3m). Rechts: witte bacteriemat (diepte 6m). Bron: (Rijkswaterstaat, 2014).

voorkeursalternatief in de Ontwerp Rijksstructuurvisie, die in 2014 is vastgesteld.

Grevelingen

Na de afsluiting van de Grevelingen ontstond er geleidelijk een specifiek probleem. Het meer raakte – door het gebrek aan dynamiek en menging - vaak gestratificeerd, wat als het lang aanhoudt zorgt voor zuurstofloosheid in de diepere delen van het meer. Op deze plekken groeien witte bacteriematten van zwavelbacteriën die het bodemleven verstoren (Lammers, 2014; Nolte, 2016; figuur 7.4). Het areaal met zuurstofarme condities (<3 mg/l) varieerde de afgelopen 20 jaar van 800 tot 1600 ha. Een grotere dynamiek in het systeem zou de situatie kunnen verbeteren. In november 2019 wordt een besluit genomen over de planuitwerking voor het terugbrengen van een beperkte getijslag

van maximaal 50 cm (huidige voorkeursvariant 40 cm) rond een verlaagd middenpeil van nap -30 cm. Bij dit scenario is de verwachting dat het gebied met langdurig lage zuurstofconcentraties met ongeveer 650 ha wordt verkleind.

Oosterschelde

De aanleg van de stormvloedkering in 1986 zorgde voor verhoging van de veiligheid, terwijl de getijslag in de Oosterschelde behouden bleef. Wel is hierdoor de oorspronkelijke dynamiek van eb en vloed, zoet en zout en uitwisseling van voedingsstoffen sterk verminderd of zelfs verdwenen. Een van de gevolgen van de afgenomen dynamiek is dat het intergetijdengebied kleiner wordt en korter droogvalt. Het areaal platen en slikken loopt met ongeveer 50 ha per jaar terug en dreigt op termijn te verdwijnen. Daarmee bedreigt de erosie de Natura

7 De Zuidwestelijke Delta

2000-instandhoudingsdoelen van dit habitat. Met name de steltlopers die de platen en slikken als foerageergebied gebruiken hebben last van de afgenomen droogvalduur. De primaire productie neemt de afgelopen decennia sterk af (Kamermaans et al., 2014). De effecten van zeespiegelstijging kunnen hier niet los worden gezien van deze processen.

Veerse meer

Het Veerse Meer had lange tijd te maken met grote schommelingen in zoutgehalte, hoge fosfaatgehalten en sterke bloei van algen, waaronder zeesla. Dit wordt sinds juni 2004 aangepakt door water uit te wisselen met de Oosterschelde via de Katse Heule, een doorlaatmiddel in de Zandkreekdam. Hierdoor is het zoutgehalte hoger geworden en zijn de schommelingen afgenomen. Daarnaast is het fosfaatgehalte fors gedaald en is het zuurstofgehalte in de diepere delen toegenomen.

Westerschelde

Dijken beschermen de gebieden rondom de Westerschelde tegen overstromingen. Het is een dynamisch systeem, met getijslag van 3,5 m in de monding tot wel 5 m verder stroomopwaarts. Dit komt doordat de Westerschelde als een soort trechter fungeert, waardoor de waterstand door de vloed wordt opgestuwd.

De Westerschelde heeft een meergeulenstelsel, wat betekent dat de vloed- en ebstroom verschillende voorkeursroutes hebben. Daardoor

is een patroon van meerdere om elkaar heen slingerende geulen ontstaan, met ondiepe zandplaten daar tussenin. In het westen liggen momenteel drie geulen. De geulen zijn door verdieping en zandwinning dieper en breder geworden. De Westerschelde als geheel is smaller en rechter geworden door inpolderingen, bedijking en bochtafsnijdingen. Daardoor rolt de getijgolf sneller naar binnen, is de getijslag toegenomen en reikt het hoogwater hoger. Tot nu toe groeien de platen mee, maar de wanden worden steiler en de geulen verstarren en verplaatsen zich minder, waardoor het systeem zich minder verjongt. In samenhang met deze veranderingen is het water troebeler geworden (Vlaams-Nederlandse Scheldecommissie, 2019).

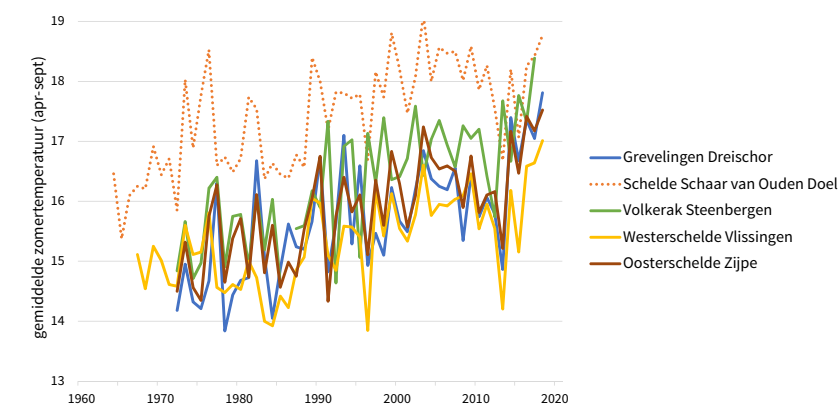
7.3 Effecten van klimaatverandering in de Zuidwestelijke Delta

7.3.1 Inleiding

Behalve de – algemeen optredende – toename van de watertemperatuur en veranderingen in instraling en windpatronen heeft de Zuidwestelijke Delta te maken met een combinatie van veranderingen in rivierafvoer en zeespiegelstijging. De verhouding tussen deze twee processen verschilt per waterlichaam, afhankelijk van de rivierinvloed. De invloed van de rivier is groot in de nieuwe waterweg, het Haringvliet en de Westerschelde, iets minder groot in het Volkerak-Zoommeer en klein tot afwezig in de Grevelingen, de Oosterschelde en het Veerse Meer.

7.3.2 Toenemende temperatuur

De opwarming van het water heeft in de deltawateren vergelijkbare effecten op de ecologie als in het IJsselmeergebied (zie paragraaf 4.3.2). Zo kan ook hier de temperatuurstijging zorgen voor onder meer een andere soortensamenstelling, meer algenbloei en sterfte incidenten. Bovendien kan er door een verschuiving van het groeiseizoen een mismatch in prooi-predator relaties ontstaan. De temperatuurtrend in verschillende deltawateren is te zien in figuur 7.5. De opwarming verdient bijzondere aandacht in de Grevelingen en in het Volkerak-Zoommeer. In de Grevelingen bestaat het risico dat de nu reeds sterke stratificatie van het meer verder toeneemt. Ook kan, mede daardoor, de zuurstofloosheid verergeren, omdat de oplosbaarheid van zuurstof in het water afneemt. In het Volkerak-Zoommeer is vooral de toename van de kans op algenbloei relevant.



Figuur 7.5. Langjarig verloop van de gemiddelde watertemperatuur in enkele deltawateren. Gegevens RWS.

7 De Zuidwestelijke Delta

7.3.3 Zeespiegelstijging

Zeespiegelstijging beperkt de mogelijkheden voor spuien onder vrij verval. Daardoor zullen er verschuivingen optreden in de overgangszones tussen zout en zoet. Daarnaast neemt de druk van brakke kwel toe. In enkele van de watersystemen leidt de zeespiegelstijging tot specifieke problemen:

Haringvliet

Door zeespiegelstijging kan de verblijftijd van het zoete water in het Haringvliet toenemen en de druk van brak kwelwater in de omgeving groter worden. Hoe dit zich zal verhouden tot de veranderingen in rivierafvoer en het spuibeheer is moeilijk te voorspellen.

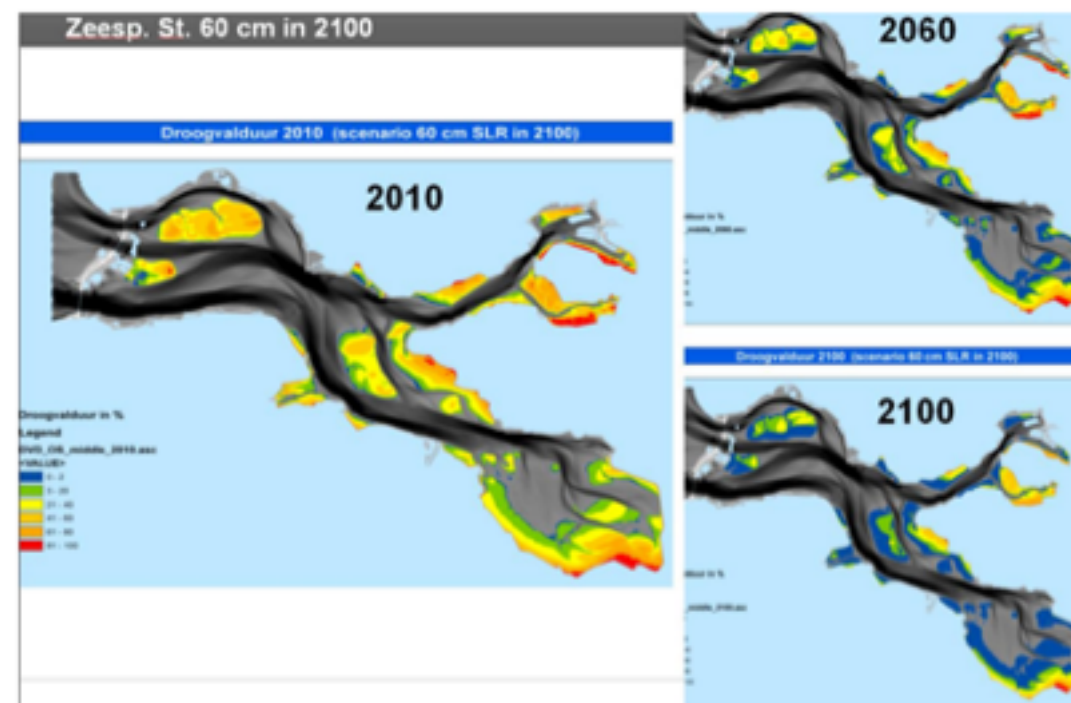
Grevelingen

Bij het ontwerp van het extra doorlaatmiddel in de Brouwersdam wordt rekening gehouden met de zeespiegelstijging. Het gekozen scenario van 40 cm getijslag rond een middenpeil van nap-30 cm biedt hiervoor verschillende mogelijkheden. Bij te grote stijging van de zeespiegel is natuurlijk verval bij eb steeds minder goed mogelijk, de maximaal te halen getijslag wordt dan kleiner. In de verkenningsfase is als uitgangspunt gesteld dat een getijslag van 40 cm nog kan worden gerealiseerd bij zeespiegelstijging van 40 cm ten opzichte van 1995. Via technische ingrepen en peilbeheer kan de getij slag van 40 cm worden vastgehouden.

Oosterschelde

Naast de zandhonger die optreedt als gevolg van het verminderde getij door de bouw van de stormvloedkering, leidt ook de zeespiegelstijging tot extra verlies van de platen en slikken en verkorting van de droogvalduur (figuur 7.6). Bij 60 cm zeespiegelstijging blijft er nog

ongeveer 40% van het areaal aan platen en slikken over (4000-6000 ha) (Ronde et al., 2013). Een ander effect is dat de stormvloedkering vaker gesloten zal moeten worden, waardoor de platen en slikken tijdelijk niet droogvallen en dan niet beschikbaar zijn voor foeragerende vogels, mogelijk ook voor langere perioden.



Figuur 7.6. Veranderingen in droogvalduur van 2010 tot 2060 en 2100 voor een scenario met zeespiegelstijging van 60 cm over de periode 1990-2100 (Ronde et al., 2013).

7 De Zuidwestelijke Delta

Westerschelde

In de Westerschelde zal zeespiegelstijging vooral zorgen voor verdieping van de geulen en voor verdere verhoging van hoog water. In het oosten van de Westerschelde is de getijslag door opstuwing groot. De stijging van de zeespiegel kan op termijn problemen veroorzaken in Antwerpen.

7.3.4 Veranderende patronen in neerslag, rivierafvoer en verdamping

Wijzigingen in de patronen van neerslag en verdamping zullen via de afvoer van de rivieren vooral invloed hebben op de deltawateren die door de rivieren worden gevoed, dus de nieuwe waterweg, het Haringvliet, het Volkerak-Zoommeer en de Westerschelde. In de Grevelingen en de Oosterschelde spelen variaties in rivierafvoer niet of nauwelijks een rol. De betekenis van veranderingen in neerslag en verdamping is hier eveneens beperkt, waarbij eventuele effecten op buitendijks habitat boven water (schorren) wellicht nog nadere analyse vergt.

Haringvliet

Het huidige beheer van de haringvlietssluisen is gericht op het toelaten van zout water (via de kier), tenzij de kans op zoutindringing te groot wordt door lage rivierafvoer. Het Haringvliet wordt dan uit voorzorg 'zoetgespoeld'. Klimaatverandering kan invloed hebben op de kans dat een dergelijk lage rivierafvoer zich voordoet, vooral als de zomers droger worden en droge periodes met lage rivierafvoeren vaker en

langer voorkomen. Dat kan de ontwikkeling van brakke overgangshabitats en brakke gemeenschappen in het westen van het Haringvliet bemoeilijken. Aan de andere kant kan, als zout water bij hogere debieten wel kan worden ingelaten, de zoete levensgemeenschap benadeeld worden. Bij onregelmatige (niet seizoensgebonden) afwisseling tussen deze twee toestanden kan zich dus geen van beide gemeenschappen goed ontwikkelen. Door dit 'zoetspoelen' wordt het natuurlijke seizoenspatroon – met hogere zoutgehalten in de rivier bij lage zomerafvoer – als het ware omgedraaid.

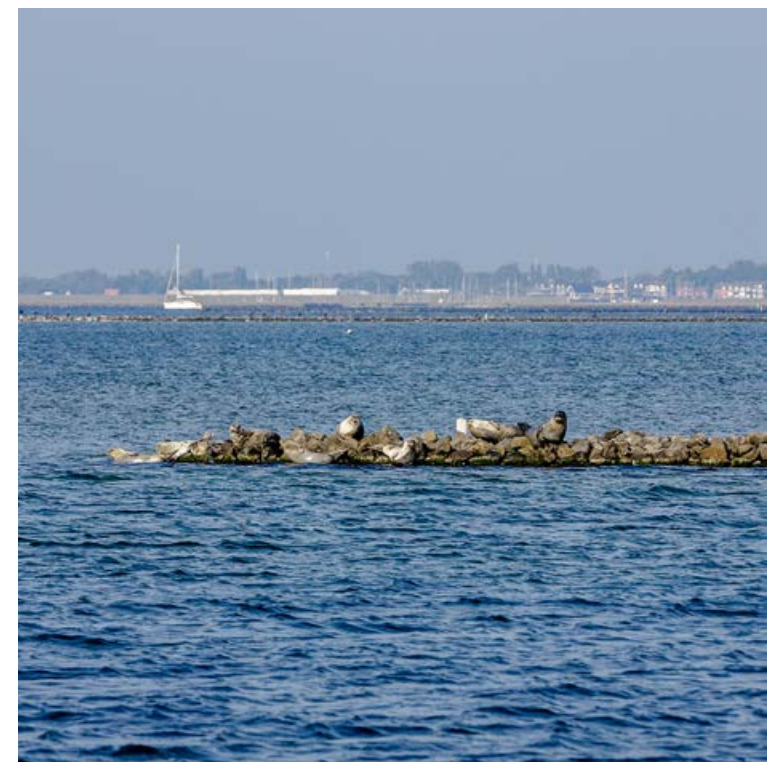
Volkerak Zoommeer

In de huidige situatie is het Volkerak Zoommeer een zoetwatervoorziening met een relatief beperkte opslagcapaciteit in de bovenlaag van het meer. De zoetwatervoorziening is van matige kwaliteit voor de landbouw, omdat het chloridegehalte maar een beperkt aantal teelten toelaat. Bij de samenloop van droge, hete zomers met lage rivierafvoeren is er onvoldoende water beschikbaar voor het doorspoelen van het Volkerak Zoommeer. Dan treden waterkwaliteitsproblemen op in de vorm van hoge chloridegehalten, blauwalgenbloei en stankoverlast, in het uiterste geval gepaard gaand met vis- en vogelsterfte. Het water is in die periodes niet geschikt voor de landbouw en peilbeheer.

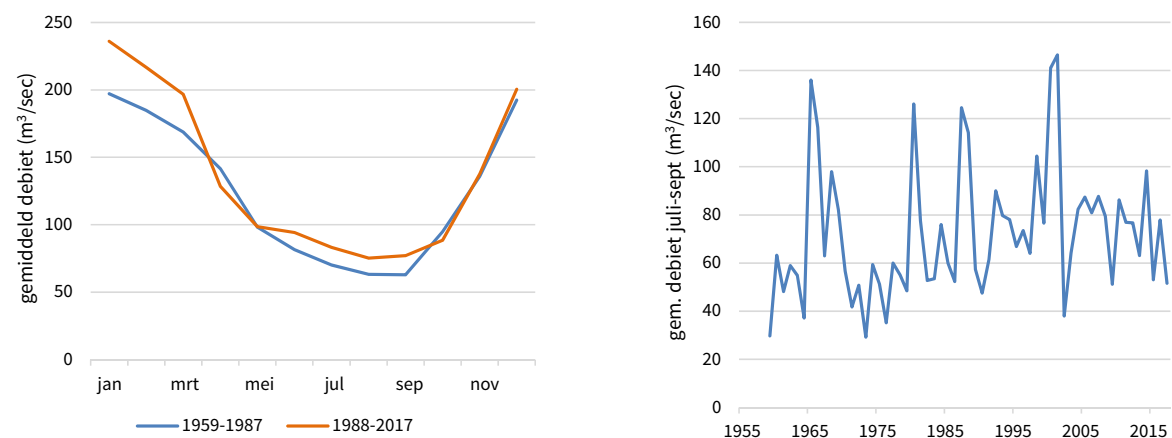
Westerschelde

Veranderingen in de afvoerpatronen van de Schelde kunnen een rol spelen op de vertroebeling van het systeem. Bij lage afvoer in de

zomer wordt die vertroebeling versterkt (Vlaams-Nederlandse Scheldec commissie, 2019). Tot nu toe is er echter – anders dan bij de Rijn en de Maas – nog geen sprake van een trendmatige afname van de zomerdebieten van de Schelde. Bij Schaar van Ouden Doel lijkt eerder sprake te zijn geweest van een toename in de nazomer, die vooral heeft plaatsgevonden in de jaren 1970 en 1980 (figuur 7.7)



7 De Zuidwestelijke Delta



Figuur 7.7. Gemiddelde debieten van de Schelde.
 Links: gemiddeld seizoenspatroon in de afvoer van de Schelde bij Schaar van Ouden Doel in twee opeenvolgende perioden. Rechts: Verloop van de gemiddelde afvoer in juli-september. Gegevens RWS.

7.3.5 Veranderende windpatronen

Veranderingen in windpatronen zijn voornamelijk vooral periodiek. Het belangrijkste effect voor de deltawateren is waarschijnlijk de verhoogde frequentie van zuidwestenwind geweest die over een reeks van jaren vanaf 1988 in de wintermaanden optrad. Dit zorgde voor extra verhoogde wintertemperaturen en voor opstuwing van het kustwater, waardoor de zeespiegelstijging voor de wintermaanden werd versterkt. Effecten via turbulentie en (verminderde) ijsbedekking zijn minder sterk dan in het IJsselmeergebied, als gevolg van de grotere diepte en zout water. Hogere windsnelheden kunnen via turbulentie in principe stratificatie voorkómen (Grevelingen), maar de belangrijkste veranderingen zijn opgetreden in de wintermaanden, wanneer geen sprake is van stratificatie. De klimaatscenario's omvatten bovendien geen structurele veranderingen in windpatronen.

7.3.6 Instraling

De invloed van instraling bestaat ook in de deltawateren uit een langer en vroeger invallend groeiseizoen, vervroeging van de cycli van soorten die primair door daglengte worden gestuurd en een toename van temperatuurverschillen tussen dag en nacht (met mogelijke gevolgen voor de fauna, zoals mismatches tussen beschikbaarheid van prooien en het pieken van predatoren). De toename van instraling is echter eindig. Zie voor meer informatie paragraaf 2.6 en 4.3.6.

7.3.7 Verzuring

De gevolgen van verzuring door toename van opgelost CO₂ zijn nog onduidelijk, vooral zolang de effecten worden gemaskeerd door veranderingen in andere aspecten van waterkwaliteit, met name voedselrijkdom.



8 Werken aan robuustheid

Een robuust ecosysteem is in de PAGW gedefinieerd als een ecosysteem dat het vermogen heeft in de gewenste toestand te blijven ondanks dat onderdelen van het systeem veranderen of de omgeving verandert, bijvoorbeeld door klimaatverandering. Een robuust systeem is bestand tegen kortdurende verstoringen zoals een extreem warme zomer, maar kan ook langdurige druk aan.

Met een klimaatrobuust ecosysteem wordt een systeem bedoeld dat specifiek bestand is tegen klimaatveranderingen.

Dit hoofdstuk bevat opties voor het vergroten van de weerstand en de klimaatrobuustheid in de verschillende watersystemen.

8.1 Versterking van de klimaat-robuustheid

De bovenstaande beschrijving van robuustheid is gebaseerd op de reacties op veranderingen van drukfactoren zoals klimaatverandering. Robuustheid gaat over het omgaan met onzekerheid; natuurlijke variabiliteit is onzeker en er blijft onzekerheid over de toekomst. Daarom gaat het om inzicht in de gevoeligheid ofwel kwetsbaarheid van een ecosysteem. Hoe gevoelig is een systeem voor toekomstige

veranderingen om vervolgens deze gevoeligheid of kwetsbaarheid te reduceren? (Veraart et al., 2018)

Het begrip robuustheid is sterk gerelateerd aan het begrip veerkracht ofwel 'resilience'. Welke eigenschappen van belang zijn voor een veerkrachtig watersysteem kunnen we onder meer ontlenen aan de zeven principes van veerkracht volgens het Stockholm Resilience Centre (SRC). De eerste drie principes hebben betrekking op inrichting en waterbeheer en zijn voor PAGW het meest relevant. Het gaat daarbij om (vrij vertaald): (bio)diversiteit, connectiviteit en waterkwaliteit.

Diversiteit



Als een systeem uit vele ecologische componenten (soorten of soortgroepen) bestaat, heeft het bij verandering meer mogelijkheden om te reageren. Daarbij geldt de aanname dat elke soort(groep) zijn eigen response eigenschappen heeft. Als er sprake is van 'overtolligheid' (redundancy)

kunnen meerdere componenten dezelfde functies in het systeem vervullen. Maar omdat deze verschillend reageren op veranderingen, kan het systeem veranderingen beter opvangen en blijven functioneren. Naast soort(groepen) rekenen we ook habitatdiversiteit hiertoe.

Als habitats of gradiënten ondervertegenwoordigd zijn of als slechts enkele soorten of voedselketens dominant zijn in het voedselweb, kan dat leiden tot een lage biodiversiteit (lager dan die bij het systeem hoort) en tot een systeem dat kwetsbaar is voor verandering. In veel van de grote wateren zijn door de inrichting karakteristieke habitats verloren gegaan. Bij de aanleg van dijken gingen bijvoorbeeld veel natuurlijke overgangen tussen land en water verloren en de aanleg van dammen ging ten koste van natuurlijke zoet-zoutgradiënten. Het terugbrengen van ontbrekende habitats bevordert de habitatdiversiteit en de biodiversiteit.

Connectiviteit



Connectiviteit betekent dat aan elkaar gerelateerde habitats met elkaar verbonden zijn, zodat flora en fauna tussen verschillende (patches van) habitats kunnen bewegen. Denk bijvoorbeeld aan verbindingen tussen leef-, paai-, foerageer- en rustgebieden voor diverse vis- en vogelsoorten. Lateraal

transport van noodzakelijke bouwstenen zoals koolstof en stikstof van het achterland naar het open water is door dijken onmogelijk gemaakt. Een natuurlijke verbinding levert wel dit laterale transport.

In de Nederlandse grote wateren is de connectiviteit in het algemeen laag, met name door afsluiting van binnenwateren van de zoute en brakke wateren door dijken en dammen.

8 Werken aan robuustheid

Waterkwaliteit



Het Stockholm Resilience Centre duidt waterkwaliteit aan als één van de ‘trage variabelen en terugkoppelingen’. Trage variabelen kunnen het systeem met behulp van terugkoppelingsmechanismen in verschillende, relatief stabiele toestanden brengen. Hoge concentraties voedings-

stoffen leiden tot dominantie van algen en verlies van andere soorten. Hogere temperaturen leiden tot lagere zuurstofconcentraties, stratificatie in de waterkolom en gebrek aan zuurstof in het diepe water.

Het is van belang om ook andere potentieel schadelijke terugkoppelingsmechanismen te identificeren. Denk hierbij aan de effecten van nieuwe stoffen in het water (‘compounds of emerging concern’) zoals restanten van (dier)geneesmiddelen, bestrijdingsmiddelen of industriële stoffen. Op dit moment is daar nog onvoldoende over bekend, zeker in relatie tot klimaatverandering. Binnen de kennisimpuls waterkwaliteit wordt gewerkt aan het vergroten van kennis over deze stoffen en hun impact op de ecologie (<https://www.stowa.nl/kennisimpuls>).

Dynamiek



Het Stockholm Resilience Centre noemt dynamiek niet als afzonderlijk principe. Toch is dynamiek een belangrijk mechanisme voor het behoud of het realiseren van habitatdiversiteit en connectiviteit. Voor meren bestaat dynamiek bijvoorbeeld uit variatie in

waterpeil (van seizoen tot seizoen en van jaar tot jaar) en de invloed van wind. Voor een estuarium zijn getijslag en sedimentverplaatsing belangrijke bepalende factoren voor de dynamiek en voor rivieren zijn dat afvoerverschillen met wisselende waterstanden en stroomsnelheden en morfodynamiek. Het verlies aan natuurlijke dynamiek wordt in diverse beleidsdocumenten, zoals de natuurambitie grote wateren 2050, als belangrijke ontbrekende factor genoemd.

In Nederland is de natuurlijke dynamiek van het waterpeil zodanig gereguleerd dat de diversiteit en connectiviteit van de wateren ernstig worden beperkt. Hoewel er binnen de randvoorwaarden van onder andere veiligheid maar heel beperkt ruimte is voor verbetering, is het van belang om de consequenties van het actuele peilbeheer voor robuustheid in beeld te brengen.

Ter nuancering moet wel gezegd worden dat het gaat om natuurlijke dynamiek, variaties van waterpeil veroorzaakt door natuurlijke factoren. Onze rivieren zijn vandaag de dag erg dynamisch; uiterwaarden staan of

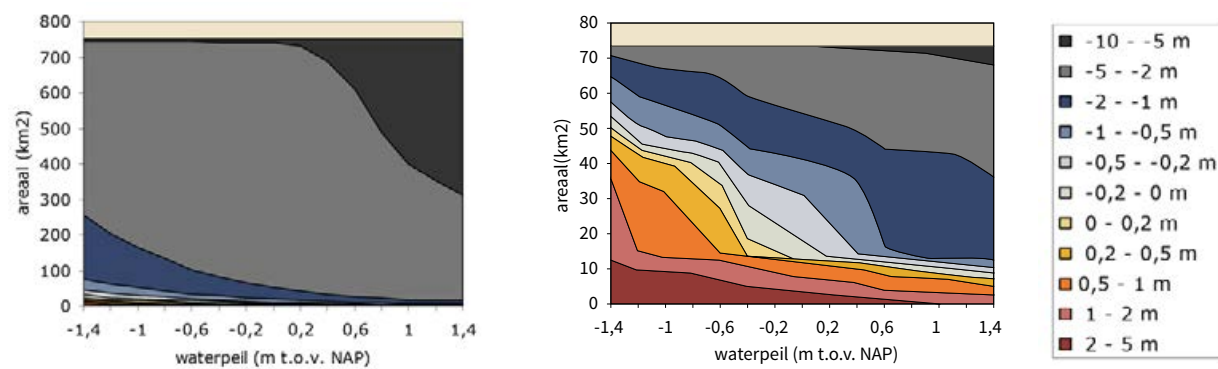
droog of ineens vele meters onder water. Deze dynamiek wordt vooral gestuurd door ingrepen in het systeem ten behoeve van andere functies en komt het ecologisch functioneren niet ten goede.

8.2 Werken aan robuustheid in het IJsselmeergebied

In hoofdstuk 2 zijn zes drukfactoren genoemd. Hiervan kunnen alleen de veranderingen in rivieraanvoer en neerslag enigszins worden gemitigeerd met behulp van waterbeheer. Doorspoelen kan bijvoorbeeld een zinvolle maatregel zijn in systemen waar nadelige effecten kunnen optreden door een langere verblijftijd van het water. Het is nog onduidelijk in hoeverre een dergelijke aanpak ook iets oplevert voor het beperken van de kans op aanhoudende stratificatie in het IJsselmeer en Markermeer.

Voor het opvangen van de gevolgen van klimaatverandering is het vooral van belang om de veerkracht van het systeem te vergroten volgens de principes in paragraaf 8.1. Dat betekent dat de tekortkomingen in de diversiteit aan habitats en soorten en hun connectiviteit (in relatie tot dynamiek) in kaart moeten worden gebracht en zo veel mogelijk verholpen moeten worden. Dat is niet nieuw, want in diverse studies en visies zijn deze aspecten al geïnventariseerd. Met als gemeenschappelijke uitkomst: diverse habitats en gradiënten (land-water, zout-zoet, stromingsdynamiek) zijn ondervertegenwoordigd.

8 Werken aan robuustheid



Figuur 8.1. Diepteverdeling in het Markermeer en de Veluwevelden in relatie tot de waterstand. De oude ondieptes voor de Veluwevelden zijn nu sterk vertegenwoordigd in de randmeren, maar zijn afgesneden van het Markermeer (Noordhuis 2010).

8.2.1 Diversiteit

Door de compartimentering zijn ondieptes sterk ondervertegenwoordigd in het IJsselmeer en het Markermeer; in de randmeren komen deze wel voor (figuur 8.1). Flauwe taluds zijn er alleen langs de Friese kust, in de randmeren en langs de zuidoever van het IJmeer, maar door het gefixeerde peil zijn functionele land-water overgangen met waterriet of biezten inmiddels schaars. Buitendijks land is eveneens zeldzaam en overstroomt nauwelijks; functionele overstromingsgraslanden ontbreken.

Een ander gevolg van de compartimentering is dat de dynamiek van de aanvoerende rivieren versterkt invloed heeft op het Zwarte Meer, het Ketelmeer en het Eemmeer, met nog enige invloed in het zuidelijke IJsselmeer en het IJmeer. Elders is deze dynamiek nauwelijks meer merkbaar.

De oude kleibodems van de luwe zuidelijke kom van de Zuiderzee zijn oververtegenwoordigd in het Markermeer en het daaruit

geproduceerde slib wordt niet meer afgevoerd.

Het bodemreliëf is – vooral in het IJsselmeer – vervlakt door erosie van de ondiepere bodems en door sedimentatie in de diepere delen.

8.2.2 Connectiviteit

De compartimentering van het IJsselmeergebied beperkt de connectiviteit. De gradiënten tussen land en water, rivier en meer en zout en zoet zijn grotendeels verdwenen. De trek van vis en estuariene ongewervelden is maar zeer beperkt mogelijk. Hoger gelegen delen van het gebied zijn door fixatie van het peil verdroogd of verdwenen, of al eeuwenlang door dijken van de meren gescheiden.

De habitats zijn vaak onevenwichtig verdeeld in de ruimte. Dit is een gevolg van de afwisseling van historische dijken langs het oude land en de dijken die in de 20^e eeuw zijn aangelegd, met aangrenzend diep water. Grote delen van met name het Ketelmeer, IJsselmeer en Markermeer zijn daardoor zeer uniform en arm aan habitats en soorten.

8.2.3 Dynamiek

De compartimentering en de fixatie van het waterpeil hebben de dynamiek in het IJsselmeergebied sterk aan banden gelegd. Na de verbetering van de waterkwaliteit is dit waarschijnlijk de grootste uitdaging voor het versterken van de veerkracht van de meren. In het nieuwe peilbesluit is iets meer ruimte voor peilopzet in het voorjaar en uitzakkend peil in de zomer, en het gebruik van marges rond het streefpeil laat iets meer ruimte voor verschillen tussen jaren. Met name in de winter bestaat nog enige variatie door op- en afwaaiing en doordat spuien onder vrij verval niet altijd mogelijk is. De aanleg van pompen zal dit type dynamiek waarschijnlijk verder beteugelen.

In theorie kan een ecologisch gunstig peilbeheer dan ook beter worden opgelegd, maar de grote fluctuaties die daarvoor nodig zijn kunnen waarschijnlijk niet worden gerealiseerd binnen de randvoorwaarden van veiligheid en menselijk watergebruik.

Mogelijk kunnen er ook binnendijks habitats worden gerealiseerd, die afhankelijk zijn van peildynamiek, bijvoorbeeld in polders met een eigen peilregime. De connectiviteit tussen deze polders en de meren is dan wel een uitdaging. In de Koopmanspolder bij Andijk zijn inmiddels goede resultaten behaald voor vis met behulp van een eigen peilbeheer en uitwisseling met het IJsselmeer. Overwinteringshabitats voor vis lijken echter vooral in aansluitende gebieden buitendijks te moeten worden gezocht (Witteveen + Bos).

8 Werken aan robuustheid

Naast fluctuatie van het waterpeil kan ook de stroming van het water voor dynamiek en ruimtelijke diversiteit zorgen. Als het water lokaal minder dan een maand verblijft, beperkt dit de algengroei, ook bij een relatief hoge aanvoer van voedingsstoffen. Dit draagt bij aan een diverse flora en fauna met een sterkere rol van filteraars en waterplanten. In een aantal meren en deelgebieden kan de diversiteit op deze manier worden vergroot: Zwarte Meer, Drontermeer/Vossemeer, Eemmeer/Gooimeer, IJmeer en zuidelijk IJsselmeer. Een kortere verblijftijd van het water en een lager zomerpeil kunnen ook de kans op stratificatie en sterfte incidenten bij hittegolven beperken.

8.2.4 Waterkwaliteit

De waterkwaliteit in het IJsselmeergebied is inmiddels relatief goed.

Opties voor het vergroten van de weerstand en de klimaatrobuustheid van het IJsselmeergebied:

Het creëren van ondieptes en dieptegradiënten voor meer ruimtelijke diversiteit;

Versterken van de ruimtelijke spreiding en samenhang in habitatontwikkeling;

Het toelaten van meer peildynamiek bijvoorbeeld door compartimentering, met verschillen tussen jaren, voor functionele overgangen tussen land en water;

Het koppelen van de meren aan het achterland, om overstromingsgraslanden te creëren;

De aanvoer van fosfaat is min of meer terug op een natuurlijk niveau. Hoewel de concentratie stikstof vaak nog te hoog is, vormt de waterkwaliteit geen belemmering voor een gezond functionerend ecologisch systeem. Problemen zoals lokale algenbloei of een hoge sliblast moeten verder worden aangepakt via inrichting en dynamiek. In samenhang daarmee geldt dat ook voor het voedselweb en de productieketen. Door de kunstmatige inrichting en het gebrek aan habitatdiversiteit en dynamiek dragen de beschikbare voedingsstoffen niet altijd bij aan de gewenste natuurwaarden. Zo worden bijvoorbeeld in de Grevelingen veel voedingsstoffen gebruikt door zwavelbacteriën die geen directe koppeling hebben met de hogere niveaus in het voedselweb, of is in het Markermeer een deel van de algen niet direct als voedsel beschikbaar door vlokvorming met opgewerveld slib. Dit

Het creëren van zoutgradiënten en andere voorzieningen ten behoeve van de trek van vis en estuariene ongewervelden.

Het stimuleren van het gebruik van rivierwater voor doorspoeling, om lokaal de verblijftijd van water te verkorten;

Het verlagen van het zomerpeil om stratificatie en zuurstoftekort te beperken.

NB het betreft hier opties, met het uitvoeren van een of meerdere opties wordt naar een klimaatrobuuster systeem toegewerkt. Met het KlimaatKompas kan de mate van klimaatrobuustheid ingeschat en vergeleken worden.

heeft te maken met een gebrek aan natuurlijke dynamiek en diversiteit. Doordat het desbetreffende habitat (diep water) is oververtegenwoordigd (lage 'redundancy'), wordt dit niet voldoende gecompenseerd in andere habitats. Deze problematiek heeft niet zoveel te maken met klimaatverandering, maar is wel gebaat bij oplossingen ter versterking van de robuustheid van de watersystemen.

8.3 Werken aan robuustheid in het rivierengebied

De ecologische kwaliteit van de rivieren staat onder druk, enerzijds door de inrichting en anderzijds door intensief gebruik. Lagere rivierafvoeren leiden vaak tot vrijwel stilstaand water in gestuwde rivieren. Bovendien zorgen de lagere rivierpeilen die hiermee veelal samengaan voor lagere grondwaterstanden in de uiterwaarden met verdroging tot gevolg. De hogere temperaturen kunnen leefgemeenschappen beïnvloeden.

Voor een klimaatrobuuster systeem is het zaak om de variatie in leefgebieden te vergroten (diversiteit), de leefgebieden te verbinden (natuurlijke connectiviteit) en de natuurlijke dynamiek te herstellen. Voor het opvangen van de gevolgen van klimaatverandering is het vooral van belang om de veerkracht van het systeem te vergroten volgens de principes in paragraaf 8.1. Dat betekent dat de tekortkomingen in de diversiteit aan habitats en soorten en hun connectiviteit (in relatie tot dynamiek) in kaart moeten worden gebracht en zo veel mogelijk verholpen moeten worden.

8 Werken aan robuustheid

8.3.1 Diversiteit

Voordat bedijking plaatsvond, hadden de Rijn en de Maas brede overstromingsvlakten met ondiepe kommen waar zich op grote schaal moeras ontwikkelde. Door bedijking is het areaal van moerassen en (tijdelijke) plas-dras situaties zeer sterk in oppervlak afgenomen. Tegenwoordig zijn de overstromingsvlakten beperkt tot de uiterwaarden, die bovendien veel droger zijn geworden.

Oorzaak van verdroging van de uiterwaarden moet gezocht worden in lagere rivierpeilen en daaraan gerelateerde lagere grondwaterpeilen in de uiterwaarden. Gedacht wordt dat structurele bodemerosie van het zomerbed - rivierinsnijding - een grote invloed heeft op de rivierpeilen en dus ook grondwaterpeil. Rivierinsnijding (zie ook paragraaf 5.2.4) heeft geen relatie met klimaatverandering maar is vooral een antropogene druk. Wel kunnen rivierpeilen verder verlagen als gevolg van klimaatverandering door veranderende patronen in rivierafvoer (zie ook paragraaf 5.3.3).

De voortschrijdende rivierinsnijding heeft – in combinatie met sedimentatie van uiterwaarden – tot abrupte overgangen tussen water en land geleid. Hierdoor is het oppervlak van geleidelijke overgangen tussen het land en de rivier sterk afgenomen. Langs natuurlijke laaglandrivieren komen in het voorjaar ‘plas-dras’ situaties voor in grote delen van de uiterwaarden. Deze vormen belangrijke paai- en opgroeigebieden van kenmerkende riviersoorten. Dergelijke overstromingsvlaktes zijn langs de Nederlandse rivieren tegenwoordig vrijwel verdwenen.

Oorspronkelijk bestond de hoofdstroom van de rivier grotendeels uit ondiep, permanent stromend water met zand- en grindbanken, en – met name langs de Waal - een uitgebreid stelsel van meestromende nevengeulen en eenzijdig aangetakte strangen (Middelkoop et al., 2005). Door maatregelen voor de scheepvaart is het zomerbed sterk verdiept en waren vrijwel alle oorspronkelijke nevengeulen verdwenen. Dit resulteerde in een groot ‘tekort’ in het areaal van ondiep stromend water, een habitat waar vele stroomminnende (rheofiele) soorten volledig op zijn aangewezen.

8.3.2 Connectiviteit

In veel delen van het riviergebied zijn barrières gebouwd die de longitudinale verbinding voor vis en sediment in een rivier verstoren. Denk aan sluizen, stuwen, gemalen, dijken en dammen. Zoals in de vorige paragraaf al aangegeven heeft de inrichting van rivieren ook geleid tot een vermindering van verbinding tussen rivier en achterland zowel binnen- als buitendijks. Het resultaat hiervan is een verminderde bereikbaarheid voor organismen (denk aan vis) en stoffen om vanuit de hoofd- of nevenstromen de binnendijkse gebieden en uiterwaarden te bereiken. Ook kan de inrichting invloed hebben op de verbinding met het diepe grondwaterkwel van hoger gelegen delen (stuwwallen), alleen weten we niet precies wat de effecten zijn.

8.3.3 Dynamiek

In rivieren is de dynamiek in waterstanden vooral het resultaat van de waterafvoer. Het gaat hierbij om de frequentieverdeling van de

afvoeren, er zijn verschillen in voorjaars-, zomer- en winterafvoeren. Stuwen veroorzaken ook kleinere fluctuaties in waterstanden (met name in het groeiseizoen) en is er in de benedenrivieren sprake van dagelijkse getijdendynamiek. Stroomsnelheden zijn ook van invloed op de dynamiek en worden beïnvloed door kunstwerken, scheepvaart, inrichting (o.a. verdieping zomerbed) en debieten. Scheepvaart veroorzaakt een vorm van ongewenste dynamiek, namelijk golfslag die de ecologie van de oevers kan verstoren.

De dynamiek van verschillende riviertrajecten (zoals IJssel, Zandmaas en Bedijkte Maas) is flink beteugeld door de aanleg van dijken, kribben, stuwen en het vastleggen van oevers door stenen. De morfologische processen (erosie en sedimentatie) zijn door deze ingrepen flink verstoord, wat negatieve gevolgen heeft voor soorten die hiervan afhankelijk zijn.

8.3.4 Waterkwaliteit

De huidige situatie van de waterkwaliteit in de rivieren is matig. Wat betreft nutriënten is fosfaat op orde maar nitraat nog te hoog (KRW normen). Op sommige locaties heb je bij lage afvoer kans op vrijwel stilstaand water en hoge kans op algenbloei, zie bijvoorbeeld figuur 3.1. Ook voor andere stoffen kan met name de lage afvoeren knelpunten opleveren voor de waterkwaliteit en de effecten daarvan op de ecologie of de drinkwaterkwaliteit (Van Vliet, 2007). De ecotoxicologische effecten van chemische stoffen wordt bestudeerd door de kennisimpuls water (www.kiwk.nl), deze resultaten zullen relevant

8 Werken aan robuustheid

worden voor het kwantificeren van de effecten van klimaatverandering (lage afvoeren) op de ecologie.

Hogere watertemperaturen in combinatie met (verminderde) stroomsnelheid en verhoogde kans op zuurstofloosheid zijn ook zeker relevant. Vooral in gestuwde rivierpanden bestaat het risico dat de stroming (vrijwel) wegvalt tijdens lage rivierafvoeren, wat grote gevolgen kan hebben voor stroomminnende macrofauna- en vissoorten.

Opties voor het vergroten van de weerstand en de klimaat-robuustheid van het rivierengebied:

Creëren van geleidelijke overgangen van land en water. Door het verwijderen van zomerkades en verlaging van uiterwaarden kan het areaal aan tijdelijk overstroomde uiterwaarden in de toekomst weer toenemen.

Ontsteden van oevers. Tegenwoordig vindt langs meerdere riviertrajecten ontstening van rivieroevers plaats, waardoor morfologische processen (zoals erosie en sedimentatie) weer een kans krijgen en karakteristieke riviersoorten kunnen terugkeren.

Vergroten van het areaal aan laag dynamisch rivier-milieu. Dit areaal kan toenemen door uiterwaardverlaging of door het langer vasthouden van water achter de zomerkade. In de Buiten Ooij bij Nijmegen zijn met laatstgenoemde maatregel goede resultaten geboekt (Kurstjens et al., 2014). Ook door het achterwaarts verplaatsen van de winterdijk kan het areaal aan laag-dynamisch riviermilieu worden uitgebreid.

Aanleg van nevengeulen en eenzijdig verbonden strangen. De aanleg

hiervan kan het 'tekort' in het areaal van ondiep stromend water opheffen. De afgelopen jaren is veel energie gestoken in de aanleg van nevengeulen en eenzijdig aangetakte strangen. Deze maatregelen zijn uitgevoerd zowel voor de Kaderrichtlijn Water als 'Ruimte voor de Rivier'.

Langsdammen. Op dit moment wordt in een pilot bekeken of langsdammen de structurele erosie van het zomerbed (rivierinsnijding) kunnen bestrijden. Deze erosie is niet het klimaat gerelateerd maar heeft wel gevolgen voor de ecologie van de uiterwaarden.

Langsdammen lijken grote voordelen voor de ecologische ontwikkeling van de oevers te hebben. Zo worden de effecten van golfslag op de oevers sterk gereduceerd en treedt er geen 'omkering' op van de waterstroming bij passage van schepen. In de oevergeulen van twee langsdammen die in 2015 langs de Waal zijn aangelegd, is het aantal zeldzame inheemse vissen, schelpdieren en insectenlarven fors toegenomen. Het gaat daarbij zowel om het aantal soorten als het aantal individuen. De exoten zijn daarentegen hun overmacht kwijtgeraakt (Collas et al., 2018).

NB Tussen de trajecten van de Rijn en Maas zijn grote verschillen in rivierafvoer, verhang en ondergrond, waardoor de processen van stroming, rivierinsnijding, erosie en sedimentatie in elk riviertraject anders verlopen. Om deze reden zijn bovenstaande maatregelen niet in elk riviertraject even kansrijk. De keuze van de juiste maatregelen is dus maatwerk per riviertraject. Met het KlimaatKompas kan de mate van klimaatrobuustheid ingeschat en vergeleken worden.

8.4 Werken aan robuustheid in de Waddenzee en Eems-Dollard

De Waddenzee en de Eems-Dollard kennen hun eigen problemen die de (verbetering van de) robuustheid van deze systemen in de weg staan. In de Waddenzee gaat het onder andere om:

- Autonome ontwikkelingen in de waterhuishouding, morfologie en slibhuishouding, die het gevolg zijn van ingrepen in het verleden zoals de aanleg van de Afsluitdijk, de afsluiting van de Lauwerszee en kwelderwerken.
- Huidige activiteiten, zoals visserij, delfstofwinning en het baggeren van vaargeulen.
- Zeespiegelstijging en temperatuurstijging, die kunnen bijdragen aan het verlies van de diversiteit aan habitats en soorten.

Bovenstaande oorzaken resulteren in een beperking van natuurlijke dynamiek en processen en te weinig natuurlijke overgangen van zoet naar zout, droog naar nat en diep naar ondiep; dit leidt weer tot beperkingen voor een diverse en abundante flora en fauna. Hieronder wordt een kort overzicht gegeven langs de belangrijkste componenten voor de klimaat-robuustheid van het watersysteem.

8.4.1 Diversiteit

De diversiteit aan habitats is sturend voor de diversiteit aan soorten. Het heeft daarom hoge prioriteit om te zorgen voor vergroting van het

8 Werken aan robuustheid

kombergingsgebied en een zo groot mogelijk oppervlak aan gradiënten (van zoet naar zout en van droog naar nat).

Harde overgangen kunnen worden verzacht, binnendijkse gebieden kunnen worden verzilt en dijken kunnen landwaarts worden verplaatst om kwelderoppervlak te vergroten. Het gaat daarbij met name om natuurlijke kwelders en niet om kwelders die ten gevolge van landaanwinning zijn ontstaan. Het doel van dergelijke maatregelen is om de natuurlijke fysische processen meer ruimte te geven, om zo de kans op behoud en herstel van diversiteit en ecologische processen bij klimaatveranderingen te vergroten.

Het actief sturen hierop, zoals in de Zuidwestelijke Delta gebeurt, is misschien minder opportuun in de Waddenzee. Wel kan aan de randen van het wad – dus in de kwelders aan de kust en op eilanden – gewerkt worden aan natuurlijkere overgangen. Dergelijke maatregelen zijn haalbaar. Hierbij kan zowel gedacht worden aan binnendijkse als buitendijkse maatregelen (waarbij met name het (deels) slechten van de stuifdijken op de eilanden een veelbelovende maatregel is). Ook het stimuleren van herstel van mosselbanken is een optie.

Tegelijkertijd zou de menselijke verstoring moeten verminderen, om de diversiteit te verbeteren. Dit geldt bijvoorbeeld voor de garnalenvisserij, die leidt tot bijvangst en bodemverstoring, en voor het onderhoud van vaargeulen. Het verminderen van bodemverstoring kan herstel van biobouwers zoals kokerwormen en schelpdierbanken in het intergetijdengebied bevorderen.

In de Eems-Dollard is de waterkwaliteit – en daarmee de biodiversiteit – achteruitgegaan door vertroebeling. De industrie legt op dit gebied een relatief grotere druk dan op de Waddenzee als geheel.

Grootschalige inpolderingen langs de randen van het systeem hebben ertoe geleid dat er minder slib kan bezinken. Door de vaargeulverruiming van de getijdenrivier van de Eems bij Emden is de slibproblematiek in de Eemsrivier nog erger.

Het beheer kan zich richten op het vastleggen van slib, om zo de leefgebieden op de overgangen tussen land en water te verbeteren. Verruiming van het kombergingsgebied door ontpoldering kan bijdragen aan het vergroten van het oppervlak van laagdynamisch gebied waar het slib de kans krijgt te bezinken.

8.4.2 Connectiviteit

De connectiviteit van de Waddenzee met de omliggend grote wateren is groot: met uitzondering van de Afsluitdijk en de dijk bij Lauwersoog zijn er geen ingrepen geweest die de connectiviteit beperken. Wel kan de connectiviteit met het IJsselmeer en het Lauwersmeer, maar ook die met de binnenwateren van het vasteland worden verbeterd. Hierdoor worden betere overlevingskansen gecreëerd voor trekvisserij, en kan zoetwater op een ‘natuurlijker’ manier op de Waddenzee worden geloosd.

Hetzelfde geldt voor de Eems-Dollard. Inmiddels zijn er al maatregelen voor verbeterde zoet-zout overgangen op het wad en de Eems-Dollard uitgevoerd (o.a. spuisluisbeheer, vispassages), en wordt tussen Waddenzee en IJsselmeer een vismigratierivier aangelegd. Verdere verbeteringen zijn echter haalbaar.

8.4.3 Dynamiek

De dynamiek van het waterpeil van de Waddenzee en de Eems-Dollard is bijna volledig natuurlijk. Er zijn geen beperkingen in de aan- en afvoer van water, zoals in de Zuidwestelijke Delta het geval is. Kansen om deze dynamiek nog verder te verbeteren zijn er vrijwel niet. Zoals eerder aangegeven is de komberging van de Waddenzee te klein om de sedimenthuishouding in balans te krijgen. De komberging moet hiervoor dan ook worden vergroot, onder andere door ontpoldering, het ‘zachter’ en geleidelijk maken van dijken, het binnenwaarts verleggen van dijken en het (deels) openstellen van het Lauwersmeer.

Op termijn kan gedacht worden aan het openstellen van het Amstelmeer en het creëren van een grote zoet-zout overgang aan de IJsselmeerkant van de Afsluitdijk. Dynamiek vergroten kan ook aan de Noordzeekusten van de eilanden die aansluiten op de kwelders. De daar gelegen duinen kunnen worden doorgestoken om zo ‘washovers’ te maken die in de achtergelegen kwelders uitkomen.

Soortgelijke ingrepen zijn denkbaar aan de waddenkant van de eilanden. Hier zijn enkele mogelijkheden genoemd om de dynamiek van het Waddengebied te vergroten. Het is geen uitputtende lijst.

8.4.4 Waterkwaliteit

De waterkwaliteit van de Waddenzee kan onder andere worden verbeterd door het areaal waar gebaggerd wordt te verminderen, door gebruik te maken van minder diep stekende veerboten en mogelijk ook door baggertechnieken aan te passen. Daardoor kan met name de troebelheid

8 Werken aan robuustheid

worden verminderd. De waterkwaliteit kan verder worden verbeterd door het verminderen van de aanvoer van verontreinigende stoffen, zoals opkomende organische verontreinigingen en microplastics.

Ook een vergroting van het areaal aan mossel- en oesterbanken kan een positieve invloed hebben op de slibhuishouding in het gebied.

Hetzelfde geldt voor zeegras, maar de kansen van herstel van zeegrasvelden lijken vooralsnog beperkt. Maatregelen in het Eems-estuarium, zoals binnen- en buitendijkse slibvang en verbetering van de leefgebieden tussen land en water, zullen zeker bijdragen aan een verbetering van de waterkwaliteit en het functioneren van het Eems-Dollard ecosysteem.

Opties voor het vergroten van de weerstand en de klimaatrobustheid van de Waddenzee en Eems Dollard estuarium:

Verzachten van harde overgangen. Dit kan door binnendijkse gebieden te verzilten en dijken landwaarts verplaatsen om kwelderoppervlak te vergroten. Het gaat om het creëren van natuurlijke kwelders.

Buitendijks invangen van slib. In een pilot gaat getoetst of dit ook daadwerkelijk gaat leiden tot een lagere slibconcentratie in het Eems Dollard estuarium.

Vergroten van het areaal aan mossel- en oesterbanken. Naast bevorderen van de diversiteit kan het ook een positieve invloed hebben op de slibhuishouding in het gebied.

8.5 Werken aan robuustheid in de Zuidwestelijke Delta

Vier recent uitgevoerde of op handen zijnde projecten in de delta leiden tot verbetering van de dynamiek en de connectiviteit met omliggende wateren. In juni 2004 is de doorspoeling van het Veerse Meer gerealiseerd en in januari 2019 de Kier in de Haringvlietdam. In 2017 is de Flakkeese Spuisluis opengesteld, waarmee een verbinding is gelegd tussen de Oosterschelde en de Grevelingen. In de nabije toekomst volgt wellicht de terugkeer van getij in de Grevelingen en mogelijk ook in het Volkerak.

Vismigratie tussen Waddenzee, IJsselmeer en Waddenzee, Eems verder vergroten. Dit kan door het creëren van zoutgradiënten en andere voorzieningen ten behoeve van de trek van vis en estuariene ongewervelden.

Vergroten van de komberging van de Waddenzee. Dit zou kunnen door onder andere ontpoldering, het ‘zachter’ en geleidelijk maken van dijken of het binnenwaarts verleggen van dijken.

NB het betreft hier opties, met het uitvoeren van een of meerdere opties wordt naar een klimaatrobuster systeem toegewerkt. Met het KlimaatKompas kan de mate van klimaatrobustheid ingeschat en vergeleken worden.

Het denken over klimaatrobustheid m.b.t. de Grevelingen is al gestart. Hier wordt al enige jaren gestudeerd op de mogelijkheden en gevolgen van een terugkeer van het getij. Er is gedacht over normen en eisen aan de klimaatrobustheid, bijvoorbeeld hoeveel zeespiegel wil en kan men opvangen?

8.5.1 Diversiteit

De grootste afname in diversiteit is het gevolg van de afsluiting en compartimentering van de deltawateren. Daarom zal ook het terugbrengen van een deel van de oude dynamiek en connectiviteit de meest effectieve manier zijn om iets van dat verlies te compenseren. Natuurlijk kunnen ook de habitats en soorten van de zoete wateren waardevol zijn, maar door het ontbreken van gradiënten en seizoensdynamiek is de ruimtelijke diversiteit relatief laag.

Het herintroduceren van (beperkt) getij in de Grevelingen zorgt voor een toename van het areaal intergetijdengebied. Hierbij dient zorgvuldig te worden omgegaan met natuurwaarden in de huidige situatie. De Kier in het Haringvliet gaat (nog) nauwelijks gepaard met toename van de getijslag, maar brengt wel een deel van de oude zout-zoet gradiënten terug en is gunstig voor een aantal sleutelsoorten (trekvis). Er zijn echter ook zorgpunten in de uitvoering, met name het ‘zoetspoelen’ van het Haringvliet bij lage rivierafvoer. Door de (seizoensmatig) tegennatuurlijke afwisseling van zoet en brak bestaat de kans dat daardoor in het westelijke deel van het systeem noch een zoete, noch een brakke of estuariene gemeenschap zich goed kan

8 Werken aan robuustheid

ontwikkelen. In de Grevelingen kan de terugkeer van getij ook een aantal van de huidige habitattypen en soorten onder druk zetten.

Behalve via dynamiek en connectiviteit kan de habitat- en soortdiversiteit ook toenemen door middel van aanleg van habitats, zowel onder als boven water. Een goed voorbeeld daarvan is tiengemeten in het Haringvliet.

8.5.2 Connectiviteit

Het Haringvliet wisselt water uit met de Noordzee, de Grevelingen met de Noordzee en de Oosterschelde en het Veerse Meer met de Oosterschelde (en daarmee eveneens met de Noordzee). Dit gaat samen met een toename in dynamiek en habitatdiversiteit.

Connectiviteit tussen de deltawateren en de Noordzee is belangrijk om de accumulatie van onder meer organisch stof en nutriënten te voorkomen en te verhelpen. Het meest zichtbaar is de rol van doorspoeling in het Veerse Meer, waar fosfaat pas afnam na ingebruikstelling van het doorlaatmiddel Katse Heule in 2004. Maar ook in het Volkerak nam de fosfaatconcentratie trager af dan in de rivieren (figuur 7.3). -

Naast de vier hierboven genoemde projecten, zijn er in de delta diverse ontpolderingsprojecten uitgevoerd, evenals maatregelen ter verbetering van de connectiviteit voor vis in het kader van de KRW.

Opties voor het vergroten van de weerstand en de klimaatrobuustheid van de Zuidwestelijke Delta:

- Herintroductie van (beperkt) getij.
- Versterken van ruimtelijke diversiteit door aanleg van habitats zoals natuureilanden.
- Aanleg van doorlaatmiddelen t.b.v. doorspoeling.
- Ontpoldering; het omzetten van landgebieden tot intergetij-dennatuur. Ontpoldering van de Hedwigepolder geeft aan hoe

gevoelig dit ligt. Mogelijk kan de gerichte inzet van wisselpolders hiervoor een alternatief bieden.

- Het creëren van zoutgradiënten en andere voorzieningen ten behoeve van de trek van zeezoogdieren, vis en estuariene ongewervelden.

NB het betreft hier opties, met het uitvoeren van een of meerdere opties wordt naar een klimaatrobuuster systeem toegewerkt. Met het KlimaatKompas kan de mate van klimaatrobuustheid ingeschat en vergeleken worden.

8.5.3 Dynamiek

De bovengenoemde projecten zorgen niet alleen voor verbetering van de connectiviteit, maar ook voor een toename van de dynamiek. De aanleg van een doorlaat in de Brouwersdam zorgt voor herstel van de getijdendynamiek in het Grevelingenmeer. Deze doorlaat moet voor een peilverschil (getijde) van maximaal 50 centimeter zorgen. Dit zou voldoende moeten zijn om het water van het meer te mengen en de stratificatie op te heffen. Naast de verbetering van de waterkwaliteit, wordt verwacht dat de algehele ecologische toestand van het meer zal verbeteren. In het Haringvliet betekent de Kier vooralsnog geen toename van de peildynamiek, maar wel van een seizoensdynamiek in de zoet-zout gradiënt. In het Veerse Meer is eveneens sprake van een grotere dynamiek sinds het weer in verbinding staat met de Oosterschelde, en als wordt besloten tot terugkeer van zout water in het Volkerak is ook sprake van de terugkeer van enig getij.

8.5.4 Waterkwaliteit

Het is de verwachting dat de waterkwaliteit zal verbeteren, als gevolg van de toename van dynamiek en connectiviteit. Het meest relevant is dit in de Grevelingen en Volkerak Zoommeer. Door het afnemen van de stratificatie vermindert ook het probleem van de zuurstofloosheid, met name in de diepere delen. De waterkwaliteit verbetert daardoor, en het systeem wordt beter voorbereid op bijvoorbeeld toename van de kans op algenbloei en stratificatie als gevolg van stijging van de watertemperatuur. Verbetering van de waterkwaliteit was ook het doel van de doorspoeling van het Veerse Meer, waar de hoge fosfaatconcentraties inderdaad zijn gedaald. De relatief hoge stikstofconcentraties in de zoete deltawateren die mogelijk meer zout water gaan ontvangen (Haringvliet en Volkerak) vormen voor de korte termijn nog een punt van zorg, maar op de langere termijn zal dit probleem door uitspoeling verminderen.

8 Werken aan robuustheid

8.6 Betekenis voor het klimaatkompas

Rijkswaterstaat wil graag beschikken over een toetsingsmethode waarmee de PAGW-projecten kunnen worden beoordeeld op hun bijdrage aan klimaatrobustheid van het systeem. Hiervoor wordt momenteel het klimaatkompas ontwikkeld. De voorliggende klimaatscan vormt de basis voor de opzet hiervan.

Onderstaande tabel vormt hiervoor input. De tabel geeft de drukfactoren aan en hun belang per watersysteem. Hoe meer kruisjes, hoe kwetsbaarder het ecologisch functioneren voor deze drukfactor is. Een deel van de drukfactoren kan met behulp van modellen worden gekwantificeerd. De niet te kwantificeren aspecten worden beoordeeld op basis van expertkennis.

Tabel 5. Gevoeligheid van de vier hoofdwatersystemen voor de zes drukfactoren van klimaatverandering.

	IJsselmeergebied	Rivierengebied	Waddenzee	ZW Delta
Temperatuurstijging	+++	++	++	++
Zeespiegelstijging	+	++	+++	+++
Neerslag patronen	++	+++	+	+
Wind	++	-	+	-
Mist en instraling	-	-	+	-
Verzuring	-	-	-	-

+++ = Heel erg kwetsbaar. ++ = Kwetsbaar; + = matig kwetsbaar;

- = niet of nauwelijks kwetsbaar;



- Alheit, J., Möllmann, C., Dutz, J., Kornilovs, G., Loewe, P., Mohrholz, V. & Wasmund, N. (2005). Synchronous ecological regime shifts in the central Baltic and the North Sea in the late 1980s. *ICES Journal of Marine Science* 62: 1205-1215.
- Baarse, G. (2014). Natural Solutions to Cope with Accelerated Sea Level Rise in the Wadden Sea Region - Towards an Integrated Long-Term Adaptation Strategy Framework. Knowledge to Climate Report KFC 132/2014, Utrecht. <http://edepot.wur.nl/333715> (June 28, 2019).
- Baart, F., Rongen, G., Hijma M., Kooi, H., De Winter, R. & Nicolai, R. (2019). Zeespiegelmonitor 2018; de stand van zaken rond de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Deltares, rapport 11202193-000-ZKS-0004, Delft.
- Baart, F., Rongen, G., Nicolai, R., & Van de Vries, C. (2017). Sea-level monitor (Version v2017.04). <http://doi.org/10.5281/zenodo.1065964>: Zenodo.
- Bálint, M., Domisch, S., Engelhardt, C., Haase, P., Lehrian, S., Sauer, J., Theissiger, K., Pauls, S.U. & Nowak, C. (2011). Cryptic biodiversity loss linked to global climate change. *Nature Climate Change* 1: 313–318.
- Beukema, J. D. (2017). Dynamics of a Limecola (Macoma) balthica population in a tidal flat area in the western Wadden Sea: effects of declining survival and recruitment. *Helg. Mar. Res.* 71: 18.
- Beumer, V., Vernimmen, R., & Holzhauer, H. (2009). Effecten natuurwaarden benedenrivierengebied als gevolg van klimaatmaatregelen; met een doorvertaling naar de effecten op de ecologische KRW-doelen. Rapport Deltares, Utrecht.
- Blew, J., Günther, K., Hälterlein, B., Kleefstra, R., Laursen, K., Ludwig, J. & Scheiffarth, G. (2017). Migratory birds. In: Wadden Sea Quality Status Report 2017. Eds.: Kloepper S. et al., Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven, Germany.
- Brohan, P., Kennedy, J., Harris, I., Tett, S. & Jones, P. (2005). Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. *J. Geophys. Res.* 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548.
- Collas, F., Buijse, T., & Leuven, R. (2018). Langsdammen in de Waal. *Visionair* 48: 9-11.
- Common Wadden Sea Secretariat (2017). Introduction. In: Wadden Sea Quality Status Report 2017. Eds.: Kloepper S. et al., Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven, Germany. [qsr.waddensea-worldheritage.org/reports/introduction](http://www.waddensea-worldheritage.org/reports/introduction)
- Crok, L. A. (2013). A Late 20th Century European Climate Shift: Fingerprint of Regional Brightening? *Atmospheric and Climate Sciences* 2013 (3): 291-300.
- De Ronde, J., Mulder, J., & Van Duren, L. (2013). Eindadvies ANT Oosterschelde. Deltares rapport 1207722-000, Delft.
- Deltafacts. Opgehaald van www.stowa.nl/deltafacts.
- Deltaprogramma 2020. Opgehaald van <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/deltaprogramma>
- Dionisio Pires, M. & Kramer, N. (2018). Klimaatverandering IJsselmeergebied. Deltares rapport 11201957-002, Utrecht.
- Engelhard, G.H., Pinnegar, J., Kell, L.T. & Rijnsdorp, A.D. (2011). Nine decades of North Sea sole and plaice distribution. *ICES Journal of Marine Science* 68 (6), 1090-1104.
- Fitzer, S.C., Zhu, W., Tanner, K.E., Phoenix, V.R., Kamenos, N.A. & Cusack, M. (2015). Ocean acidification alters the material properties of Mytilus edulis shells. *Journal of The Royal Society Interface* 12(103): 20141227.
- Haasnoot, M., Bouwer, L., Diermanse, F., Kwadijk, J., Van der Spek, A., Oude Essink, G., Delsman, J., Weiler, O., Mens, M., Ter Maat, J., Huismans, Y., Sloff, K. & Mosselman, E. (2018). Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Een verkenning. Deltares rapport 11202230-005-0002, Delft.
- Herman, P., Beauchard, O., Van Duren, L., & Boon, J. (2014). De Staat van de Noordzee. www.noordzeedagen.nl: Noordzeedagen Texel, okt 2014.
- IJnsen, F. (1988). Het karakteriseren van winters. *Zenit februari 1988*: 50-55.
- Janssen, S., Taal, M., Cleveringa, J., Lofvers, E., Mulder, H., Oost, A. & Wan, Z.B. (2017). Naar Een Langjarig Onderzoeksprogramma Morfologie Waddenzee - Resultaten 2016. Deltares, rapport 1230032-000, Delft.
- Kabat, P., Bazelmans, J., Van Dijk, J., Herman, P.M.J., Speelman, H., Deen, N.R.J. & Hutjes, R.W.A. (2009). Kennis voor een duurzame toekomst van de Wadden - Integrale Kennisagenda van de Waddenacademie. Leeuwarden / Amsterdam: Waddenacademie / KNAW.
- Kamermans, P., Smit, C., Wijsman, J., & Smaal, A. (2014). Meerjarige

- effect- en productiemetingen aan MZI's in de Westelijke Waddenzee, Oosterschelde en Voordelta. Samenvattend eindrapport. IMARES, Rapport nummer: C191 (13, 93 pagina's. . Kleinshans, M., Klijn, F., Cohen, K., & Middelkoop, H. (2013). Wat wil de rivier zelf eigenlijk? Deltares rapport 1207829-000-VEB-0024, Delft).
- Klijn, F. A., Asselman, N.E.M., Hegnauwer, M., Mosselman, E. & Sperna Weiland, F. (2019). Klimaatadaptatie in het rivierengebied. Landschap 2019 (2): 105-113.
- Klijn, F., Ten Brinke, W., Asselman, N. & Mosselman, E. (2018). Het verhaal van de rivier, een eerste versie. Rapport Deltares, Delft.
- Klijn, F., Hegnauer, M., Beersma, J., & Sperna Weiland, F. (2015). Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas? Samenvatting van onderzoek met GRADE naar implicaties van nieuwe klimaatprojecties voor rivierafvoeren. Deltares rapport 1220042-004, Delft.
- Kurstjens, G., Van Geest, G., Peters, P. & Wijers, T. (2014). Ondiepe overstromingsvlakte als missing link. De Levende Natuur 115: 129-133.
- Laat, A. & Cork, M. (2013). A Late 20th Century European Climate Shift: Fingerprint of Regional Brightening? Atmospheric and Climate Sciences 2013 (3): 291-300.
- Lammers, J. (2014). RWS Zee en Delta; Milieueffectrapport bij de Rijksstructuurvisie Grevelingen Volkerak-Zoommeer. Rijkswaterstaat Zee en Delta, Den Haag. https://www.zwdelta.nl/sites/all/files/default/nr_02_-_mer_rapport.pdf.
- Le Bars, D., Drijfhout, S. & De Vries, H. (2017). A high-end sea level rise probabilistic projection including rapid Atarctic ice sheet mass loss. Environmental Research Letters 12 (4). <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aa6512>: Environmental Research Letters, 12, 044013.
- Liefveld, W., Emond, D. & Van der Valk, M. (2011). Kribverlaging Waal fase 3 en Langsdammen Wamel en Ophemert. Toetsing in het kader van de Flora- en faunawet, de Natuurbeschermingswet 1998 en de Ecologische Hoofdstructuur. Bureau Waardenburg, rapport 11-093, Culemborg.
- Mooij, W., Hüllsmann, S., Senerpont Domis, L., Nolet, B., Bodelier, P., Boers, P., Dionisio Pires, M., Gons, J.J., Ibelings B.W., Noordhuis, R., Portielje, R., Wolfstein, K. & Lammens, E. (2005). The impact of climate change on lakes in the Netherlands: a review. Aquatic Ecology 39:381-400.
- Nationaal Waterplan. (2009). Nationaal Waterplan 2009-2015. Rijksoverheid.
- Natuurkalender. Opgehaald van www.naturetoday.com.
- Nolte, A. L. (2016). Grevelingenmeer van stagnant naar beperkt getij. Synthesedocument Beschikbare kennis en resterende kennisvragen met betrekking tot het effect van introductie beperkte getijslag op het natuurlijk systeem van Grevelingenmeer en Voordelta. Deltares, rapport 1230426-000, Delft. http://publications.deltares.nl/1230426_000.
- Noordhuis, R. (2010). Ecosysteem IJsselmeergebied: nog altijd in ontwikkeling. Trends en ontwikkelingen in water en natuur van het Natte Hart van Nederland. Rijkswaterstaat Waterdienst, Lelystad.
- Noordhuis, R., Groot, S., Dionisio Pires, M. & Maase, M. (2014). Wetenschappelijk eindadvies ANT-IJsselmeergebied. Vijf jaar studie naar kansen voor het ecosysteem van het IJsselmeer, Markermeer en IJmeer met het oog op de Natura2000 doelen. Deltares, rapport 1207767-000, Utrecht.
- Philippart, C.J.M., Mekkes, L., Buschbaum, C., Wegner, K.M. & Laursen, K. (2017). Climate Ecosystems. In: Wadden Sea Quality Status Report 2017. Eds.: Kloepper S. et al., Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven, Germany. <https://qsr.waddensea-worldheritage.org/reports/climate-ecosystems>.
- Provoost, P., van Heuven, S., Soetaert, K., Laane, R. & Middelburg, J. (2010). Seasonal and long-term changes in pH in the Dutch coastal zone. Biogeosciences, 7(11), 3869-3878. doi: 10.5194/bg-7-3869-2010.
- Reid, P., Hari, R.E., Beaugrand, G., Livingstone, D.M., Marty, C., Straile, D., Bardichivich, J. e.v.a. (2016). Global impacts of the 1980s regime shift. Global Change Biology 22: 682-703.
- Salt, L., Thomas, H., Prowe, A., Borges, A., Bozec, Y. & Baar, H.D. (2013). Variability of North Sea pH and CO2 in response to North Atlantic Oscillation forcing. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, 118(4): 1584-1592. doi: 10.1002/2013jg002306.
- Schuttenhelm, R. (2017). De toekomst van de Waddenzee: een stijgende zeespiegel over een dalende bodem. De Waddenvereniging, Harlingen.
- Stockholmresilience.org. Opgehaald van <https://stockholmresilience.org>

- Tiessen, M., & Nolte, A. (2018). Verkenning zoet-zoutgradienten in het Volkerak-Zoommeer gericht op ecologische kwaliteit. Deltares Rapport 11201168-000, Delft.
- Troost, K., Van Stralen, M., Van Zweeden, C. & Brinkman, B. (2015). Ruimtelijke verspreiding van mosselen en Japanse Oesters in de Waddenzee in de periode 1992 - 2013. Imares, Wageningen. <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/488517>.
- Tsimplis, M., Shaw, A., Flather, R. & Woolf, D. (2006). The influence of the North Atlantic Oscillation on the sea-level around the northern European coasts reconsidered: the thermosteric effects. *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 364(1841), 845-856. doi: 10.1098/rsta2006.1740.
- Van Aken, H. M. (2008). Variability of the water temperature in the western Wadden Sea on tidal to centennial time scales. *Journal of Sea Research*, 60(4), 227-234. doi: 10.1016/j.seares.2008.09.001.
- Van den Berg, M., Coops, H., Simons, J., & Pilon, J. (1999). A comparative study of the use of inorganic carbon resources by *Chara aspera* and *Potamogeton pectinatus*. *Aquatic Botany* 72 (3-4): 219-233.
- Van den Brink, F. (1994). Impact of hydrology on floodplain lake ecosystems along the lower Rhine and Meuse. Dissertatie Katholieke Universiteit Nijmegen.
- Van der Deijl, E. (2018). Sediment dynamics of a tidal freshwater wetland system. A case study in the Biesbosch in the Rhine-Meuse delta. Dissertatie Universiteit van Utrecht.
- Van der Spek, A. (2018). The development of the tidal basins in the Dutch Wadden Sea until 2100: the impact of accelerated sea-level rise and subsidence on their sediment budget – a synthesis. *Neth. J. of Geosciences – Geologie en Mijnbouw* 97-3: 71-78.
- Van der Veer, H. D. (2015). Long-term changes of the marine fish fauna in the temperate western Dutch Wadden: degradation of trophic structure and nursery function. *Est. Coastal Shelf Sci*: 155, 156-166.
- Van der Zee, E., Rippen, A. & Latour, J. (2017). Natuurwaarden Sublitorale Waddenzee. A&W Ecologisch onderzoek, rapport 2292, Veewouden.
- Van Duren, L., De Jong, M., Dankers, N., Oiff, H., Van Stralen, M., De Vlas, J. & Bouma, J. (2009). Plan van Aanpak Natuurherstelplan Waddenzee -Thema 3: Biobouwers in de Waddenzee.
- Van Duren, L., Gittenberger, A., Smaal, A.C., Van Koningsveld M., Osinga, R., Cado van der Lelij, J.A. & De Vries, M.B. (2016). Rijke Riffen in de Noordzee. Verkenning naar het stimuleren van natuurlijke riffen en gebruik van kunstmatig hard substraat. Deltares, rapport 1221293-000, Delft.
- Van Katwijk, M. (2015). Herstelmaatregel groot zeegras in de Nederlandse Waddenzee - Haalbaarheid van de doelstellingen onder de Kaderrichtlijn Water. Deltares rapport 1203892-000, Delft.
- Van Maren D.S., Oost, A.O., Wang, Z.B. & Vos, P.C. (2016). The effect of land reclamations and sediment extraction on the suspended sediment concentration in the Ems Estuary. *Marine Geology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2016.03.007>.
- Van Oldenborgh, G., Drijfhout, S., Van Ulden, A., Haarsma, R., Sterl, A., Severijns, C., Hazeleger, W. & Dijkstra, H. (2009). Western Europe is warming much faster than expected. *Clim. Past* 5: 1-12.
- Van Swaay, C., Van Turnhout, C., Sparrius, L., Van Grunsven, R., Van Deijk, J., Van Strien, A. & Doornbos, S. (2018). Hoe onze flora en fauna veranderen door klimaatverandering. *De Levende Natuur* 119 (6): 256-259.
- Van Vliet, M. & Zwolsman G. (2007). Klimaatverandering en de waterkwaliteit van de Maas. H2O/9, 29-33.
- Van Walraven, L. R. (2017). Long-term patterns in fish phenology in the western Dutch Wadden Sea in relation to climate change. *J. Sea Res.* doi: 10.1016/j.seares.2017.04.001.
- Vautard, R., Yiou, P. & Van Oldenborgh, G. (2009). Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years. *Nature Geosci.* 2 (2): 115–119. DOI: 10.1038/ngeo414.
- Velthuis, M. (2018). Elements of Carbon cycling: primary producers in aquatic systems under global change. Dissertatie Universiteit Utrecht.
- Veraart, J., Timmerman, J., De Lange, H., Paulissen, M., Bogers, M., Spijkerman, A. & Holz Amorim de Sena, N. (2018). Van robuuste natuur tot herstel ecologische veerkracht in de Rijkswateren. Een analyse over de mogelijkheden van het gebruik van infographics als een handreiking voor het realiseren van herstel ecologische veerkracht en extra dynamiek in de Rijkswateren. Wageningen Environmental Research, rapport 2860.
- Vermeersen, B.L.A., Slangen, A.B.A., Gerkema, T., Baart, F., Cohen,

- K.M. e.v.a. (2018). Sea-Level Change in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Geosciences* 97(3): 79–127.
- Verschelling, E. (2018). Drowning or emerging. The effect of climate change on the morphology of tidal freshwater wetlands. Dissertatie Universiteit van Utrecht.
- Vlaams-Nederlandse Scheldecommissie. (2019). Systeemanalyse natuur Schelde-estuarium. Gezamenlijk feitenonderzoek van stakeholders, deskundigen en de Vlaams-Nederlandse Scheldecommissie, Bergen op Zoom.
- Walker, P. (2015). Wadden Sea Fish Haven. Development Agenda for Fish in the Wadden Sea. . <https://rijkwaddenzee.nl/wp-content/uploads/2016/03/FishStrategyWalkerPRWwebsiteDEF.pdf>.
- Wang, Z., Elias, E., Van der Spek, A. & Lodder, Q. (2018). Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea: impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. *Neth. J. of Geosciences – Geologie en Mijnbouw* 97-3: 18.
- Waterforum. Opgehaald van waterforum.nl (2018, 9 juli).
- Weeber, M., Kramer, L., Genseberger, M., Tiessen, M., Troost, T., Eijsberg-Bak, C. & Nolte, A. (2018). Data-analyse en modelvalidatie van het Volkerak-Zoommeer ecosysteem. Met focus op blauwalgen en Quaggamosselen . Deltares rapport 11201168-000, Utrecht.
- Weiss, L., Pötter, L., Steiger, A., Kruppert, S., Frost, U. & Tollrian, R. (2018). Rising pCO₂ in freshwater ecosystems has the potential to negatively affect predator-induced defenses in *Daphnia*. *Current Biology* 28: 327-332.
- Williamson, P., Turley, C. & Ostle, C. (2017). Ocean acidification. *MCCIP Science Review* 2017: 1-14, doi:10.14465/2017.arc10.001-oac.
- Zhang, M., Duan, H., Shi, X., Yu, Y., & Kong, F. (2016). Contributions of meteorology to the phenology of cyanobacterial blooms: Implications for future climate change. *Water research* 46 (2), pp. 442–452. DOI: 10.1016/j.watres.2011.11.013.

Titel

KlimaatScan

Project

11203733-000

Kenmerk

11203733-000-ZWS-0006

Samenvatting

De grote waterstaatkundige ingrepen in de vorige eeuw maakten Nederland veilig en welvarend . Ze maakten de rivieren geschikt als hoofdtransportassen, brachten bescherming tegen hoogwater en zorgden voor een strategische voorraad zoet water voor landbouw, natuur en drinkwaterbereiding. De grote ingrepen hebben ook een keerzijde. In grote wateren zoals Grevelingen, Eems-Dollard, Waddenzee, Oosterschelde, Rijn en Maas en IJsselmeergebied veranderden de natuurlijke stromen van water, zand en slib en daarmee de ecologische waterkwaliteit en de natuur. Kenmerkende leefgebieden in een delta voor planten en dieren – zoals de afwisseling van ondiepe delen en diepe geulen, overstromingsvlaktes, intergetijdengebieden en moeras – gingen verloren en migratieroutes werden geblokkeerd. Daarvoor in de plaats kwamen nieuwe leefgebieden in de vorm van zoete en zoute meren, gestuwde rivieren en een halfopen zeearm zoals de Oosterschelde.

Begin 2018 hebben de ministers van Infrastructuur en Waterstaat en Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit de ambitie uitgesproken om tot 2050 diverse maatregelen te nemen die nodig zijn om te komen tot *“toekomstbestendige grote wateren waar hoogwaardige natuur goed samengaat met een krachtige economie”*. De maatregelen zijn voornamelijk gericht op het terugbrengen van de natuurlijke dynamiek van het water en de ecologische processen die daarbij horen.

Naast waterstaatkundige ingrepen zijn er meer factoren die het ecologische functioneren van de grote wateren beïnvloeden, waaronder klimaatverandering. Dit document – de KlimaatScan – geeft een overzicht van kenmerken van klimaatverandering en effecten op de Nederlandse grote wateren. De effecten verschillen per type watersysteem: een estuarium is vooral gevoelig voor zeespiegelstijging, een meer voor temperatuurstijging en de rivieren zijn weer kwetsbaar voor veranderingen in afvoer en dicht bij zee voor zoutindringing. Er is daarom gekozen voor een uitsplitsing naar vier watersystemen: het IJsselmeergebied (H.5), het Rivierengebied (H.6), de Waddenzee en Eems-Dollard (H.7) en de Zuidwestelijke Delta (H.8). Dit zijn vier relevante systemen voor PAGW.

De focus van de KlimaatScan ligt op de fysische drukfactoren die van belang zijn voor het ecologisch functioneren van een watersysteem in de brede zin van het woord, dat wil zeggen inclusief land-water overgangen en overstromingszones. De KlimaatScan is belangrijke input voor de ontwikkeling van het KlimaatKompas; een toetsinstrument voor klimaatrobustheid.

Versie
0.1

Datum
dec. 2019

Auteur
Ruurd Noordhuis
Gerben van Geest
Maaïke Maarse
Sophie Vergouwen
Aren Boon

Paraaf


Review
Bart van den Hurk

Paraaf


Goedkeuring
Gerard Blom

Paraaf


Status
Definitief

An aerial photograph of a river delta. A wide, winding river flows from the top center towards the bottom right. A large, flat sandbar is visible in the middle of the river. A person is riding a bicycle across this sandbar, casting a long shadow. The water is a mix of brown and blue, with white foam from waves visible on the right side. The overall scene is a vast, natural landscape.

Deltares



Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme innovaties, oplossingen en toepassingen voor mens, milieu en maatschappij. Deltares heeft vestigingen in Delft en Utrecht.

Deltares
Postbus 177
2600 MH Delft

T 088 335 8273
F 088 335 8582