

KLIMAATVERANDERING EN NATUUR

Een verkenning van risico's, kansen en aangrijpingspunten voor klimaatadaptatiebeleid

Ir. Wim G. Braakhekke, Stroming
Prof. dr. Frank Berendse, Wageningen Universiteit
Drs. Menno de Jong, Wageningen Universiteit
Drs. Arnold van Kreveld, Stroming
Drs. Alphons van Winden, Stroming

Een studie in opdracht van Kennis voor Klimaat



Augustus 2014

Dankwoord en colofon

Aan deze studie hebben de volgende personen bijgedragen, door het leveren van ideeën, informatie en commentaar:

Janette Bessembinder (KNMI)
Esther Blom (WWF-NL)
Sonje Döpp (KvK)
Monique Heijmans (WUR)
Marjon Hendriks (PBL)
Menno de Jong (WUR)
Arnold van Kreveld (Stroming)
Juul Limpens (WUR)
Gerard Litjens (Stroming)
Marijke Vonk (PBL)
Hans Bleumink (Overland)
Adriaan Rijnsdorp (Imares)
Paul Vertegaal (Natuurmonumenten)
Bram Vreugdenhil (Provincie Gelderland)
Flip Witte (KWR Watercycle Research Institute)

We bedanken hen voor hun constructieve inbreng.

Wim Braakhekke, Stroming
Frank Berendse, Wageningen Universiteit.

Inhoudsopgave

| | |
|---|-----------|
| Summary and conclusions | 5 |
| Samenvatting en conclusies | 9 |
| 1. Inleiding | 13 |
| 1.1 Aanleiding en context | |
| 1.2 Complexiteit en onzekerheid | |
| 1.3 Afbakening | |
| 1.4 Werkwijze | |
| 1.5 Leeswijzer | |
| 2. Kwetsbaarheid, risico's en kansen anno 2014 | 17 |
| 2.1 Stimuli, trends en extremen | |
| 2.2 Kwetsbaarheid en weerbaarheid van de natuur | |
| 2.3 Regionale verschillen en milieucondities | |
| 2.4 Kwetsbaarheid van de maatschappij | |
| 3. Sociaaleconomische en klimatologische ontwikkelingen tot 2050 | 39 |
| 3.1 Ontwikkelingen in de sector natuur | |
| 3.2 Klimaatscenario's en sociaaleconomische ontwikkeling | |
| 3.3 Waarin verschillen voor de natuur de scenario's tot 2050 | |
| 3.4 Worst case scenario's | |
| 4. Kansen en handelingsperspectief | 47 |
| 4.1 Inleiding | |
| 4.2 Maatschappelijke respons als bedreiging en kans | |
| 4.3 Aanknopingspunten in beleid en uitvoeringspraktijk | |
| 4.4 Kansen op het raakvlak met andere thema's | |
| 4.5 Verantwoordelijkheden | |
| 5. Indicatoren effecten en adaptief vermogen | 57 |
| 5.1 Inleiding | |
| 5.2 Voorbeeld: indicatoren voor de Waddenzee | |
| 6. Kennislacunes | 59 |
| Bijlagen | 61 |
| Addendum: Biologische effecten van klimaatverandering. | 63 |

Summary and conclusions

In 2016 the Ministry of Infrastructure and the Environment will present a National Adaptation Strategy. This will indicate how the Netherlands can best prepare itself for the effects of climate change. Themes covered will include health, fisheries, agriculture and horticulture, transport and infrastructure, energy, ICT and nature.

The adaptation strategy is prepared by the Netherlands Environmental Assessment Agency, in cooperation with Knowledge for Climate and the Royal Netherlands Meteorological Institute. External experts were asked to map out the effects of climate change for the themes mentioned above. In this report Strooming Ltd and Wageningen University, at the request of Knowledge for Climate, present the most important risks, opportunities and vulnerabilities for nature.

Approach

Extensive research was done on recent scientific literature dealing with the relationship between nature and climate change. In an early stage a brainstorm session was organised during which experts of Strooming Ltd, Wageningen University and Knowledge for Climate shared their knowledge. Also experts of the Netherlands Environmental Assessment Agency and the Royal Netherlands Meteorological Institute brought in expertise and during a stakeholder meeting an additional number of organisations and experts reflected on the subject (see Annex 1). During the process information exchange took place with the leaders of studies on the other themes in order to facilitate the integration of the various studies in one National Adaptation Strategy.

Relationship between climate change and nature

Nature responds to climate change and adapts itself to it. Adaptation can take place

- phenotypic (= using of the existing adaptation capacity);
- genetically (=enhancing the existing adaptation capacity by changes in the genetic material of an individual or changes in the genetic composition of a population);
- through migration (is changes in the distribution);
- through substitution (= substitution of one species or type of nature by another species or type of nature that is better adapted to the new situation).

Another element of the relationship between climate change and nature is that nature (including ecosystem services) can be used to buffer some of the impacts climate change exerts on society and nature itself.

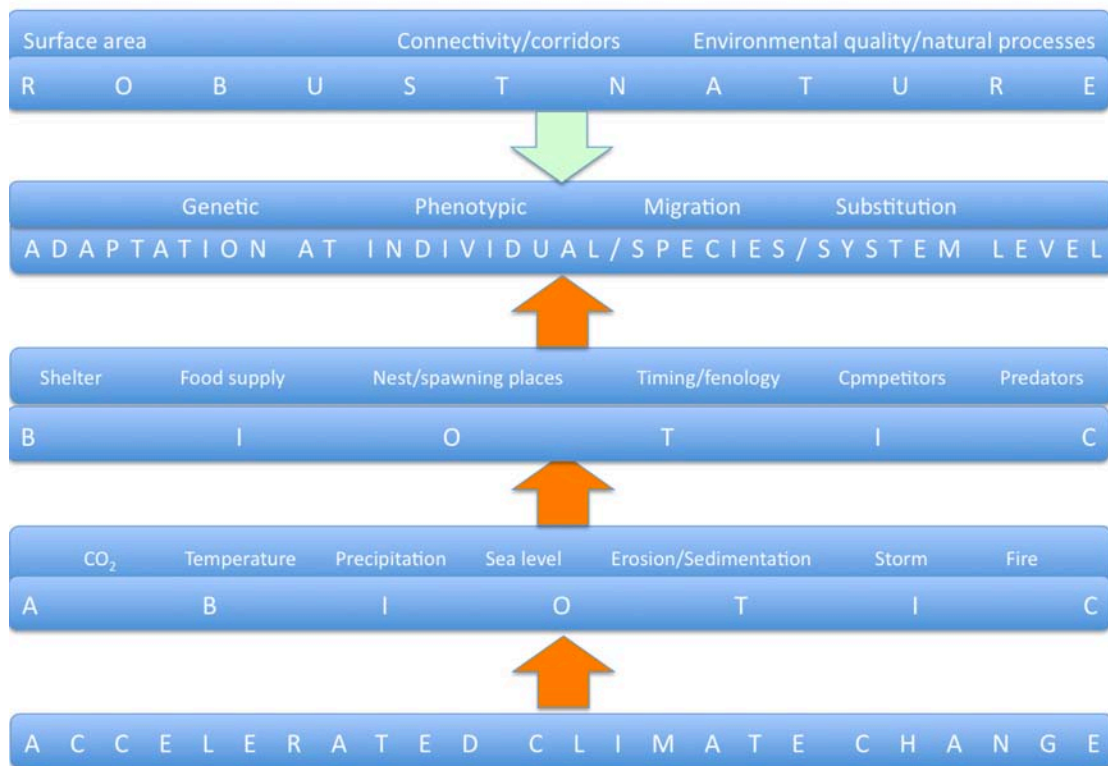
The effects of climate change on nature as well as the opportunities to use nature to buffer the impacts of climate change differ per region. In this report 5 regions are distinguished and for each of these an outline of threats and opportunities is presented: 1) North Sea, 2) Coastline including mudflats, dunes and estuaries, 3) Rivers, 4) Lower part of the Netherlands 5) Higher parts of the Netherlands.

The core of the problem

Nature has different mechanisms to adapt itself to climate change. Nature's adaptive capacity is highest if the following conditions are met:

1. sufficient surface area of habitats;
2. good connections (corridors) between areas or habitats;
3. good environmental quality in areas and corridors.

The problem is that each of these conditions is under pressure in the Netherlands. The most important part of a climate adaptation strategy for nature is therefore to ensure that these three basic conditions are met.



The impact of climate change on nature (orange arrows) and the possibilities to exert positive influence through an adaptation strategy (green arrow).

The importance of an adequate adaptation strategy

Developing and adopting an effective adaptation strategy for nature is essential. Nature has an important intrinsic value (also recognised in the new Netherlands nature conservation law) and in addition supplies a wide array of ecosystem services on which our society and economy depend. Examples are the positive impact of nature on health, supply of fish and shellfish, supply of retention or discharge capacity of precipitation and peak floods, space for recreation and much more. When nature is unable to cope with climate change these ecosystem services will (partly) collapse. As a consequence society will not be able to cope with climate change or will only be able to do so against enormous costs. This also has an international dimension: when areas like the Wadden Sea or the Estuaries in the Southwest lose their function as the gateway for migratory fish, this will be felt up and until Switzerland and when their function as feeding area for migratory birds collapses this will have an impact from Siberia all to Africa.

The urgency of an adequate adaptation strategy

An adaptation strategy for nature is urgently needed because climate change is happening already and probably there are tipping points at which nature and the ecosystem services it provides will collapse. The moment at which these tipping points are reached cannot be predicted.

A solution to the problem is also urgently needed because nature – in addition to the basic conditions surface area, connections and environmental quality – needs time to adapt itself to changes. Therefore it is crucial to fulfil the basic conditions as soon as possible.

Also from a political and policy perspective a adaptation strategy is urgently needed: currently a great number of programmes are prepared (such as the Delta programme), elaborated (such as the National nature vision) or under execution (such as the dike reinforcement programme). Depending on how the programmes are developed and executed, each of them can either have a negative or positive impact on the basis conditions mentioned above.

Priorities

The following measures should be taken as a priority:

- *Implement the ambitions of current nature conservation policy*
It is crucial that the development of the National Nature Network is completed within the agreed timeframe (before 2022).
- *Ensure, both in nature conservation policy and other relevant fields, that basis conditions for nature to cope with climate change are met: surface area, connections and environmental quality.*
Accept that ranges of species are dynamic, especially when the climate changes. Do not strive for specific, fixed targets on the level of species or habitat types. When elaborating the National Nature Vision and the EU conservation policies develop goals and indicators in such a way that natural dynamics (= adaptation of nature to changing circumstances) is enhanced instead of blocked (the latter sometimes being the case in the current situation).
- *Work across sectors*
Ensure that these goals (see above) are incorporated in all policies and programmes with spatial impacts, both on a regional, national and international level. Ensure that these policies and programmes, instead of accepting a no-net-loss approach, generate a positive contribution to surface area, connections and environmental quality. With regard to environmental quality special attention should be given to hydrology and decreasing emissions of NH₄, NO_x, and pesticides.
- *Use nature to buffer the effects of climate change on society at large*
The development of multi-functional natural areas (climate buffers) will increase the level at which nature provides ecosystem services we depend on – ecosystem services which we will increasingly need because of climate change (e.g. discharge of peak floods and water retention). Do not solely work in a defensive manner (minimise the effects of climate change on nature itself) but act pro-actively, lead by the fact that nature often provides a solution for the (unwanted) effects of climate change on society as a whole.

Samenvatting en conclusies

In 2016 zal het Ministerie van Infrastructuur en Milieu de National Adaptatie Strategie presenteren. Daarin wordt voor verschillende thema's aangegeven hoe Nederland zich het beste kan voorbereiden op de gevolgen van klimaatverandering. Het gaat om de thema's gezondheid, visserij, land- en tuinbouw, transport en infrastructuur, energie, ICT en natuur.

De adaptatiestrategie wordt voorbereid door het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), in samenwerking met Kennis voor Klimaat (KvK) en het KNMI. Aan externe deskundigen is gevraagd de gevolgen van klimaatverandering voor de hierboven genoemde thema's uit te werken. In deze rapportage brengen Strooming en Wageningen Universiteit, in opdracht van Kennis voor Klimaat, de belangrijkste risico's, kansen en kwetsbaarheden rond het thema natuur samen.

Werkwijze

Er is uitgebreid onderzoek gedaan naar wat er in recente wetenschappelijke literatuur is gepubliceerd over de relatie tussen natuur en klimaatverandering. Verder is een brainstorm gehouden, kennis ingebracht door PBL, KvK en KNMI en een bijeenkomst gehouden met deskundigen en belanghebbenden (zie bijlage 1). Tijdens het proces was er regelmatig afstemming met de overige thema's om samenvoeging in één adaptatiestrategie te vergemakkelijken.

Voor dit rapport wordt onder 'natuur' verstaan: *“alles wat zichzelf ordent en handhaaft, al of niet beïnvloed door menselijk handelen, maar niet volgens menselijke doelstellingen”*. Daarmee is natuur dus niet beperkt tot natuurgebieden, maar ook te vinden in cultuurlandschappen en steden.

Relaties klimaatverandering en natuur

Natuur reageert op klimaatverandering en past zich aan. Die aanpassing gebeurt fenotypisch (= gebruik maken van het bestaande aanpassingsvermogen), genetisch (= vergroten bestaande aanpassingsvermogen door veranderingen in het genetisch materiaal van een individu of in de genetische samenstelling van een populatie), via migratie (= verschuiven verspreidingsgebied) en door substitutie (= vervanging van een soort of type natuur door een soort of natuurtipe dat beter is aangepast).

Een ander element van de relatie tussen klimaatverandering en natuur is dat de natuur (incl. ecosysteemdiensten) kan worden ingezet om een aantal effecten van klimaatverandering op de maatschappij (en op de natuur zelf) te bufferen.

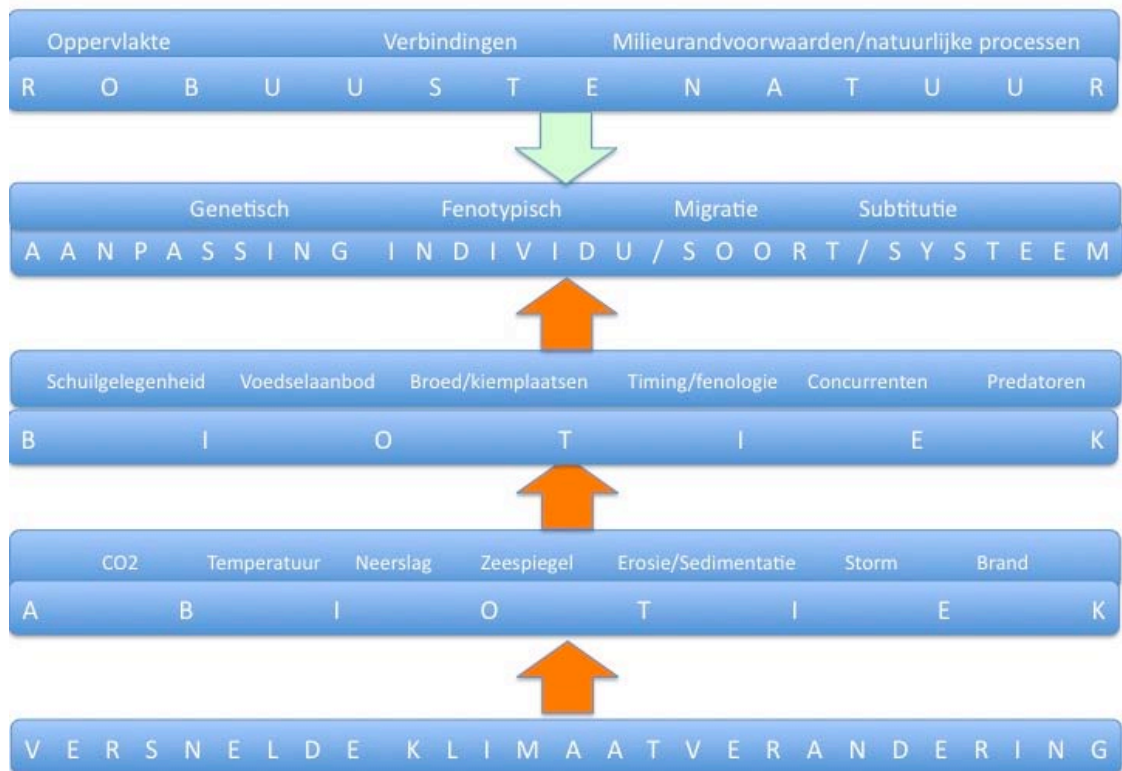
Zowel de effecten op de natuur als de mogelijkheden om natuur te gebruiken om effecten te bufferen verschillen per regio. In dit rapport worden de volgende vijf regio's onderscheiden en voor elk daarvan worden bedreigingen en kansen op hoofdlijnen uiteengezet: 1) Noordzee, 2) Kust, wadden, duinen en estuaria, 3) Rivierengebied, 4) Laag Nederland en 5) Hoog Nederland.

Het kernprobleem

De natuur beschikt over verschillende mechanismen om zich aan te passen aan klimaatverandering. Het adaptief vermogen van de natuur is groter:

1. in gebieden met voldoende oppervlakte;
2. bij voldoende verbindingen tussen gebieden;
3. bij een goede milieukwaliteit in die gebieden en verbindingzones.

Het probleem is dat deze 3 zaken in ons land onder druk staan. Het belangrijkste doel van een adaptatiestrategie moet dan ook zijn om deze randvoorwaarden te realiseren.



Schematische weergave van de wijze waarop klimaatverandering inwerkt op de natuur (oranje pijlen) en de mogelijkheden die er zijn om via een adaptatiestrategie positieve invloed uit te oefenen (groene pijl).

Het belang van een goede adaptatiestrategie

Het is essentieel dat er een effectieve adaptatiestrategie voor natuur komt. Natuur heeft een belangrijke intrinsieke waarde (zie nieuwe natuurbeschermingswet) en levert daarnaast talloze ecosystemendiensten die in economisch en in algemeen maatschappelijk opzicht onmisbaar zijn. Voorbeelden zijn de invloed van natuur op gezondheid, bestuiving van gewassen, levering van schone lucht en schoon water, levering van vis en schelpdieren, levering van buffer- of afvoercapaciteit van neerslag en hoogwaters, recreatieruimte en nog vele meer. Als de natuur de klimaatverandering niet kan bijbenen zullen deze ecosystemendiensten (deels) uitvallen en zal ook de maatschappij de klimaatverandering niet of slechts tegen zeer hoge kosten kunnen bijbenen. Dit heeft ook een internationale dimensie: wanneer gebieden zoals de Waddenzee of Zuidwestelijke Delta hun functie als poort voor trekvis verliezen zal dit tot in Zwitserland worden gevoeld en wanneer de functie als foerageergebied voor trekvogels wegvalt zal dat van Siberië tot Afrika merkbaar zijn.

De urgentie van een goede adaptatiestrategie

Een adaptatiestrategie voor de natuur is urgent omdat klimaatverandering zich op dit moment al voltrekt. Bovendien zijn er vermoedelijk 'tipping points' waarbij de natuur en de diensten die zij levert instorten. Het moment waarop deze 'tipping points' optreden is niet goed te voorspellen.

Een tweede reden die oplossing van het probleem urgent maakt is dat de natuur - naast de randvoorwaarden oppervlakte, verbindingen en milieukwaliteit - vooral tijd nodig heeft om zich aan te passen. Het is dus zaak om zo snel mogelijk die randvoorwaarden op orde te brengen.

Naast deze wetenschappelijk gemotiveerde urgentie bestaat er een politiek/bestuurlijk urgentie: er worden op dit moment veel programma's voorbereid (waaronder het Deltaprogramma), uitgewerkt (waaronder de Rijksnatuurvisie) en uitgevoerd (waaronder het Hoogwaterbeschermingsprogramma) die óf afbreuk kunnen gaan doen óf juist kunnen bijdragen aan de genoemde randvoorwaarden.

Prioriteiten

De volgende maatregelen hebben prioriteit:

- *Maak de ambitie van het huidige natuurbeleid waar.*
Het is cruciaal dat de ontwikkeling van het Nationaal Natuur Netwerk binnen de afgesproken tijd (voor 2022) wordt afgerond.
- *Stuur in natuurbeleid (maar ook in overig relevant beleid) primair op de randvoorwaarden, oppervlakte, verbindingen en milieukwaliteit.*
Accepteer dat de arealen van wilde soorten planten en dieren dynamisch zijn, zeker wanneer het klimaat verandert. Streef geen zeer specifieke, gefixeerde doelen na op het gebied van soorten en natuurtypen. Kies in plaats daarvan bij de uitwerking van het Nederlandse (Rijksnatuurvisie) en Europese natuurbeleid de subdoelen en indicatoren zodanig dat ze natuurlijke dynamiek (= aanpassing van natuur aan veranderende omstandigheden) bevorderen in plaats van (zoals nu soms gebeurt) blokkeren.
- *Werk cross-sectoraal.*
Zorg dat deze doelen in alle ruimtelijke beleidsterreinen en uitvoeringsprogramma's, regionaal, nationaal en internationaal, worden verankerd. Bewaak dat steeds een positieve bijdrage wordt geleverd (dus niet slechts de no-net loss benadering) aan vergroting van areaal, verbindingen en milieucondities. Wat betreft het laatste gaat het met prioriteit om het op orde brengen van de hydrologie en het verder terugdringen van de emissies van ammoniak, stikstofoxiden en bestrijdingsmiddelen.
- *Zet natuur in om de maatschappelijke effecten van klimaatverandering te bufferen.*
Door verdere ontwikkeling van multifunctionele natuurgebieden (klimaatbuffers) kunnen ecosysteemdiensten waarvan we afhankelijk zijn - en waaraan we in veel gevallen door klimaatverandering een groeiende behoefte zullen krijgen (afvoer hoogwater, vasthouden water etc.) - worden versterkt. Werk dus niet alleen defensief (minimaliseren effecten klimaatverandering op de natuur zelf) maar vooral ook pro-actief vanuit de gedachte dat natuur vaak een oplossing biedt voor de (maatschappelijk ongewenste) effecten van klimaatverandering.

1. Inleiding

1.1 Aanleiding en context

Deze rapportage is opgesteld als bouwsteen voor de Nationale Adaptatiestrategie (NAS) die in 2016 zal verschijnen. Daarin wordt vastgelegd met welk beleid en welke acties Nederland zich het beste kan wapenen tegen de gevolgen van klimaatverandering. Belangrijke klimaatrisico's voor Nederland zijn al belegd in het Deltaprogramma met de focus op waterveiligheid, zoetwatervoorziening en het klimaatbestendig maken van steden. Niettemin is een breder inzicht nodig in de klimaatrisico's in Nederland om te kijken in hoeverre deze moeten worden aangepakt in de nieuwe Adaptatiestrategie. Daarom heeft het ministerie van Infrastructuur en Milieu het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) opdracht gegeven om – in samenwerking met het programma Kennis voor Klimaat (KvK) en het KNMI - risico's, kansen en kwetsbaarheden voor klimaatverandering in beeld te brengen voor de sectoren gezondheid, visserij, land- en tuinbouw, transport en infrastructuur, energie, ICT en natuur. Kennis voor Klimaat heeft opdracht gegeven aan Strooming en Wageningen Universiteit om een actualisatie van risicobeeld en verkenning van kansen uit te voeren op het onderdeel natuur.

In Nederland bestaat nog geen klimaatadaptatiebeleid voor de natuur. Het dichtst bij komt de aanbeveling van de Europese Commissie om in de uitwerking van de Kaderrichtlijn Water rekening te houden met klimaatverandering. De Nationale Adaptatiestrategie biedt de gelegenheid om klimaatadaptatiebeleid voor de natuur in ons land structurele aandacht te geven. Dat is temeer van belang omdat veel Nederlandse natuur van internationale betekenis is. Dat geldt voor de bekende gebieden als de Waddenzee, de Zuidwestelijke Delta en het rivierengebied en fenomenen als vogel- en vistrek die daar spelen, maar ook voor minder bekende gebieden en habitats. Zo heeft Nederland 51 van de circa 200 Natura 2000 habitats binnen haar landsgrenzen en meer dan de helft daarvan is in Nederland meer dan gemiddeld vertegenwoordigd¹.

1.2 Complexiteit, onzekerheden en zekerheden

Klimaatverandering heeft veel gezichten en voor de interactie tussen klimaatverandering en natuur geldt dat in het bijzonder. Veranderingen in de natuur hebben hun doorwerking in de maatschappij en andersom. Voeg daarbij dat er naast zekerheden ook veel onzekerheden zijn – dan is duidelijk dat het onderwerp van deze rapportage complex is. Dat neemt niet weg dat veel bekend en zeker is. Eén van die zekerheden is dat de natuur klimaatverandering niet slechts ondergaat maar er ook op reageert. Van zo'n respons is nu al sprake. In het kader van een adaptatiestrategie is het belangrijk om de wijze waarop de natuur op klimaatverandering reageert goed te bestuderen en er zoveel mogelijk ruimte aan te geven. In deze rapportage besteden we er daarom relatief veel aandacht aan.

1.3 Afbakening

Over de juiste definitie van het begrip natuur bestaan verschillende opvattingen. Een veel gebruikte definitie die we ook in dit rapport hanteren is *“alles wat zichzelf ordent en handhaaft, al of niet beïnvloed door menselijk handelen, maar niet volgens menselijke doelstellingen”*. Deze definitie gaat er van uit dat natuur er niet alleen is in aangewezen natuurgebieden: ook in cultuurlandschappen en steden zijn er plekken te vinden waar sprake is van zelfordening.

Omdat klimaatverandering de natuur in de volle breedte raakt is het onmogelijk om een volledige analyse op te stellen, zeker niet binnen de tijd en financiële middelen die beschikbaar

¹ Vonk, M, C.C. Vos en D.C.J. van der Hoek (2010). Adaptatiestrategie voor een klimaatbestendige natuur.

waren. Desondanks menen wij dat we de verschijnselen, risico's en kansen die het meest relevant zijn voor een adaptatiestrategie in deze rapportage een plek hebben kunnen geven. Anders gezegd: er kan ongetwijfeld nog veel worden toegevoegd maar dat zal naar onze verwachting geen wezenlijke veranderingen teweegbrengen in de hoofdlijn van onze analyse en de daaruit getrokken conclusies.

In deze rapportage worden de volgende relaties verkend:

- *Invloed van klimaatverandering op de natuur.* Hoe ziet die invloed er uit, kan de natuur die verandering naar verwachting opvangen en zo ja, hoe speelt ze dat klaar? Dat laatste biedt namelijk aangrijpingspunten voor een adaptatiestrategie.
- *Doorwerking in de maatschappij.* Hoe ziet die doorwerking er uit (calamiteiten, uitval ecosysteemdiensten etc.)? Dat geeft namelijk inzicht in de urgentie en noodzaak van een adaptatiestrategie voor de natuur en laat zien dat daarmee een breed maatschappelijk belang is gediend. Het gaat niet "slechts" om het behoud van flora en fauna.
- *Actuele en potentiële anticipatie.* Onze samenleving anticipeert nu al op de actuele en verwachte klimaatverandering, zowel met beleid (zoals Deltaprogramma) als in de uitvoeringspraktijk (zoals Ruimte voor de Rivier). Inzicht in de wijze waarop we (kunnen) anticiperen geeft inzicht in de kansen om de natuur en ecosysteemdiensten bij een veranderend klimaat in tact te houden en zelfs te versterken.

1.4 Werkwijze

Bij het opstellen van deze rapportage is de volgende aanpak gevolgd:

- Afstemming met andere thema's, KvK, KNMI en PBL over de te hanteren terminologie en opzet. Dit resulteerde in een "Analysekader" (beschikbaar 17 februari 2014).
- Brainstorm van experts van Stroming, Wageningen Universiteit en Kennis voor Klimaat. Dit leverde een groslijst van bedreigingen en kansen en ideeën t.a.v. de te hanteren monitoringsystematiek.
- Een literatuuronderzoek gericht op de biologische effecten van klimaatverandering
- Kennisnemen van en kennisdelen met de trekkers van de rapportages m.b.t. gezondheid, visserij, land- en tuinbouw, transport en infrastructuur, energie, ICT om te leren van aanpakken die zij volgen en raakvlakken in beeld te krijgen.
- Gesprek met KNMI om te verkennen of in aanvulling op de KNMI-scenario's zoals deze verwerkt zijn in de Deltascenario's, nog wezenlijke andere informatie beschikbaar is (de KNMI scenario's 2006 worden momenteel geactualiseerd) of beschikbaar moet/kan komen.
- Studie van klimaatadaptatiewerk dat in het recente verleden is verricht door Natuurmonumenten, de Coalitie Natuurlijke Klimaatbuffers, PBL en in de UK.
- Integreren van het bovenstaande in een conceptrapportage.
- Peer review van de concept rapportage door KvK, PBL en KNMI.
- Peer review van de concept rapportage tijdens een workshop met trekkers van andere thema's en deskundigen vanuit het opdrachtgevend gezelschap.
- Voorleggen concept rapportage aan stakeholders, verwerken van hun inbreng en opleveren eindrapport.

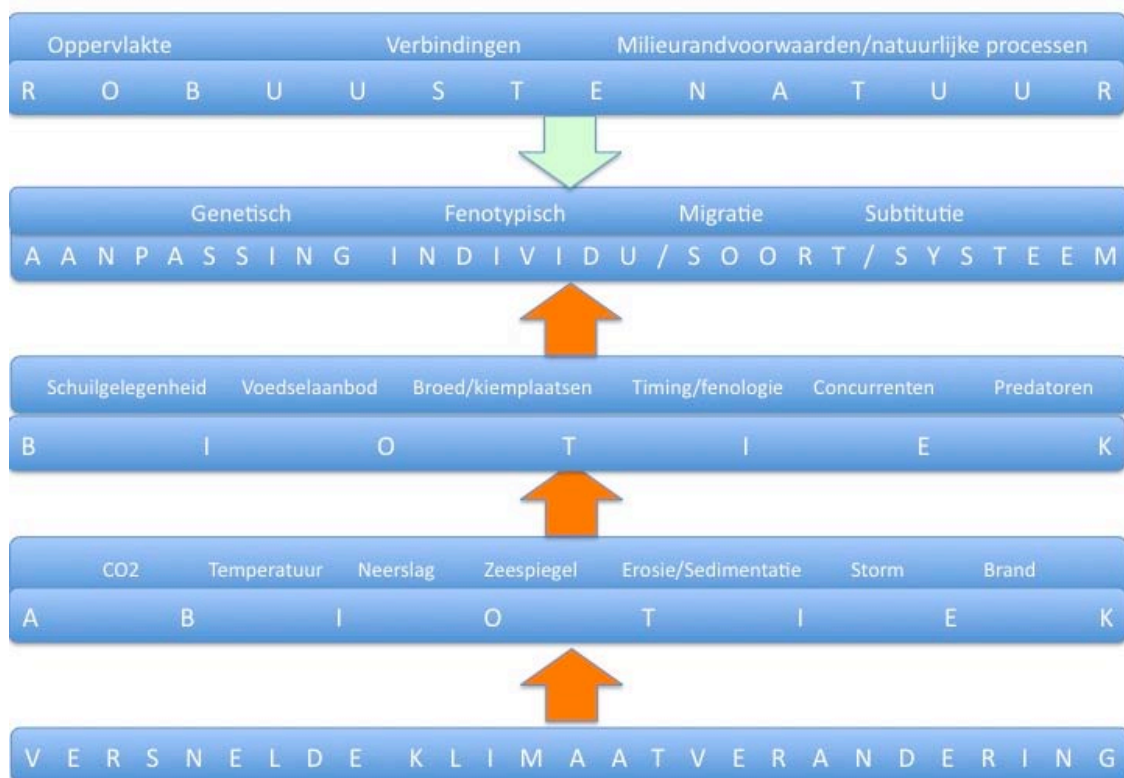
1.5 Leeswijzer

Omwillen van de vergelijkbaarheid met de rapportages van de andere thema's is een voor dit rapport (februari 2014) een vooraf vastgestelde indeling op hoofdlijnen gevolgd. Deze is opgesteld na een gezamenlijke startbijeekoms t en ziet er als volgt uit:

- Analyse van kwetsbaarheid, risico's en kansen in het huidige systeem (hoofdstuk 2). In dit hoofdstuk is een literatuuronderzoek opgenomen dat zich richt op de vraag via welke mechanismen de natuur zich aanpast aan klimaatverandering. Uit deze analyse komen enkele algemene uitgangspunten voor een klimaatadaptatiestrategie voort met relevantie voor heel Nederland. Daarna wordt voor 5 regio's bekeken welke specifieke bedreigingen en kansen in zo'n regio spelen.

- Veranderingen op basis van (1) sociaaleconomische ontwikkelingen en dynamiek binnen de sector “natuur” (tot ca 2030) en (2) klimaatverandering (tot ca 2050) (hoofdstuk 3).
- Aangrijpingspunten voor het verminderen van kwetsbaarheid en het benutten van kansen (hoofdstuk 4).
- Indicatoren voor potentiële effecten en adaptief vermogen, mede ten behoeve van monitoring en evaluatie (hoofdstuk 5).
- Zijn er essentiële kennislacunes die gedicht moeten worden om tot een goede klimaatadaptatiestrategie voor de natuur te komen en zo ja welke? (hoofdstuk 6).
Omwille van de vergelijkbaarheid wordt in elk van de studies ook een aantal vaste definities gehanteerd. Deze zijn te vinden in bijlage 2.

Bij lezing van het rapport is het verder nuttig om het volgende schema in gedachten te houden. Het is een schematische weergave van de wijze waarop klimaatverandering inwerkt op de natuur en het geeft aan welke mogelijkheden er zijn om via een adaptatiestrategie positieve invloed uit te oefenen. Het toont dus in één figuur de verbinding tussen probleem en oplossing en is in zekere zin een “inhoudelijke leeswijzer” die in dit rapport wordt opgebouwd en toegelicht.



Figuur 1.5. Schematische weergave van de impact van klimaatverandering op de natuur én de mogelijkheid om daar positieve invloed op uit te oefenen. Van onder naar boven is met de oranje pijlen schematisch weergegeven hoe klimaatverandering inwerkt op de natuur. Inzicht in deze relaties illustreert de aard en breedte van het probleem. Bovenin de figuur is schematisch weergegeven, met een groene pijl, op welke wijze een adaptatiestrategie kan helpen om de effecten op de natuur te beperken of zelfs in positieve zin om te buigen: voldoende oppervlakte en verbindingen zijn de belangrijkste voorwaarden voor de natuur om de eigen veerkracht (genetische adaptatie, fenotypische adaptatie en migratie) op soort- en populatieniveau te ontplooien. Daarnaast is van belang dat de milieucondities – en dan met name de geomorfologische en ecologische processen die de natuur in staat stellen op systeemniveau te reageren – gunstig zijn.

2. Kwetsbaarheid, risico's en kansen anno 2014

In dit hoofdstuk wordt in 2.1 verkend aan welke klimaatstimuli de natuur blootstaat. In 2.2. wordt op grond van literatuuronderzoek in beeld gebracht hoe de natuur op klimaatverandering reageert. Daaruit wordt een aantal algemene uitgangspunten voor een klimaatadaptatiestrategie afgeleid die voor heel Nederland geldig zijn. In aanvulling wordt in 2.3. voor 5 Nederlandse regio's verkend wat specifiek voor die regio belangrijke kansen en bedreigingen voor de natuur zijn. In 2.4. wordt vervolgens globaal besproken op welke wijze de maatschappij als geheel geraakt wordt door de veranderingen die klimaatverandering teweeg brengt in de natuur.

2.1 Stimuli, trends en extremen

Klimaatverandering speelt zich buiten af en daar is ook de natuur; ze staat – meestal ook letterlijk – vol in de wind. Waar klimaatveranderingen zich voordoen (zoals een hogere temperatuur, meer droogte, heviger neerslag, hogere zeespiegel, heviger rukwinden, meer overstromingen en laagwater) hebben deze veranderingen ook invloed op de natuur.

De Nederlandse natuur heeft reeds te maken met temperatuurstijging (in de Bilt jaargemiddeld 1,8 °C hoger dan in 1901), een hogere zeespiegel (18 cm gestegen in de afgelopen eeuw), en meer neerslag (gemiddeld over de seizoenen + 18% in de afgelopen eeuw). Ook veranderingen in extremen zijn al merkbaar: ten opzichte van 1900 zijn er 3 keer zo veel relatief zeer warme dagen (voor de tijd van het jaar), het aantal relatief koude dagen liep tot de helft terug².

Het valt niet te zeggen of de natuur meer moeite heeft met temperatuurstijging dan met bijv. zeespiegelstijging of langer aanhoudende droogte. Bovendien zijn veel van deze stimuli onderling verbonden – een hogere temperatuur leidt tot én een hogere zeespiegel (uitzetting zeewater en afsmelting ijskappen) én andere rivierafvoeren én andere neerslagpatronen. De huidige (hogere) temperatuur werd, om te beginnen, veroorzaakt door een hoger CO₂-gehalte en ook daarop reageert de natuur. Tenslotte verandert de natuur mee (adaptief vermogen) en zijn er terugkoppelingsmechanismen.

Er is op dit abstractieniveau één gemeenschappelijke noemer te ontdekken: voor de natuur is tijd doorslaggevend; vaak heeft natuur veel tijd nodig om zich aan te passen of tijd om zich te herstellen van een extreme situatie. De factor tijd is via adaptiemaatregelen echter niet beïnvloedbaar. Alleen met preventieve actie, de vermindering van uitstoot van broeikasgassen, is de snelheid en de heftigheid waarmee klimaatverandering zich voltrekt tot op zekere hoogte te beïnvloeden. Daarmee is het belang van zo'n preventieve strategie nog eens onderstreept, maar het maakt geen onderdeel uit van deze rapportage.

Box 1 - De werking van extremen en hersteltijd: ijsvogel populatie

De populatie ijsvogels in Nederland kan na een strenge winter inzakken van honderden naar enkele tientallen broedparen. Volgt daarop weer een normale winter dan veert de populatie snel op naar het oorspronkelijke niveau. Volgt in plaats daarvan echter een tweede strenge winter, dan kan de soort naar een kritische grens zakken.

In de UK is een overzicht gemaakt van de verschillende manieren waarop klimaatverandering invloed ("impact") kan hebben op de natuurlijke omgeving³. Onderstaande tabel is daaruit afkomstig. Hij is ongetwijfeld niet compleet maar brengt verschillende facetten bij elkaar en geeft ook een goede indruk voor de Nederlandse situatie. In de volgende paragrafen gaan we op diverse facetten nader in.

² KNMI. 2014. Klimaatscenario's voor Nederland. Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie.

³ Wallingford, H.R. 2012. The UK Climate Change Risk Assessment 2012.

| |
|--|
| Directe impacts |
| Veranderingen in de “klimaatruimte” ⁴ met veranderingen in verspreiding(sgebieden) van soorten (“shifts”) als gevolg. |
| Verlies van fysieke ruimte (leefgebied) in kust- of oeverzones door zeespiegelstijging en kusterosie. |
| Veranderingen in de fenologie (de seizoensgebonden timing van gebeurtenissen in de levenscyclus) |
| Fenologische “mismatches”. Bij voorbeeld het niet meer goed samenvallen van verschijningsdata van soorten die van elkaar afhankelijk zijn. |
| Het arriveren van niet-inheemse soorten. |
| Veranderingen in de soortensamenstelling in levensgemeenschappen |
| Veranderingen in de concurrentie tussen soorten |
| Veranderingen in ecosysteemdiensten en processen, zoals veranderingen in de waterkwaliteit en de frequentie en/of hevigheid van overstromingen, droogtes, en storm. |
| Indirecte impacts |
| Socio-economische veranderingen zoals sociale waarden (meer behoefte aan buiten recreëren), werkpraktijk (bijv. siësta), beleid en gebruik hulpbronnen |
| Veranderingen in ruimtegebruik waaronder inzet andere gewassen, “klimaatbossen” ⁵ , productie of oogst van biomassa, creëren van ecologische netwerken (zoals het Nationaal Natuurnetwerk). |
| Aanpassingen van het kwantiteits- en kwaliteitsbeheer van water, zoals hogere dijken, vooroevers, hydropower. |
| Aanpassingen aan het beheer van het mariene milieu zoals inzet van hydropower en visserijbeleid |
| Aanpassingen in de ruimtelijke en stedelijke ontwikkeling met invloed op bijv. energiegebruik en meer groen in steden. |
| Meer groengebieden voor recreatie en toerisme. |
| Internationale effecten, bijv. meer of minder voedselproductie t.b.v. de export. |

Tabel 2.1. Een opsomming van de belangrijkste directe en indirecte effecten van klimaatverandering op de natuurlijke omgeving. Direct zijn effecten als ze rechtstreeks ingrijpen op soorten, habitat, biodiversiteit en ecosystemen. Indirect zijn effecten op de natuur als ze een gevolg zijn van de manier waarop de maatschappij reageert op (verwachte) klimaatverandering, bijv. met hogere dijken of meer zandsuppletie.

2.2 Kwetsbaarheid en weerbaarheid van de natuur

2.2.1 Inleiding

Onder “risico” wordt verstaan: de kans van blootstelling aan een negatieve impuls gecombineerd met de consequenties die zo’n blootstelling zou hebben. Langs een denkbeeldige rivier waarop de linkeroever een sterke dijk aanwezig is en weinig mensen wonen en op de rechteroever een zwakke dijk ligt met daarachter veel mensen, is het overstromingsrisico op de rechteroever dus hoger (want én grotere faalkans én grotere consequenties) dan op de linkeroever.

⁴ De “klimaatruimte” is het gebied waarin de klimatologische omstandigheden geschikt zijn voor een soort. Daarbij wordt geen rekening gehouden met andere factoren die voor het overleven van een soort belangrijk zijn, zoals aanbod van voedsel en water. Het werkelijke verspreidingsgebied van een soort kan dus kleiner zijn dan de “klimaatruimte”.

⁵ Dit zijn bossen die worden aangeplant om CO₂ vast te leggen.

Box 2 - Risico's, kansen, effecten en de natuur.

R(isicio) = K(ans) x E(ffect). De kans dat de natuur wordt blootgesteld aan klimaatverandering is 100%. Weliswaar kan de klimaatstimulus voor de Waddenzee een andere zijn (bijv. zeespiegelstijging) dan in het rivierengebied (veranderende rivierafvoeren) of hoge zandgronden (langer aanhoudende droogtes) maar daarvan gaat geen onderscheidend vermogen uit want blootstelling aan bijv. temperatuurstijging geldt overal en alleen al dat effect werkt op allerlei manieren door en is niet te isoleren van de vervalgeffekten.

Veranderingen in rivierafvoeren, zeespiegelstijging en neerslagpatronen zijn immers ook het gevolg van de gestegen temperatuur. Voor het differentiëren van risico's voor de natuur valt de "K" dus uit als onderscheidend criterium. Voor de E is dat ook het geval, tenzij we onderscheid maken tussen het belang van bepaalde typen natuur. De gedachte zou dan kunnen zijn dat een klimaatgerelateerde aantasting van de Waddenzee, een natuurgebied van internationale betekenis, ernstiger is (dus groter effect heeft) dan het verlies van bossen op de Veluwe die geen internationale betekenis hebben. Op daarvan zou de Waddenzee dan per definitie een groter risico lopen dan de Veluwe en is het klimatarisico dus een directe afgeleide van het belang dat wij – gegrond of ongegrond – toekennen aan bepaald typen natuur. Indien deze benadering wordt gevolgd is de uitkomst ervan dat de natuur in N2000- ; Vogelrichtlijn en Ramsargebieden in het kader van klimaatadaptatie meer aandacht verdient dan de natuur in andere gebieden.

Een andere benadering kan nog zijn dat de "K" en de "E" niet zozeer gerelateerd worden aan de effecten van klimaatverandering op de natuur maar op de vervalgeffekten die klimaatgerelateerde aantasting van de natuur kan hebben op de maatschappij. Daarvoor zou nodig zijn dat per ecosysteemdienst (productie schoon drinkwater, bestuiving, koelte in de steden etc.) in beeld wordt gebracht waar die ecosysteemdienst wordt geleverd, aan wie, hoe essentieel die is en wat de kans op uitval van zo'n dienst is. Op dergelijke vragen wordt al lange tijd een antwoord gezocht, vanaf 1970 door de Club van Rome en meer recent in TEEB (The economics of ecosystems en biodiversity) studies. Zo'n benadering valt buiten het bestek van deze rapportage maar aan raakvlakken met gezondheid, landbouw, visserij, ICT en transport besteden we in 4.4 wel kort aandacht.

Voor de natuur is deze benadering niet goed toepasbaar (zie ook de box op deze pagina), want zowel de natuur als het klimaat zijn "overall" en de kans op blootstelling is dus 100%⁶. Daarbij komt dat de consequenties van zo'n blootstelling moeilijk te bepalen zijn omdat:

- er grote verschillen in incasseringsvermogen zijn tussen individuen, soorten en ecosystemen onderling. Waarbij bovendien vaak pas duidelijk is hoe groot dat incasseringsvermogen is nadat individuen, soorten of ecosystemen aan de impuls zijn blootgesteld; voorspellen van consequenties is moeilijk. Zie 2.2.2 en 2.2.3.
- er tussen individuen, soorten en ecosystemen interacties optreden. Soms pakt die interactie negatief uit (cascade effect), soms positief (dempend effect). Zie 2.2.4.

Dit maakt duidelijk dat de natuur klimaatverandering niet slechts ondergaat: ze reageert door zich zo goed mogelijk aan te passen op het niveau van individu, populatie en systeem. Daarmee is niet gezegd dat we voor 100% kunnen vertrouwen op het adaptieve vermogen, de *adaptive of coping capacity*, van de natuur ("die redt zich wel"). Immers, hoewel de grenzen aan het adaptieve vermogen niet op voorhand te bepalen zijn, zijn ze er wel degelijk en een negatieve klimaatimpact op de natuur kan grote gevolgen hebben voor zowel de natuur zelf als voor onze maatschappij (zie 2.4).

⁶ Per regio kan wel verschillen aan welk klimaateffect de natuur wordt blootgesteld (zeespiegelstijging speelt bijv. niet in Hoog Nederland). Zie hiervoor hoofdstuk 2.3.

Een klimaatadaptatiestrategie die zich richt op de natuur is dus van groot belang. Omdat de natuur zich niet laat dwingen dient zo'n adaptatiestrategie gericht te worden op het faciliteren van de mechanismen waarmee de natuur zelf reageert op klimaatverandering:

1. individuen of soorten passen zich ter plekke aan de veranderende omstandigheden aan;
2. individuen of soorten proberen de klimatologische omstandigheden voor zichzelf constant te houden door de verschuivende klimaatzones te volgen;
3. binnen een ecosysteem vindt een verschuiving in soortensamenstelling plaats: de niche van een soort die zich niet heeft kunnen aanpassen en ter plekke is verdwenen, wordt overgenomen door een andere soort die wel is opgewassen tegen de actuele situatie ter plekke.

Hierna gaan we op elk van deze strategieën in, daarbij met name puttend uit literatuur die hierover verschenen is in de laatste 10 jaar. Voor een veelomvattender weergave daarvan en literatuurreferenties, verwijzen we naar het addendum bij dit rapport.

2.2.2 Fenologische verschuivingen en fysiologische, fenotypische en genetische aanpassingen.

Er is een overweldigende hoeveel kennis en informatie beschikbaar over fenologische verschuivingen: het verschijnsel dat bepaalde natuurlijke fenomenen eerder (bloei, eileg, bladvorming etc.) of later (bladval, in winterslaap gaan) plaatsvinden als reactie op klimaatverandering en variabiliteit⁷. In Nederland vindt de eileg bij zangvogels nu gemiddeld 9 dagen eerder plaats dan 20 jaar geleden. De vliegperiode van vlinders is in diezelfde 2 decennia met 7 dagen naar voren geschoven en de voorjaarspiek voor rupsen verschoof in 60 jaar met 12 dagen. De bloei van de hazelaar, berk en beuk schoof in de afgelopen 50 jaar met gemiddeld 8-9 dagen naar voren⁸. Ook zoogdieren reageren: de bronsttijd van herten op het Schotse eiland Rum schoof in 30 jaar tijd met 5 – 14 dagen vooruit⁹.

Het zijn fascinerende voorbeelden die illustreren dát de natuur reageert. Het geeft ook een indicatie van de spankracht die er kennelijk is. Het geeft echter niet aan wat de *maximale* spankracht is. Want voor planten en dieren is meer nodig dan een geschikt klimaat: ook het voedselaanbod, beschikbaarheid van water etc. spelen een rol. Het is bijv. goed mogelijk dat zangvogels hun broedtijd nog wel wat verder naar voren zouden kunnen schuiven maar dat dit niet plaatsvindt omdat dan een mismatch zou plaatsvinden met een van de andere milieucondities. Wat betreft dat laatste zijn vooral ook intacte natuurlijke processen van belang zowel de geomorfologische (zoals erosie en sedimentatie om bijv. zeespiegelstijging te kunnen bijhouden) als de ecologische (zoals spontane ontwikkeling, successie en migratie om de substitutie van bijv. koudeminnende door warmteminnende soorten mogelijk te maken).

Belangrijk is de vraag welk onderliggend mechanisme planten en dieren in staat stelt te reageren. In verreweg de meeste gevallen die in de literatuur zijn beschreven, blijkt sprake te zijn van een zogenaamde fenotypische aanpassing (plasticiteit). De beuk die nu ruim een week eerder bloeit dan 50 jaar geleden is in veel gevallen dezelfde die er ook die halve eeuw eerder al stond. Met één en hetzelfde genetische palet, blijkt deze boom in staat zijn bloeitijd aan te passen.

⁷ Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37-42. doi: Doi 10.1038/Nature01286

Root, T. L., Price, J. T., Hall, K. R., Schneider, S. H., Rosenzweig, C., & Pounds, J. A. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421(6918), 57-60. doi: Doi 10.1038/Nature01333

⁸ Van Vliet, A. J. H., Bron, W. A., Mulder, S., Van der Slikke, W., & Odé, B. (2013). Observed climate-induced changes in plant phenology in the Netherlands. *Regional Environmental Change*.

⁹ Moyes, K., Nussey, D. H., Clements, M. N., Guinness, F. E., Morris, A., Morris, S., . . . Clutton-Brock, T. H. (2011). Advancing breeding phenology in response to environmental change in a wild red deer population. *Global Change Biology*, 17(7), 2455-2469. doi: DOI 10.1111/j.1365-2486.2010.02382.x

Box 3 - Onverwachte effecten: lagere temperaturen en minder verdamping

De veldparelmoervlinder is een warmteminnende soort. Je zou verwachten dat hij van klimaatverandering profiteert maar dat doet hij niet. Want hogere temperaturen in combinatie met hogere CO₂ gehalten leiden tot dichtere vegetaties en daarmee tot meer schaduw en een koeler microklimaat op de grond in de graslanden waar de vlinder leeft.

Een ander voorbeeld: hogere temperaturen leiden tot een hogere potentiële verdamping. Bij klimaatverandering is die hogere temperatuur echter een gevolg van hogere CO₂-concentraties in de atmosfeer. Daarop reageren planten door de huidmondjes waarmee ze CO₂ absorberen, wat verder te sluiten: bij hogere concentraties hoeven ze minder ver open te staan om dezelfde hoeveelheid CO₂ binnen te krijgen. Die huidmondjes reguleren echter ook de verdamping, zodat een hogere CO₂ concentratie juist leidt tot minder verdamping en in veel gevallen het effect van de gestegen temperatuur compenseert¹⁰ (althans op voedselarme bodems, waar de beschikbaarheid van voedingsstoffen de limiterende factor is). Omdat in ons land een groot deel van de verdamping via de vegetatie plaatsvindt, kan hierdoor de watervraag van voedselarme natuurgebieden ten gevolge van klimaatverandering mogelijk stabiel blijven of zelfs afnemen. Nader onderzoek zal moeten uitwijzen in hoeverre dat het geval is, maar beide voorbeelden geven aan dat de effecten van klimaatverandering soms verrassend anders uitpakken dan je zou verwachten.

Onderzoek naar migratiepatronen en broedsucces van meer dan honderd Europese trekvogels toonde aan dat een groot aantal van de onderzochte soorten in de jaren '90 hun overwinteringsgebied eerder verliet dan in de voorafgaande twintig jaar. De onderzoekers concludeerden ook dat soorten die daar niet in meegingen, het in verhouding slechter deden. Het totaal aantal broedparen van die soorten nam sterker af dan die van soorten die zich wel aanpasten.

Box 4 - De grutto: slachtoffer van directe en indirecte klimaateffecten

Een snellere opwarming van de bodem heeft tot gevolg dat vegetatie eerder in het seizoen tot ontwikkeling komt – in Nederland gaat het om ongeveer 15 dagen ten opzichte van 1980. Voor een soort als de grutto heeft dat consequenties want deze heeft zijn eileg, in tegenstelling tot veel andere graslandbroeders, niet vervroegd. Daardoor is de vegetatie op het moment dat de eieren uitkomen zo dicht dat de jonge vogels daarin niet goed kunnen foerageren. In Nederland komt daar nog bij dat agrarische gronden al vroeg in het jaar worden ontwaterd (= nog snellere opwarming van de bodem) en dat boeren steeds vroeger maaien, met hoge sterfte onder jonge vogels tot gevolg. De directe gevolgen van klimaatverandering zou de grutto mogelijk nog kunnen overleven maar de combinatie van factoren dreigt hem fataal te worden.

Er kan ook sprake zijn van genetische aanpassing. Genetische aanpassing door natuurlijke selectie kan alleen plaatsvinden, wanneer binnen een populatie voldoende genetische variatie aanwezig is. Er is sprake van genetische aanpassing als door selectiedruk steeds meer individuen voorkomen die zijn aangepast aan de klimaatverandering. Van genetische aanpassing zijn in de literatuur weinig voorbeelden te vinden. Een van de weinige voorbeelden heeft betrekking op bosuilen¹¹. In Finland broeden daarvan twee varianten: een grijze en een

¹⁰ Körner, C. J., & Norby, R. (2007). CO₂ Fertilization: When, Where, How Much? In J. G. Canadell, D. E. Pataki & L. F. Pitelka (Eds.), *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Kruijt, B., Witte, J. P. M., Jacobs, C. M. J., & Kroon, T. (2008). Effects of rising atmospheric CO₂ on evapotranspiration and soil moisture: A practical approach for the Netherlands. *Journal of Hydrology*, 349(3-4), 257-267. doi: DOI 10.1016/j.jhydrot.2007.10.052

¹¹ Brommer, J. E., Ahola, K., & Karstinen, T. (2005). The colour of fitness: plumage coloration and lifetime reproductive success in the tawny owl. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 272(1566), 935-940.

Karell, P., Ahola, K., Karstinen, T., Valkama, J., & Brommer, J. E. (2011). Climate change drives microevolution in a wild bird. *Nature Communications*, 2. doi: Artn 208

bruine. De kleur van het verenkleed is erfelijk bepaald, ligt dus vast in de genen van de betreffende vogel. De grijze blijkt vooral een hoog broedsucces te hebben als er een dikke sneeuwlaag op de bodem ligt. De gemiddelde sneeuwlaagdikte nam ten gevolge van klimaatverandering af van meer dan 10 cm eind jaren 80 van de vorige eeuw naar minder dan 5 cm in 2008. In die periode steeg het aandeel van de bruine bosuilen van 15% naar 45%. De genetische samenstelling van de populatie is dus aan het veranderen en als dat in extremo zo doorgaat zal het gen dat het grijze verenkleed oplevert – en de grijze bosuil – verdwijnen.

| | | | | |
|------------------|--------------------------------|-----------------------------|---|-------------------------|
| Meer oppervlakte | Meer individuen | Grotere aantallen | Minder kans op (lokaal) uitsterven door extremen/toeval | Grotere coping capacity |
| | | Meer genetische diversiteit | Groter fenotypisch aanpassingsvermogen | Grotere coping capacity |
| | Meer variatie in microhabitats | Meer genetische diversiteit | Groter fenotypisch aanpassingsvermogen | Grotere coping capacity |

Tabel 2.2.2. De relatie tussen oppervlakte, genetische diversiteit, aanpassingsvermogen en kwetsbaarheid.

Bij een fenotypische respons verloopt de aanpassing snel, maar is hij niet blijvend; bij een genetische respons verloopt hij langzamer (want via overerving van generatie op generatie) maar is hij wel structureel. Desondanks is zowel bij fenotypische plasticiteit als bij genetische aanpassing t de aanwezige variatie in erfelijke eigenschappen van wezenlijk belang. De mate waarin aanpassing via fenotypische plasticiteit kan plaatsvinden is in veel gevallen genetisch bepaald, zodat ook de rek in de eigenschappen van soorten (zoals bloeitijdstip e.d.) onderhevig is aan natuurlijke selectie. Voor beide typen aanpassingen geldt dus dat een grote genetische variatie, de genetische diversiteit, in hoge mate verantwoordelijk is voor de *coping capacity* van de natuur en het van wezenlijk belang is die op peil te houden. Het belangrijkste vereiste daarvoor is voldoende areaal¹², waarbij in een groter areaal ook onomkeerbare effecten als het lokaal uitsterven ten gevolge van extremen minder snel optreden¹³. Dit laatste is het geval omdat er in een groter areaal én meer individuen zijn (een grotere “reservevoorraad”) én meer microhabitats. Dat laatste heeft weer als gevolg dat klimaateffecten niet overal even sterk doorwerken (verminderd kans op lokaal uitsterven) en bovendien de genetische diversiteit vergroot. Daarnaast zijn in grotere arealen de randeffecten, zoals bijv. effecten van ontwatering in de omgeving, effecten van verzilting en de influx van gewasbeschermingsmiddelen en meststoffen, geringer¹⁴. Ook dit is een relevant aspect in het licht van klimaatadaptatie omdat dergelijke effecten extra stress veroorzaken en derhalve de coping capacity van de natuur beperken. **Behoud en uitbreiding van het natuurareaal leidt tot een grotere coping capacity, omdat dit meestal zorgt voor een grotere populatie, grotere variatie in microhabitats en meer genetische variatie¹⁵.**

¹² Bennett, A.F. en D.A. Saunders. 2012. Habitat fragmentation and landscape change. In: Conservation Biology for All. Oxford University Press.

¹³ Voor onderbouwing hiervan verwijzen we o.a. naar de ecologische theorieën m.b.t. metapopulaties (o.a. die van Hanski die hiervoor in 2011 de Crafoord Prize ontving).

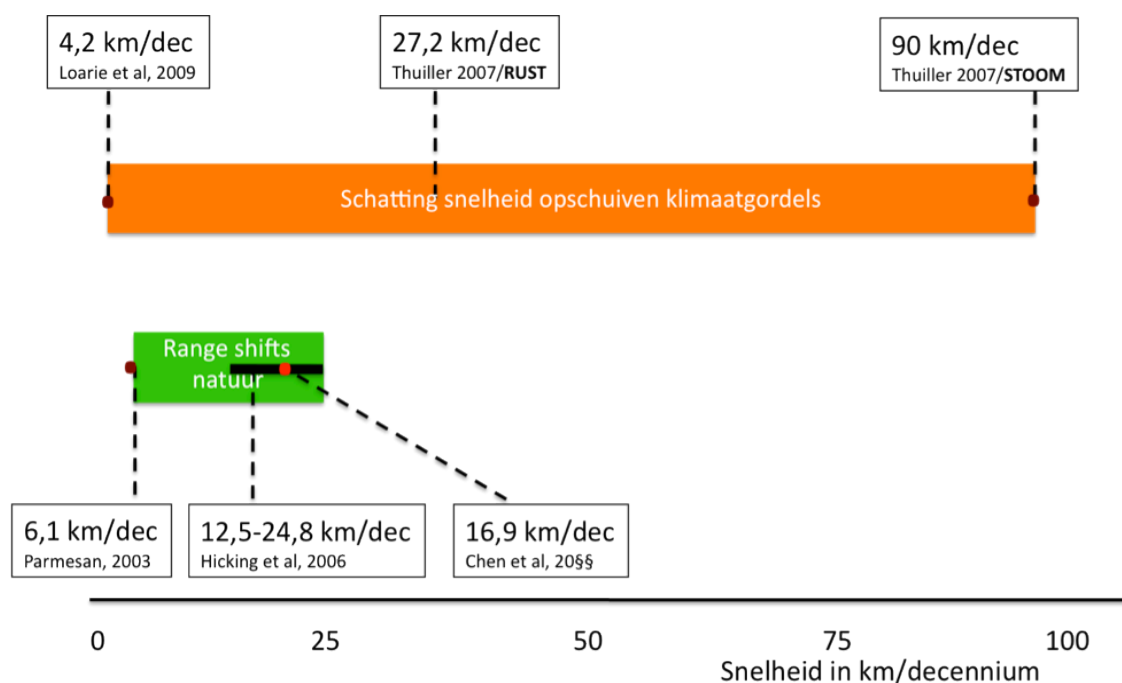
¹⁴ Witte, J.P.M. et al (2012). An ecohydrological sketch of climate change impacts on water and natural ecosystems for the Netherlands; bridging the gap between science and society. In: Hydrol. Earth Syst. Sci., 16, 3945-3957.

¹⁵ Bodegom, P.M. van et al (2013). Synthesis of ecosystem vulnerability to climate change in the Netherlands shows the need to consider environmental fluctuations in adaptation measures. In: Regional Environmental Change. Vol 14, nr. 3.

Vonk, M, C.C. Vos en D.C.J. van der Hoek (2010). Adaptatiestrategie voor een klimaatbestendige natuur.

2.2.3 Migratie

Een tweede respons van de natuur op klimaatverandering is migratie. Deze uit zich in zogenaamde "range shifts". Het verspreidingsgebied van soorten schuift mee in de richting waarin temperatuurzones opschuiven, van laag naar hoog (in ons land niet aan de orde) en van zuid naar noord. Ook op dit punt is inmiddels veel bekend (zie addendum). In Engeland, gelegen in onze klimaatzone, blijkt maar liefst 68% van de onderzochte soorten zijn range in noordelijke richting te verschuiven door klimaatverandering¹⁶. Gemiddeld over alle soorten en alle breedtegraden gebeurt dat met een snelheid van 6,1 - 16,5 km/decennium¹⁷. Er is grote variatie en migratiesnelheden kunnen oplopen tot honderden kilometers per decennium¹⁸, zoals in het geval van de eikenprocessierups.



Figuur 2.2.3. Gemiddelde, waargenomen verplaatsingsnelheden van de natuur versus geprognosticeerde snelheid waarmee klimaatgordels zich ten gevolge van temperatuursveranderingen verplaatsen. Er is een grote variatie in schattingen en ook zijn reële verschillen tussen de migratiesnelheden van soorten. Duidelijk lijkt wel dat de natuur grote moeite zal hebben de klimaatverandering via migratie bij te benen.

¹⁶ Hickling, R., Roy, D. B., Hill, J. K., Fox, R., & Thomas, C. D. (2006). The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Global Change Biology*, 12(3), 450-455. doi: DOI 10.1111/j.1365-2486.2006.01116.x

Thomas, C. D. (2010). Climate, climate change and range boundaries. *Diversity and Distributions*, 16(3), 488-495. doi: DOI 10.1111/j.1472-4642.2010.00642.x

¹⁷ Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37-42. doi: Doi 10.1038/Nature01286

Hickling, R., Roy, D. B., Hill, J. K., Fox, R., & Thomas, C. D. (2006). The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Global Change Biology*, 12(3), 450-455. doi: DOI 10.1111/j.1365-2486.2006.01116.x

Chen, I. C., Hill, J. K., Ohlemuller, R., Roy, D. B., & Thomas, C. D. (2011). Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming. *Science*, 333(6045), 1024-1026. doi: DOI 10.1126/science.1206432

¹⁸ Poyry, J., Luoto, M., Heikkinen, R. K., Kuussaari, M., & Saarinen, K. (2009). Species traits explain recent range shifts of Finnish butterflies. *Global Change Biology*, 15(3), 732-743. doi: DOI 10.1111/j.1365-2486.2008.01789.x

In de literatuur worden weinig uitspraken gedaan over de snelheid waarmee klimaatgordels opschuiven. Een modelstudie uit 2007¹⁹ geeft als vuistregel dat met iedere 1°C aan mondiale temperatuurstijging, klimaatzones met gemiddeld 160 kilometer noordwaarts opschuiven. Aangezien volgens sommige klimaatmodellen de wereldgemiddelde temperatuur op aarde voor het jaar 2100 met 4°C zal zijn gestegen, zou dat inhouden dat soorten deze eeuw zeker 600 kilometer richting polen moeten migreren om in geschikte klimaatzones te blijven. Dat komt neer op $600/10 = 60$ kilometer per decennium, aanzienlijk meer dan de gemiddeldes van 6.1 tot 19 kilometer per decennium, die tot nu toe in de natuur zijn waargenomen. De huidige modellen zijn echter op veel aannames gebaseerd, die niet altijd voldoende zijn getest. Desondanks lijkt empirisch onderzoek naar bosvegetaties in Frankrijk te bevestigen dat niet alle soorten de klimaatverandering via migratie kunnen bijbenen. Op basis van gegevens uit de periode 1965-1975 relateerden de onderzoekers omgevingstemperatuur aan soortensamenstelling. Met andere woorden: ze onderzochten welke soortenset je mag verwachten bij welke gemiddelde lokale jaartemperatuur, en vice versa. De onderzoekers stelden vervolgens vast dat vanaf het jaar 1986 de op basis van de soortensamenstelling berekende temperatuur en de werkelijk gemeten temperatuur uiteen begonnen te lopen: de verandering in soortensamenstelling liep achter op de werkelijke veranderingen in temperatuur.²⁰

Het Deltascenario Stoom, het meest extreme van de Deltascenario's, gaat zelfs uit van een stijging van de zomertemperatuur van 2,8°C in 2050 en 5,6°C in het jaar 2100 t.o.v. het klimaat rond 1990 (1976-2005). De gemiddelde wintertemperatuur stijgt dan met 2,3°C in 2050 en 4,6°C in 2100. Als de modelstudie uit 2007 correct is (zie fig 2.2.3), vertaalt zich dat op grond van de zomertemperatuurstijging van max 5,6°C naar een klimaatzone-verschuiving van bijna 90 kilometer per decennium. Op grond van de gemiddelde wintertemperatuurstijging van 4,6°C gaat het om bijna 70 kilometer per decennium. In beide gevallen gaat het om snelheden waaraan alleen de snelst migrerende soorten kunnen tippen. Onder het Deltascenario Rust (stijging gemiddelde zomertemperatuur met 1,7°C per eeuw) zou de migratiesnelheid een factor 3 lager kunnen liggen, maar ook dat is voor veel soorten meer dan ze aankunnen.

Omdat migratie, naast fenologische verschuiving, een wijdverspreide strategie is die door veel soorten zal worden aangesproken, is het van groot belang dat de natuur in staat wordt gesteld dit responsmechanisme voluit te hanteren. De beste manier om dat te waarborgen zijn migratiecorridors. Zo bleek uit een studie naar migratiepatronen van Finse vlindersoorten, dat soorten die leefden in bossen sneller migreerden dan soorten die leefden in graslanden, vermoedelijk omdat bosgebieden in Finland vrijwel aaneengesloten zijn terwijl in Finland graslanden geïsoleerd van elkaar liggen²¹. De mate van verbondenheid bepaalt dus de mate waarin soorten kunnen migreren²² en niet voor niets is het realiseren van verbindingzones al decennia een van de centrale doelen van het Nederlandse en Europese natuurbeleid

Het handhaven en uitbreiden van verbindingen tussen natuurgebieden zorgt er voor dat soorten makkelijker kunnen migreren naar andere klimaatzones.

¹⁹ Thuiller, W. (2007). Biodiversity - Climate change and the ecologist. *Nature*, 448(7153), 550-552. doi: Doi 10.1038/448550a

²⁰ Bertrand, R., Lenoir, J., Piedallu, C., Riofrio-Dillon, G., de Ruffray, P., Vidal, C., . . . Gegout, J. C. (2011). Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*, 479(7374), 517-520.

²¹ Poyry, J., Luoto, M., Heikkinen, R. K., Kuussaari, M., & Saarinen, K. (2009). Species traits explain recent range shifts of Finnish butterflies. *Global Change Biology*, 15(3), 732-743. doi: DOI 10.1111/j.1365-2486.2008.01789.x

²² Lars A. Brudvig et al. 2009. Landscape connectivity promotes plant biodiversity spillover into non-target habitats. In PNAS vol. 106. En: Alastair J. Potts et al. 2013. Testing large-scale conservation corridors designed for patterns and processes: comparative phylogeography of three tree species. In: Diversity and distributions, vol. 19.

Dit is met het ontwikkelen van het Nationaal Natuurnetwerk en de “robuuste verbindingen” reeds in gang gezet en het bovenstaande onderstreept het belang van die aanpak.

2.2.4 Systeemaanpassingen: cascades en demping

De natuur reageert ook als systeem op klimaatverandering. Cascade-effecten zijn daarbij algemeen. Onderzoek²³ aan een aantal diersoorten waarvoor een negatief effect van klimaatverandering is aangetoond – waaronder koraalvissen, dikhoornschapen, platwormen, de Noord-Amerikaanse fluithaas en checkerspot-vlinders – toonde aan dat klimaatverandering in vrijwel alle gevallen indirect inwerkte op deze soorten. Een afname in neerslag leidde bijvoorbeeld tot een gewijzigde plantengemeenschap, wat in het nadeel werkte van de dikhoornschapen. Door de hogere riviertemperaturen in Wales nam voor platwormen het aantal prooien af. Een hogere variatie in neerslag zorgde voor een mismatch tussen het larvestadium van de checkerspotvlinders en het groeiseizoen van hun gastheerplanten. Voor andere soorten gold iets vergelijkbaars. Alleen in het geval van de Amerikaanse fluithaas, vermoedden de onderzoekers dat een beperkte tolerantie voor temperatuurextremen een rol speelde bij de afname; daar was dus mogelijk sprake van een directe invloed van klimaatverandering.

Box 5. Nederlandse veengebieden en klimaatverandering

*Een hogere temperatuur leidt tot een snellere verbranding van het (gedraineerde) veen in onze laagveengebieden. Dit draagt bij aan de bodemdaling die in het lage deel van Nederland door ontwatering toch al gaande is met vergaande gevolgen voor de waterbalans van aangrenzende moerassige natuurgebieden.. In intacte hoogveengebieden treedt juist een dempend effect op: door hogere temperaturen verdampt het water uit de bovenste laag veenmos. Deze droogt daardoor uit en vormt zo een enigszins afsluitende laag die de verdroging van dieper gelegen veenmoslagen beperkt. Dat wordt nog versterkt door het albedo effect van de uitgedroogde veenmossen, die zeer licht van kleur zijn. Er zijn wel grenzen: wordt het neerslagtekort groter dan 150 mm dan gaat het hoogveen verloren. Er zijn zowel auteurs die tot de (voorlopige) slotsom komen dat hoogvenen in de Noordzee regio bedreigd worden als auteurs die er van uitgaan dat ze zich, door het oceanischer worden van het klimaat, zullen uitbreiden.*²⁴

Veranderingen in interacties kunnen ook een dempend effect hebben. Een langjarig experiment in een Arctische plantgemeenschap²⁵ liet zien dat in velden waar rendieren en muskusossen graasden, plantgemeenschappen die worden blootgesteld aan hogere temperaturen na vijf jaar weinig verschillen van de controle plots. Maar plantgemeenschappen die alleen bloot gesteld waren aan hogere temperaturen en niet aan begrazing, hadden zich wél heel anders ontwikkeld. De aanvankelijk door grassen gedomineerde vegetatie was daar veranderd in een struweel met dwergberken (*Betula nana*) en wilgen (*Salix glauca*). Natuurlijke begrazing dempte hier dus de effecten van klimaatverandering. Een vorm van gedeeltelijke demping trad op bij een experiment in Scandinavië. Daar werd aangetoond dat struikheide ten gevolge van klimaatverandering verdwijnt. Oorzaak: het heidehaantje dat de struikheide aantast, profiteert van hogere temperaturen. De plek van de struikheide werd echter ingenomen door bosbes, die niet gevoelig is voor heidehaantjes. De vegetatie en de vegetatiestructuur bleef dus in tact.

²³ Cahill, A. E., Aiello-Lammens, M. E., Fisher-Reid, M. C., Hua, X., Karanewsky, C. J., Ryu, H. Y., . . . Wiens, J. J. (2013). How does climate change cause extinction? *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 280(1750). doi: Artn 20121890

²⁴ Hölzel, N, T. Hickler en L. Kutzbach (in prep). Climate related changes in terrestrial ecosystems.

²⁵ Post, E., & Pedersen, C. (2008). Opposing plant community responses to warming with and without herbivores. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(34), 12353-12358. doi: DOI 10.1073/pnas.0802421105

Box 6. Droge duinen en natte duinvalleien

Door de hogere temperaturen kunnen droge duinvegetaties afsterven. In de plaats daarvan verschijnt dan kale grond, al dan niet met een bedekking van korstmossen. Omdat kale grond en korstmossen veel minder water verdampen dan een bodem die bedekt is met groene planten, treedt over het algemeen een grotere aanvulling op van het grondwaterniveau. Hoewel je wellicht zou verwachten dat door de hogere verdamping ten gevolge van klimaatverandering de oppervlakte van onze natte duinvalleien zou krimpen, nemen het areaal door deze terugkoppeling juist toe met wel 20-25%²⁶. In beekdalen kan een vergelijkbaar effect optreden: ook daar kan de aanvulling van het grondwater sterker worden als de vegetatie op de hoger gelegen gronden verdroogt en derhalve minder verdampt.

Een bekend voorbeeld van een respons in het abiotische systeem is dat van de Waddenzee: een hogere zeespiegel zou kunnen leiden tot het permanent onder water verdwijnen van kwelders en wadplaten (o.a. foerageergebied voor vogels), ware het niet dat wadplaten en oevers van nature meegroeien met het zeeniveau. In beginsel is dit proces via sedimentatie in staat om een hoogtegroeï van ca 1 cm per jaar te realiseren. Daarvoor is echter wel noodzakelijk dat de mechanismes die het sediment vastleggen in tact zijn. Op de begroeide kwelders is dat wel het geval maar of dat op de wadplaten ook zo is, is onzeker. Het invangmechanisme wordt daar vooral verzorgd door diatomeeën (die een kitlaag vormen die zand vasthoudt), zeegras en schelpenbanken. Deze zijn deels verdwenen (zeegras) of staan onder druk door bodemberoerende visserij.

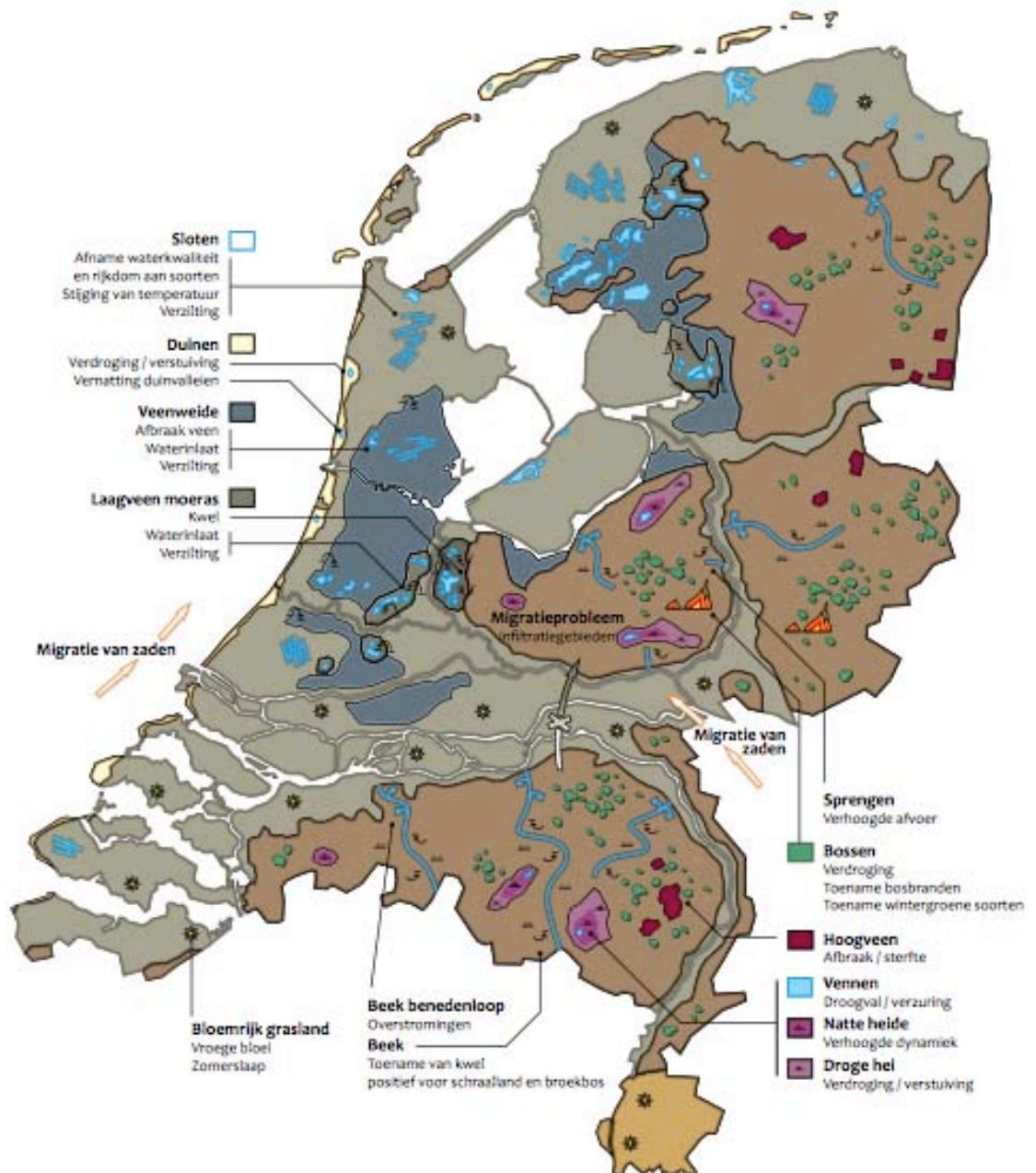
Geomorfologische processen zoals erosie en ecologische processen (“natuurlijke processen”) als successie bepalen dus in hoge mate in hoeverre de natuur zich als systeem kan aanpassen aan klimaatverandering. Als we bijv. het natuurbeheer richten op natuurdoeltypen en (ken)soorten die in bepaalde gebieden “moeten” worden gehandhaafd, blokkeren we de natuurlijke successie en verandering in soortensamenstellingen die daar ten gevolge van klimaatverandering “willen” optreden. Als we de kustlijn fixeren, blokkeren we het vermogen (en de “neiging”) van de Noordzee om landinwaarts te bewegen en daar nieuwe strand- en duinlandschappen te creëren die passen bij de hogere zeespiegel. Door zo’n blokkade lopen we het risico dat de oppervlakte van deze natuurtypen steeds kleiner wordt. **Door hiermee rekening te houden kunnen we dus de natuurlijke processen waarmee de natuur op systeemniveau reageert, zoveel mogelijk ontzien – of zelfs herstellen en benutten.** Rekening houden met en gebruikmaken van systeemdynamiek werkt ook kostenbesparend, niet alleen in het natuurbeheer maar ook in het waterbeheer (zie 4.3.3).

2.3 Regionale verschillen en milieuocondities.

2.3.1 Inleiding

In hoeverre de natuur de gelegenheid krijgt veranderingen in het klimaat op te vangen is in hoge mate afhankelijk van én de aard van de natuur én de milieuocondities. Ten aanzien van de milieuocondities is het voor de coping capacity van de natuur cruciaal dat de natuurlijke processen die de natuur in staat stellen op systeemniveau te reageren (naast migratie en fenotypische aanpassing het derde responsmechanisme) in tact zijn. Dat verschilt per regio en dat betekent ook dat de veerkracht, de risico’s en de kansen per regio verschillen. In deze analyse wordt onderscheid gemaakt tussen 5 regio’s in Nederland: 1) Noordzee, 2) Kust, wadden en estuaria, 3) Rivierengebied, 4) Laag Nederland en 5) Hoog Nederland. Op basis van klimaateffecten en maatschappelijke ontwikkelingen worden in de volgende paragrafen de potentiële aangrijpingspunten voor een klimaatadaptatiestrategie voor ieder van deze regio’s beschreven.

²⁶ Witte, J.P.M, R.P. Bartholomeus, D.G. Cirkel & P.W.T.J. Kamps (2008). Ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de kustduinen van Nederland. KWR 08.006.



Figuur 2.3.1.a. Voorlopige schetskaart van de ecolohydrologische effecten van klimaatverandering.²⁷ Duidelijk is dat alleen al door veranderingen in de hydrologie (zie ook figuur 2.3.1.b) er een grote diversiteit is in de effecten die klimaatverandering heeft in de verschillende delen van Nederland. De kaart geeft een beeld van de veranderingen onder het W+ scenario in het zichtjaar 2050.

²⁷ Witte, J.P, H. Runhaar, R. Van Ek en D. Van der Hoek (2009). Eerste landelijke schets van de ecolohydrologische effecten van een warmer en grilliger klimaat. In: H₂O.

| | | | | | | | |
|---|------|--------------------|------------|--------------|-------------|-----------------------|---------|
| Noordzee | | | | | | | |
| CO ₂ | Temp | Neerslag/Verd. | Zeespiegel | Rivierafvoer | Erosie/sed. | Storm* | Brand |
| *) vertroebeling kan primaire productie beïnvloeden | | | | | | | |
| Kust, Wadden, Estuaria en Duinen | | | | | | | |
| CO ₂ | Temp | Neerslag/Verd. | Zeespiegel | Rivierafvoer | Erosie/sed. | Storm | Brand** |
| **) van toepassing op duinen | | | | | | | |
| Rivierengebied | | | | | | | |
| CO ₂ | Temp | Neerslag/verd. | Zeespiegel | Rivierafvoer | Erosie/sed. | Storm | Brand |
| Laag Nederland incl. IJsselmeer | | | | | | | |
| CO ₂ | Temp | Neerslag/verd. | Zeespiegel | Rivierafvoer | Erosie/sed. | Storm*** | Brand |
| ***) van toepassing op IJsselmeer | | | | | | | |
| Hoog Nederland | | | | | | | |
| CO ₂ | Temp | Neerslag/verd. | Zeespiegel | Rivierafvoer | Erosie/sed. | Storm | Brand |
| Legenda | | | | | | | |
| [Groen] | | Niet gevoelig | | [Rood] | | Gevoelig | |
| [Geel] | | Enigszins gevoelig | | [Wit] | | Geen info beschikbaar | |

Figuur 2.3.1.b. Deze tabel laat globaal zien voor welke typen klimaateffecten de verschillende regio's in Nederland gevoelig zijn.

2.3.2 Noordzee

Grote delen van de Noordzee zijn Natura 2000 gebied. Vooral de relatief ondiepe zones zijn belangrijk voor de natuur omdat ze een kraamkamerfunctie hebben. De term relatief is hier echt op zijn plaats want de Doggersbank rijst op uit een zeebodem die 50 meter diep ligt maar de toppen komen niet veel hoger dan 30 meter onder zeeniveau. Het valt niet te verwachten dat een zeespiegelstijging hier enig merkbaar effect heeft. Dat geldt wel voor de temperatuur – in de gehele Noordzee. Voor soorten als bot en schol ligt de optimumtemperatuur rond 20°C en voor grotere schollen bij 18°C. In de laatste jaren zijn de temperaturen in de kustzone hoger geweest en komen ze voor grotere schol zelfs dicht bij de lethale temperatuur. Ook een soort als de zandspiering – zeer belangrijk als voedselbron voor zeezoogdieren – lijkt gevoelig voor hogere temperaturen. Soorten als de zeebaars en garnaal profiteren juist van de hogere temperatuur. Er vindt dus een verschuiving in de soortensamenstelling plaats ten koste van de noordelijke soorten en ten gunste van de zuidelijke soorten²⁸. Dit geldt ook voor een noordelijke soort als de Noordkromp, een ruim 10 cm groot langlevend schelpdier. Deze zit in het Nederlandse deel van de Noordzee aan de zuidrand van zijn verspreidingsgebied en loopt het risico door klimaatverandering te verdwijnen. In het natuurbeleid vol inzetten op het behoud van dergelijke soorten “voor Nederland” is waarschijnlijk niet effectief omdat bepaalde soorten door klimaatverandering “van nature” uit Nederland zouden verdwijnen.

Ook kan klimaatverandering indirecte effecten hebben op soorten door verschuivingen in het paaiseizoen. Door warmere winters vervroegen nonnetjes hun paaiseizoen, waardoor de larven mogelijk uit fase zijn met hun voedsel (fytoplankton) en langzamer groeien. De juveniele nonnetjes vormen voedsel voor garnalen, die kleine schelpen boven grote schelpen prefereren. Bovendien trekken garnalen na warme winters eerder de Waddenzee binnen dan na koude winters. Zo zijn de juveniele nonnetjes na warme winters niet alleen door hun grootte een eenvoudiger prooi voor garnalen, maar worden ze ook blootgesteld aan een hogere predatiedruk van de garnalen.

²⁸ R. van Hal, O.G. Bos & R.G. Jak. 2011. Noordzee: systeemodynamiek, klimaatverandering, natuurtypen en benthos

Door opwarming kan zeewater minder zuurstof bevatten, wat ongunstig is voor bepaalde soorten. Ook wordt de zee zuurder (de pH daalt) door opname van kooldioxide. Kalkhoudende soorten, zoals schelpdieren, zullen hier in de toekomst mogelijk hinder van ondervinden, omdat hun schelp kan oplossen. Het is nog niet bekend in hoeverre verzuring een probleem is want van nature zijn er in de Noordzee ook grote schommelingen in de zuurgraad.

Hoewel het duidelijk is dat er een diversiteit aan effecten optreedt gaan we er hier niet verder op in, deels omdat er binnen het thema Visserij meer aandacht aan wordt gegeven maar vooral omdat deze effecten met een adaptatiestrategie niet goed kunnen worden ondervangen.

Een interessante klimaatgerelateerde en beïnvloedbare impact van de mens op de open Noordzee is wel dat ten behoeve van kustsuppleties zand op de bodem wordt gewonnen. Door dit zo te doen dat meer reliëf op de bodem ontstaat is een gunstig effect op de natuur te bereiken. Een ander aspect betreft het storten van baggerspecie op zee: ook dit zou op een zodanige wijze moeten plaatsvinden dat de natuur er van profiteert. Ook de plaatsing van windmolens op zee (om de CO₂ uitstoot te beperken) biedt kansen om aanhechtingspunten te bieden voor sessiele soorten. Dat is belangrijk omdat hard substraat in de Noordzee schaars is. Als deze windmolenparken als beschermde zones worden aangewezen waarin ook visserij niet is toegestaan, kan de natuur nog meer profiteren.

| |
|--|
| Kustsuppleties nemen t.g.v. klimaatverandering toe. Door het zand daarvoor zo te winnen dat meer bodemreliëf ontstaat (bijv. een patroon van ribbels of een diepe put), kan mogelijk een plus voor de natuur worden gegenereerd. |
| Baggerinspanningen nemen t.g.v. klimaatverandering toe. Door de specie te storten op plaatsen waar de natuur ervan profiteert, kan een plus voor de natuur worden gegenereerd doordat hierdoor op termijn ondiepere delen ontstaan. |
| Er zullen meer windmolenparken op zee verschijnen. Door deze aan te wijzen als beschermde mariene zone ontstaan gebieden die vrij zijn van visserij en veel aanhechtingspunten bieden voor de meer sessiele soorten zoals mosselen, amfipoden anemonen. Beide zijn belangrijk winstpunten voor de Noordzeenatuur |

Tabel 2.3.2. Deze tabel geeft een overzicht van (milieu)factoren die de(adaptatie)kansen van de natuur van de Noordzee beïnvloeden. Dit zijn ook potentiële aangrijpingspunten voor een klimaatadaptatiestrategie.

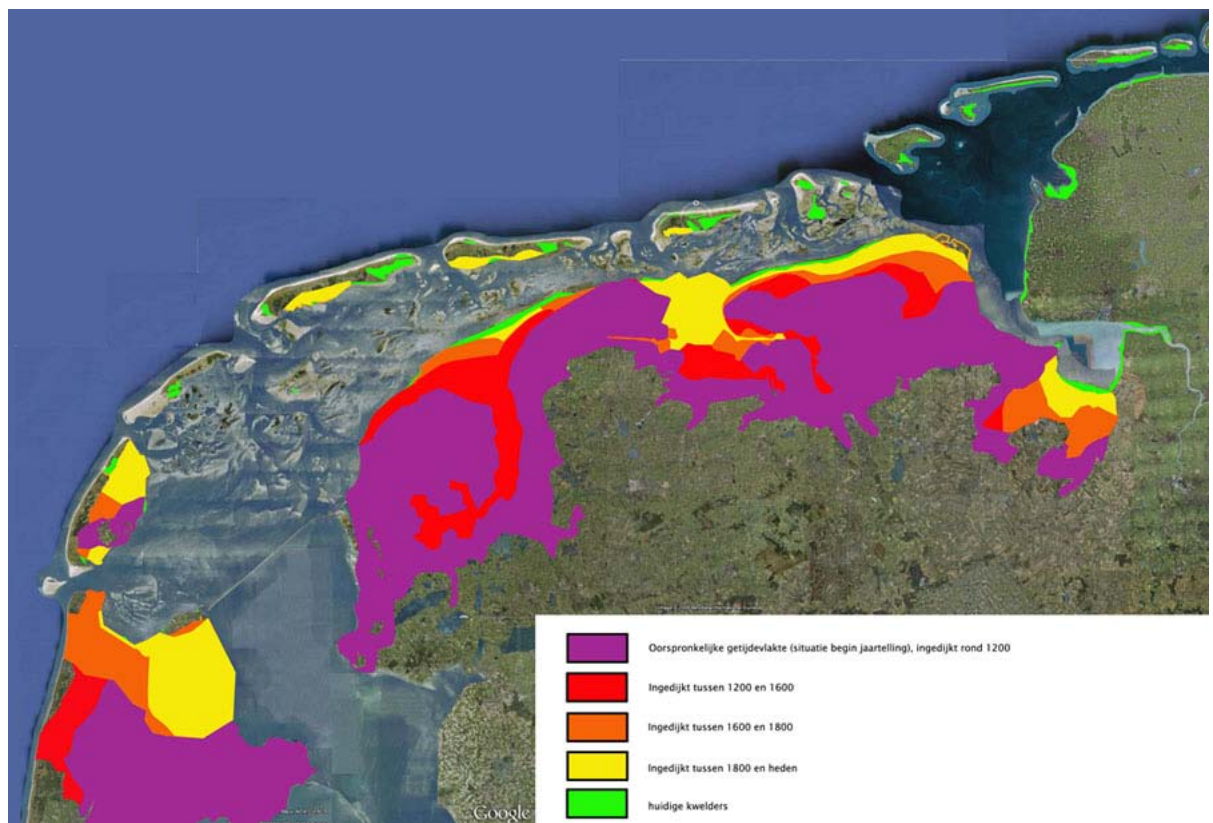
2.3.3 Kust, Wadden en estuaria

Vrijwel de hele Nederlandse kustlijn is van internationale betekenis voor de natuur en grote delen ervan zijn aangewezen als onderdeel van het Nationaal Natuurnetwerk en Natura 2000 gebied. De ligging van de kustlijn is van oorsprong variabel. Afhankelijk van de hoogte van de zeespiegel en de aanvoer van zand verschuift de kustlijn landinwaarts of richting zee. Zandtekorten en een stijgende zeespiegel zorgen ervoor dat de kustlijn zich op dit moment landinwaarts zou “willen” verplaatsen. Dit is echter niet mogelijk vanwege onze kustverdediging: waar van nature al duinen voorkwamen worden zijn deze door suppleties op “hoogte en breedte gehouden” en elders zijn dijken aangebracht. De kustnatuur wordt als het ware ingeklemd tussen een oprukkende zeespiegel en een beleidsmatig en in de praktijk gefixeerde kustlijn. Onder water wordt de kust steeds steiler waardoor ondieptes verdwijnen.

Op de toegangen naar de havens van Rotterdam en Antwerpen na zijn estuaria afgesloten. De eilanden, die in een dynamisch evenwicht verkeerden met de estuaria en “meegroeiden met de zee”, zijn vanaf de 12^e eeuw bedijkt. De oeverzones en de natuurlijke dynamiek en veerkracht zijn daardoor goeddeels verdwenen. De behoefte aan “meer veiligheid” kan ten gevolge van klimaatverandering toenemen en leiden tot het handhaven van deze afsluitingen en daarmee het continueren van de situatie waarin een vrije uitwisseling van vis (trek),

sediment en voedsel tussen zee en rivierengebied niet mogelijk is. Biesbosch en op lange termijn ook het Hollands Diep en Haringvliet zullen daardoor langzaam dichtslibben. Het tegenovergestelde vindt plaats in Oude Maas, Spui, Dordse Kil en Noord: dit zijn de enige waterlopen waardoor het getij het Haringvliet en Hollands Diep nog kan bereiken. Gevolg is nu al hevige erosie van die riviertakken met risico's voor de veiligheid (stabiliteit van waterkeringen en oevers) als gevolg. Respons is op dit moment het aanbrengen tegen enorme kosten (ordegrootte 500 Meuro) van grote hoeveelheden stortsteen op de oevers en bodems met negatieve gevolgen voor de natuur.

Het Waddengebied neemt in de kustzone een aparte plaats in. De zeegaten tussen de eilanden zijn open en de kustverdediging bestaat uit dijkeringen om de kern van elk van de eilanden en een zeedijk langs de kust van het vasteland. Daarnaast zijn landaanwinningswerken uitgevoerd die resulteerden in (landbouw)kwelders langs de kust. Met stuifdijken zijn de meeste van de eilanden verlengd en vastgelegd. Met de aanleg van de Afsluitdijk en de Lauwersmeerdijk werd de Waddenzee verder in het korset gesnoerd. Dit betekent dat ook de randen van ons grootste natuurgebied versterd zijn. In het gebied tussen vastelandkust en de binnenrand van de duinen is nog wel flexibiliteit. Er is zoveel zand en slib in beweging dat de wadplaten een zeespiegelstijging van ongeveer 1 cm per jaar nog bij



Figuur 2.3.3. De afname van het kwelderareaal is illustratief voor de wijze waarop in de loop der eeuwen de flexibiliteit langs onze kust is afgenomen. De kwelders die in de huidige situatie nog bestaan (ca. 9.000 ha in NL en 31.000 in D en DK²⁹) en door klimaatverandering worden geraakt, zijn slechts een fractie van wat er ooit beschikbaar was. Dit zeer beperkte areaal versterkt de potentiële impact van klimaatverandering. Bron: Stroming (2009). De Wadden Klimaatbestendig. Bouwsteen voor het advies aan de Minister van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit in het kader van het Natuurherstelplan Waddenzee.

²⁹ Bron: Dijkema K.S. et.al (2007) Monitoring van kwelders in de Waddenzee.

zouden moeten kunnen benen. Daarvoor is wel noodzakelijk dat de sedimentinvangende mechanismen in tact zijn en bij wadplaten spelen onder andere mosselbanken en de aanwezigheid van een diatomeeën(kit)laag daarbij een belangrijke rol. Door (bodemberoerende) visserij worden deze verstoord waardoor onzeker is dat de platen voldoende mee kunnen blijven groeien met een zeespiegelstijging van 0,85 cm per jaar (Deltascenario Stoom). Voor kwelders langs de vastelandkust geldt dat ze veelal door landaanwinning zijn ontstaan en hoger liggen dan bij een natuurlijke verhanglijn het geval zou zijn. De kwelderranden zijn nu dus al breder dan ze zonder onderhoud – uitgaande van een harde grens in de vorm van een dijk aan de landzijde – zouden zijn. Een stijgende zeespiegel betekent dat er nog meer onderhoud nodig zal zijn om de kwelders op hun huidige plek op hoogte en breedte te houden.

| |
|--|
| Stuifdijken op de eilanden blokkeren zandtransport van Noordzeekust naar de kwelders langs de Waddenzee (via washovers op de “staarten” van de eilanden) en daarmee de opbouw daarvan. |
| Ontbreken of verstoring van zandinvangende mechanismen (bijv. als gevolg van bodemberoerende visserij) beperken het opbouwend vermogen van platen. |
| Kwelders zijn teruggedrongen tot kleine snippers – door dit kleine areaal zijn grote effecten van incidentele veranderingen mogelijk. Daarbij zijn de kwelders langs het vasteland het resultaat van landaanwinning en deze zijn zonder beheer niet stabiel. Door een stijgende zeespiegel wordt intensiever beheer nodig. |
| Werking van eb en vloed is in de estuaria van de ZW Delta niet of nog maar beperkt mogelijk door (deels) afsluiting van de zeearmen. “Meegroeien met de zee” is daardoor niet mogelijk. Integendeel: platen en oevers (beide essentieel voor de natuur en veiligheid) eroderen. |
| De contactzone tussen zout en zoet (optrekbaarheid vis, opgroeien vis) is in de estuaria van de ZW Delta een scherpe grens of afwezig door afsluiting zeearmen. |
| Zoet voedselrijk rivierwater bereikt het estuariene milieu niet (in grote delen van de Zuidwestelijke Delta) of schoksgewijs (Waddenzee als er gespuid wordt). In het eerste geval treedt voedselschaarste op, in het tweede geval treedt massale sterfte op van het bodemleven. ³⁰ |
| Kustsuppleties leiden mogelijk tot een vertroebeling van het water, wat ten koste gaat van de primaire productie. |
| Het uitdiepen van vaargeulen blokkeert de natuurlijke sedimentuitwisseling in de kustzone. |

Tabel 2.3.3. Deze tabel geeft een overzicht van (milieu)factoren die de adaptatiekans van de natuur van de Wadden, Kust en Estuaria in belangrijke mate beïnvloeden. Dit zijn ook potentiële aangrijpingspunten voor een klimaatadaptatiestrategie.

2.3.4 Rivierengebied

Een groot deel van de uiterwaarden van Rijn en Maas is van internationale betekenis voor de natuur en grote delen zijn aangewezen als onderdeel van het Nationaal Natuurnetwerk en Natura 2000 gebied. Dat neemt niet weg dat de natuurlijke processen die het rivierengebied maakten tot wat het is, vergaand aan banden zijn gelegd. Vanaf de middeleeuwen werden de rivieren door de aanleg van dijken in een keurslijf gedrongen en werd het winterbed sterk verkleind. Sinds de oprichting van Rijkswaterstaat in 1789 heeft het rivierbeheer van het zomerbed en het resterende deel van het winterbed in het teken gestaan van optimalisatie ten behoeve van de scheepvaart en de versnelde afvoer van water, sediment en ijs. De eigenschappen van onze rivieren zijn daardoor ingrijpend veranderd. Van oorsprong brede en plaatselijk ondiepe rivieren veranderden in verdiepte, rechtgetrokken vaargeulen met een door kades en winterdijken ingeperkt winterbed. 's Winters is de ruimte voor de afvoer van hoogwaters daardoor beperkt en 's zomers leidt het verdiepte zomerbed tot extra verdroging.

³⁰ Kabat, P. et al. (2009) Klimaatverandering en het waddegebied. In opdracht van Kennis voor Klimaat.

Er is wel een kentering gaande. Sinds het midden van de jaren '80 van de vorige eeuw en zeker na het in werking treden van het programma Ruimte voor de Rivier, wordt weer meer ruimte geboden aan de natuurlijke processen in het winterbed van de rivier. De natuur reageert daar zeer positief op: veel soorten nemen in aantal toe of keren terug na een lange periode van afwezigheid.³¹ Het is een illustratie van het aanpassingsvermogen van de natuur.

Een belangrijke natuurlijke functie van rivieren is ook de aanvoer van voedsel en sediment naar de overgangszones met het mariene milieu (de Zuidwestelijke Delta en de Waddenzee) en het IJsselmeer. Daarnaast fungeren ze als trekroute voor vis naar paaiplaatsen in het binnenland. Beide functies zijn van internationale betekenis en beiden worden sterk beperkt door het afsluiten van de zearmen.

De grootste klimaatgerelateerde bedreiging voor de natuur in het rivierengebied wordt gevormd door de wijze waarop we als mens (gaan) reageren op de veranderende rivierafvoeren. In het programma Ruimte voor de Rivier wordt met succes gepoogd om het vergroten van de rivierveiligheid te combineren met meer ruimtelijke kwaliteit en ecologische herstel. Echter, als we ons tegen nóg hogere waterstanden willen wapenen (17.000 of zelfs 18.000 m³/s bij Lobith i.p.v. de 16.000 m³/s waartegen Ruimte voor de Rivier beschermt) kan dat zeer negatief uitpakken voor de natuur. Zeker omdat we ons tegelijkertijd voorbereiden op langere perioden met lage rivierafvoeren. Wat dan in beeld kan komen is het grootschalig verwijderen van opgaande (of ruige) begroeiing in de uiterwaarden om de waterafvoer te vergroten, stenen dammen parallel aan de rivieroever om de vaargeul op diepte te houden en hogere en sterkere dijken die de ruimtelijke kwaliteit aantasten. Mogelijk worden plaatselijk de dijken verder van de rivier afgelegd maar de praktijk laat nu al zien dat, uitzonderingen daargelaten, de extra ruimte die de rivier dan krijgt niet zal worden benut voor natuur maar voor grootschalige landbouw.

| |
|---|
| Kades belemmeren de instelling van een dynamisch evenwicht tussen winter- en zomerbed. |
| Scheepvaartseisen (vaargeul op diepte houden) beperken de mogelijkheden om hoogwaterbescherming door aanleg van nevengeulen te combineren met natuurontwikkeling. |
| Scheepvaartseisen (vaargeul op diepte houden) beperken de mogelijkheden om stenen oevers te verwijderen en de ontwikkeling van dynamische strandjes en steilrandjes. |
| Scheepvaartseisen (vaargeul op diepte houden) leidt mogelijk tot stenen langsdammen in de rivier waardoor "een kanaal in een rivier" ontstaat en de natuurlijke uitwisseling van sediment tussen zomer- en winterbed verdwijnt. |
| Hoge rivierveiligheidseisen beperken de mogelijkheden voor spontane natuurontwikkeling in de uiterwaarden en op rivieroever. |
| Nationale scope ("we regelen onze veiligheid in eigen land) bedreigt de natuur die in de afgelopen decennia in het rivierengebied is ontstaan en laat potenties om juist meer natuur te creëren onbenut. |
| Dammen (in het beneden-rivierengebied) en stuwen belemmeren de trek van vis zoals zalm en steur. |

Tabel 2.3.4. Deze tabel geeft een overzicht van (milieu)factoren die de adaptatiekansen van de natuur van het Rivierengebied in belangrijke mate beïnvloeden. Dit zijn ook potentiële aangrijpingspunten voor een klimaatadaptatiestrategie.

³¹ Dit is zeer goed gedocumenteerd in "Maas in Beeld" en "Rijn in Beeld". Zie rijninbeeld.nl en maasinbeeld.nl

2.3.5 Laag Nederland

Laag Nederland is met zijn laagvenen (o.a. het Groene Hart) en droogmakerijen (o.a. IJsselmeerpolders) aan het dalen terwijl de zeespiegel stijgt. De daling komt ten dele door geologische krachten (enkele centimeters tot een decimeter per eeuw) maar het overgrote deel, 1 a 2 meter per eeuw³², is een gevolg van ontwatering van de bodem en oxidatie van het veen. Hierdoor wordt het hoogteverschil tussen een groot deel van ons land en de stijgende zeespiegel aanzienlijk groter dan door klimaatverandering alleen (15- 35 cm in 2050 onder het Deltascenario Rust resp. Stoom³³). Bovendien wordt het waterpeil 's winters laag gehouden en 's zomers hoog terwijl het van nature omgekeerd is en veel meer fluctueert. Door klimaatverandering met mogelijk hogere verdamping, een grotere watervraag, een oprukkende zeespiegel (verzilting), lagere rivierafvoeren en langere periodes zonder neerslag worden in de nabije toekomst hogere eisen gesteld aan het waterbeheer.

In de IJsselmeerpolders is de natuur (Oostvaardersplassen) gescheiden van het grootschalige landbouwareaal. In het Groene Hart is dat niet het geval. Daar zijn natuurgebieden (waaronder N2000 gebieden) en waardevolle landschappen verweven met grootschalig landbouwareaal, steden en bedrijfscomplexen. Vooral het strikt handhaven van een vast waterpeil is daar een probleem. Immers, elke druppel schoon neerslagwater "teveel" wordt direct afgevoerd om een te hoog peil te voorkomen, waarna kort daarop elke druppel "te weinig" wordt aangevuld met Rijnwater om een te laag peil te voorkomen. Dat Rijnwater is van mindere kwaliteit dan regenwater: het is voedselrijker en heeft afhankelijk van regio en tijdstip ook een veel hoger zoutgehalte. Dat laatste hangt samen met de plaats waarop dat Rijnwater voor bijv. het Groene Hart wordt ingelaten: vanuit de Nieuwe Waterweg, iets ten westen van Rotterdam dus dicht bij zee. Deze plek kan benut worden omdat bij lage afvoeren het water van Rijn en Maas (door de afsluiting van de zeearmen) volledig via de Nieuwe Waterweg richting Noordzee wordt geloodst. Met meer open estuaria (zeer gewenst als respons op klimaatverandering, zie elders) zou dit innamepunt al lang niet meer functioneren maar nu al verzilt het inlaatpunt bij Gouda eens in de tien jaar zo ernstig dat inname niet mogelijk is. Rond 2050 gebeurt dit waarschijnlijk zo vaak dat het niet meer betrouwbaar is in te zeten (scenario's Warm en Stoom).³⁴

De keus ligt nu voor of we er op inzetten de levensduur van deze niet duurzame (ecologie, economie waterkwaliteit, veiligheid) zoetwaterinname te rekken of het innamepunt op korte termijn zo ver landinwaarts verplaatsen dat het ongevoelig wordt voor verzilting. Het eerste is negatief voor de natuur, de veiligheid en de economische kansen³⁵, het tweede juist positief. Positief kan ook zijn het langer vasthouden van (neerslag) water in (nieuwe) natuurgebieden en uiteraard meer flexibiliteit in het peilbeheer en veranderingen bij de gebruikers, zodat ze minder afhankelijk worden van wateraanvoer. Tenslotte: veenafbraak leidt niet alleen tot bodemdaling maar ook tot uitstoot van broeikasgassen én tot een – door stoffen die vrijkomen bij de veenafbraak – verminderde kwaliteit van het oppervlaktewater. Door hogere temperaturen (zomertemperatuur + 2,8°C in 2050 onder het Deltascenario Stoom) verloopt de afbraak sneller en worden deze problemen, tenzij wordt ingegrepen, erger.

³² Er is veel variatie binnen Nederland.

³³ Zie Hoofdstuk 4 voor de componenten van de Deltascenario's.

³⁴ Programmteam Rijnmond-Drechtsteden (2012). Probleemanalyse Rijnmond-Drechtsteden

³⁵ Bron: Wereld Natuur Fonds en Coalitie Natuurlijke Klimaatbuffers. (2012). Water Naar de Zee, visie op een klimaatbestendige zoetwatervoorziening van laag Nederland.

| |
|--|
| In het IJsselmeer is het peil onnatuurlijk: hoog in de zomer en laag in de winter. Daarnaast is het peil “vast” en is de overgang tussen laag en hoog abrupt. Daardoor ontbreken natuurlijke oevers waarop in het voorjaar, bij een laag peil, oeverplanten kunnen kiemen. Op dat moment staat het water nl. al tegen de stenen dijkvoet aan. Dit heeft een negatief effect op natuur en waterkwaliteit. Met een ander peilbeheer, waarin gedurende het zomerseizoen het peil langzaam uitzakt (om in de waterbehoefte van Noord-Nederland te voorzien) wordt de natuur rijker en zijn er meer mogelijkheden om te reageren op klimaatverandering. |
| Zoetwaterinnamepunten liggen soms (te) dicht bij zee. De wens deze zo lang mogelijk te handhaven beperkt de speelruimte voor de estuariene dynamiek (incl. optrek van vis) en belemmert de adaptatiemogelijkheden van de natuur in de ZW Delta en het Groene Hart |
| Het handhaven van een vast waterpeil verlaagt de waterkwaliteit en daarmee de kwaliteit van de natuur. Een flexibeler peil, ook in boezems, werkt gunstig uit op de adaptatiekansen. |
| Een laag waterpeil faciliteert eerder maaien in het seizoen en een dichte vegetatieontwikkeling in het voorjaar. Deze effecten worden versterkt door de snellere temperatuurstijging in het vroege voorjaar en beperken de overlevingskansen van o.a. de grutto. |
| De behoefte aan meer natuur en recreatieruimte in de stedelijke omgeving kan gecombineerd worden met het vasthouden van water voor tijden van droogte. |
| Door water vast te houden in natuurgebieden, ontstaan weer kansen voor hoogveenontwikkeling, wat een nog grotere buffercapaciteit van water oplevert. |
| Een in het zomerseizoen langzaam uitzakkend peil verbetert de groeiomstandigheden voor oevervegetaties zoals riet. Deze rietzomen verminderen de erosie van oeverzones vanwege hun remmende werking op golven. |
| Met een hoger waterpeil en flexibel peilbeheer kan veenoxidatie in de gedraineerde laagveengebieden worden geremd. Dit kan worden gecombineerd met de ontwikkeling van nieuwe moerasgebieden. |
| In oevers met rietzomen en lagunes wordt veel slib en plantenmateriaal ingevangen, wat zorgt voor een natuurlijke aanwas van de oevers en zorgt voor een reductie van slib in het water. |
| Door het isoleren van brakwaterkwel direct achter de zoetwaterkwelzone van de duinen, achter de zeedijken en in diepe droogmakerijen, kan het areaal brakwaternatuur worden vergroot. Dit is van Europees belang ³⁶ en daarbij kan de watervraag voor het doorspoelen t.b.v. “zoete functies” verminderen. |

Tabel 2.3.5. Deze tabel geeft een overzicht van de (milieu)factoren die de adaptatiekansen van de natuur in Laag Nederland in belangrijke mate beïnvloeden. Dit zijn ook potentiële aangrijpingspunten voor een klimaatadaptatiestrategie.

2.3.6 Hoog Nederland

Onder Hoog Nederland verstaan we hier dat deel van ons land dat boven de zeespiegel ligt, met uitzondering van het rivierengebied en de kust. Ook hier zijn natuurgebieden en waardevolle landschappen verweven met landbouw, woon en werkgebieden. Kenmerkend voor deze regio is dat ook hier de nadruk bij de inrichting sterk heeft gelegen op het afvoeren van water. Er zijn talloze greppels, “beken” en watergangen gegraven. Daarbij komt dat bijna 20% van Hoog Nederland tot 1800 was bedekt met hoogveen. Dit waren uitgestrekte gebieden die functioneerden als natuurlijke sponzen die bij hevige neerslag water vasthielden en het daarna weer langzaam afstonden aan de omgeving. Afgraven ten behoeve van turfwinning gevolgd door landbouw als nieuwe functie, heeft deze veerkracht al weggehaald ver voordat klimaatverandering als nieuwe bedreiging in beeld kwam. Omdat de restanten van het hoogveen als natuurgebieden worden beheerd hebben deze hun sponswerking deels behouden. Een positief effect op de omgeving hebben ze vanwege de geringe omvang en

³⁶ Paulissen, M.P.C.P. et al (2011). Klimaatgedreven verzilting: betekenis voor natuur en mogelijkheden voor klimaatbuffers. Alterra rapport 2161, in opdracht van Natuurmonumenten.

afgescheiden waterhuishouding niet. Intacte hoogvenen zijn vergaand zelfredzaam en niet erg gevoelig voor de langere droge periodes die in Deltascenario Stoom zijn te verwachten.³⁷ Hoewel in Nederland de hoge stikstofdepositie de veerkracht van hoogvenen beperkt (vergrassing, verbossing en dus verdringing van veenmos) is de verwachting dat ook de hoogveenrestanten in onze natuurgebieden relatief ongevoelig zijn voor klimaatverandering indien het interne beheer (waterhuishouding) in die gebieden op orde is en het neerslagoverschot (=neersag – verdamping) hoger dan 150 mm blijft

Niet alleen de natuurlijke hoogvenen verdwenen, ook natuurlijke riviertjes zoals Berkel, Dinkel en Dommel werden zo ingericht dat water snel werd afgevoerd. Zo nam de doorsnede van de bedding van de Berkel toe met een factor 5. Om te voorkomen dat ze in de zomer droogvielen – de bijwerking van de oplossing – werden vervolgens stuwen aangelegd. In de stilstaande, ondiepe waterpartijen tussen de stuwen kunnen in de zomer de watertemperaturen echter flink oplopen, bezinkt er veel slib waarop de meeste beekorganismen niet kunnen leven en neemt daarnaast de concentratie van verontreinigingen door verdamping toe. Daardoor is de waterkwaliteit 's zomers veelal slecht. Daarnaast worden door de snelle afvoer de grondwatervoorraden minder aangevuld terwijl voorraadbeheer in Hoog Nederland - anders dan in Laag Nederland met zijn continue aanvoer via de rivieren – cruciaal is voor de watervoorziening.

Klimaatverandering werkt in Hoog Nederland vooral in via extremen in neerslaghoeveelheden: hoosbuien met grotere kans op wateroverlast in beekdalen en in bepaalde klimaatscenario's langer aanhoudende droogtes met negatieve gevolgen voor de waterkwantiteit en –kwaliteit. Naarmate er in de inzigggebieden meer vegetaties staan die jaarrond verdampen (bijv. dennenbos) zal neerslag minder bijdragen aan het aanvullen van de grondwatervoorraden en zullen kwelzones en (sprengen) beken eerder verdrogen (maar zie box 6 hiervoor). In de waterleidingduinen kan bijv. het verwijderen van Amerikaanse vogelkers kostenneutraal plaatsvinden omdat daartegenover een grotere aanvulling van de grondwatervoorraad met schoon regenwater staat³⁸. Ook in Hoog Nederland, waar de natuur vaak ligt op relatief voedselarme bodems, kan het feit dat de hogere CO₂ concentratie leidt tot minder verdamping door planten een rol spelen. Een goede ontwikkeling waar alle functies (natuur, landbouw, woonkernen) van profiteren is dat in veel provincies aan beekherstel wordt gewerkt, zodanig dat water weer langer wordt vastgehouden. Het pleksgewijs dichten van greppels en ontwateringssloten en daarmee een gedeeltelijk herstel van de natuurlijke sponswerking zou daarop een goede aanvulling zijn. Het is namelijk cruciaal dat het hydrologisch systeem als geheel wordt hersteld, zowel in de lengterichting (beken van bron tot monding) als in de breedte (van plateau via helling tot in het dal). In dat verband is ook voortzetting van het anti-verdrogingsbeleid (TOP-gebieden) passend. De Europese Commissie heeft daar ook op gewezen en Nederland opgedragen om bij de de nieuwe cyclus van Kaderrichtlijn Water plannen meer rekening te houden met de extra inspanningen die als gevolg van klimaatverandering nodig zijn.

Kenmerkend voor Hoog Nederland zijn ook de bossen en heidevelden op de Veluwe, in Brabant en Drenthe en op de Utrechtse Heuvelrug. De zandige ondergrond daar is nauwelijks in staat om water vast te houden en de bodem ligt vaak ver van het grondwater verwijderd. Klimaatverandering met langer aanhoudende droogtes (Deltascenario Stoom) zal de kans op bos- of natuurbranden doen toenemen.

³⁷ Bijlsma, R.J., A.J.M. Jansen, J. Limpens, M.F. Wallis de Vries, J.P.M. Witte (2011). Hoogveen en klimaatverandering in Nederland. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2225.
M. M. P. D. Heijmans, M. Holmgren, Y.A.M. van der Knaap, J. Limpens (2014). Persistent versus transient tree encroachment of temperate peat bogs: effects of climate warming and drought events GCB 19(7): 2240–2250

³⁸ H. Bleumink, mond. med.

| |
|---|
| Beken zijn rechtgetrokken, vastgelegd en van stuwen voorzien. Dit beperkt de adaptatiekansen voor de natuur omdat de processen (sedimentatie, erosie, visoptrek, paaien, etc.) die daarvoor van belang zijn geen ruimte krijgen. |
| Beekherstel kan helpen om een deel van de klimaateffecten (ongewenste verdroging en wateroverlast) te beperken en vergroot de (adaptatie)kansen voor de natuur. |
| Door het wegnemen van greppels in de meest bovenstroomse delen van de stroomgebieden, neemt de sponswerking weer toe. Deze gebieden geven hun water dan langzamer af, zodat hoogwatergolven minder groot zijn en er in droge perioden meer water over blijft. Lokaal is ook hoogveenontwikkeling weer mogelijk, wat de buffercapaciteit van het systeem nog verder vergroot. Het gericht ruilen van gronden tussen natuurorganisaties en boeren om zo vooral inzigggebieden een natuurfunctie te geven past goed in zo'n benadering. |
| Op de hoge zandgronden (Brabant, Sallandsche Heuvelrug, Utrechtse Heuvelrug, Veluwe, Hondsrug, etc.) bepaalt de vegetatie bovenop de plateaus in hoge mate hoeveel neerslagwater vanuit deze inzigggebieden het grondwater bereikt. Door te kiezen, bijv. bij landgoedontwikkeling maar mogelijk ook in het natuurbeheer, voor vegetaties die minder water verdampen, kan de grondwatervoorraad worden aangevuld en zullen kwelstromen en sprengen weer beter worden gevoed. Het werken aan "verloving" (het omvormen van dennenbossen die jaarrond verdampen naar loofbossen die hun blad in de winter verliezen) is hierbij een goede stap. |

Tabel 2.3.6. Deze tabel geeft een overzicht van (milieu)factoren die de adaptatiekansen van de natuur van in Hoog Nederland in belangrijke mate beïnvloeden. Dit zijn ook potentiële aangrijpingspunten voor een klimaatadaptatiestrategie.

2.4. Kwetsbaarheid van de maatschappij

Door klimaatverandering verandert de natuur. Los van de vraag hoe dat uitpakt voor de natuur zelf kan dit flinke gevolgen hebben voor onze samenleving. Een aantal effecten werkt namelijk door in ons dagelijks bestaan. Dat behandelen we in deze paragraaf. Het omgekeerde is ook waar: de wijze waarop we ons verweren tegen klimaatimpacts heeft grote gevolgen voor de natuur. Dat aspect komt aan bod in hoofdstuk 4.

2.4.1 Calamiteiten en vermindering van ecosysteemdiensten

Sommige klimaatinvloeden uit zich in de vorm van calamiteiten. Met rukwinden, die vaker gaan voorkomen, kunnen bomen op rails en bovenleidingen vallen, waarmee het spoorverkeer en de economie periodiek flink worden ontregeld. Maar ook directe sterfte treedt op: in de afgelopen decennia zijn er in Nederland meer mensen overleden door storm (overigens niet omdat het aantal stormen is toegenomen) dan als gevolg van overstromingen. Als droogte toeneemt, neemt de kans op hevige bos- en natuurbranden toe en daarmee de kans op maatschappelijke ontwrichting (stilleggen spoorverbindingen, afsluiten autowegen).

Er kan ook vermindering of uitval van ecosysteemdiensten optreden, zoals de "productie" van schoon (zwem)water, vis, stevige ondergrond om dijken op te bouwen etc. Als we in warme zomers niet kunnen zwemmen omdat er algenbloei optreedt, is dat vervelend en het ondergraaft het imago van Nederland als watersportland. Ook zijn er gezondheidsrisico's (zie de risicoanalyse over gezondheid). De landbouw ondervindt eveneens consequenties van algenbloei omdat filters voor de inname van irrigatiewater verstopt raken. Massale vissterfte door zuurstofgebrek (warm water kan minder zuurstof bevatten) en botulisme zullen eveneens sterke negatieve maatschappelijk reacties oproepen. Als door langdurige droogte, gecombineerd met ontoereikende zoetwateraanvoer, het proces van veenoxidatie sneller verloopt, klinkt het land sneller in en kan het risico op verzakken en doorbreken van kades toenemen. Als door droogte beken in de zomer droogvallen – nu al een probleem – kunnen deze door vissen niet meer worden gebruikt als paaiplaats. Dat is nadelig voor de biodiversiteit maar ook voor de sportvisserij.

In warme jaren overwinteren zeesterren minder in de diepere delen van de Noordzee en meer in de Waddenzee. Als in het voorjaar het mosselzaad op de waddenbodem valt, wordt dit sneller door de zeesterren opgegeten met als gevolg dat de reproductie van mossels afneemt. Dit heeft mogelijk een negatieve impact op de mosselvisserij.

Een laatste voorbeeld betreft de maatschappelijke respons in het buitenland. In het Deltaprogramma is verkend of landen bovenstrooms gaan anticiperen op klimaatverandering op een manier die de hoogwaterproblematiek in ons land verder verergert. Dat blijkt niet het geval. Niet verkend is echter of landen bovenstrooms maatregelen zouden kunnen treffen die de hoogwaterproblematiek (en gevolgen voor natuur, scheepvaart en recreatie) in ons land verminderen. Deze mogelijkheid is er, nl. door het herstel van de natuurlijke sponswerking in het Duitse middengebergte, maar wordt vooralsnog niet benut.

Dit alles illustreert de breedte van het scala aan effecten op zowel de natuur als de maatschappij.

2.4.2 Andere soorten en andere dichtheden

Migratie is één van de mechanismen waarmee de natuur reageert op klimaatverandering. Dit betekent dat er soorten in ons land verschijnen die hier toe nu toe niet voorkwamen. Daaronder aantrekkelijke, zoals de bijeneter, maar ook soorten die we minder waarderen zoals de Zuid-Europese zandvlieg, overbrenger van de ziekte *leishmaniasis* (berglepra). Sommige van die soorten arriveren op eigen kracht. Andere, zoals de Aziatische tijgermug die *dengue* overbrengt, komen mee met importgoederen en blijken zich in het veranderde Nederlandse klimaat te handhaven terwijl ze dat vroeger niet konden.

Ook veranderingen in dichtheden kunnen effecten hebben op ons dagelijks leven. Die kunnen periodiek zijn (algenbloei, zie hiervoor) maar ook structureel. Dat laatste is bij voorbeeld het geval bij de teek, die door klimaatverandering in grotere aantallen voorkomt dan vroeger. De kans om in aanraking te komen met de ziekte van Lyme die door de teken wordt verspreid, neemt daardoor toe.

3. Sociaaleconomische en klimatologische ontwikkelingen tot 2050

In 3.1 wordt verkend in hoeverre de sector “klaar” is om met een klimaatadaptatie aan de slag te gaan. Vervolgens wordt in beeld gebracht hoe groot de uitdaging is: wat staat, afgaande op de Deltascenario’s, de natuur en de sector te wachten (3.2)? Maakt het veel uit of je van een gematigd of een extreem scenario uit gaat (3.3) en wat zijn worst case scenario’s (3.4)?

3.1 Ontwikkelingen in de sector natuur

In deze rapportage gaan we er van uit dat de sector natuur bestaat uit het beleidsveld natuurbehoud en de overheden en (particuliere) organisaties die zich doelgericht met de realisatie daarvan bezig houden. Ondernemingen, overheden en organisaties die wél invloed hebben op de natuur maar niet als primair doel hebben die natuur te behouden, rekenen we niet tot de sector natuur – ze kunnen wel cruciale partners zijn.

In de sector natuur spelen de volgende trends:

- De steun voor natuurbehoud is breed, getuige het grote en stabiele (laatste jaar licht afnemend) aantal donateurs en leden van natuurorganisaties
- De particuliere kant van de sector denkt en werkt vrijwel vanaf het begin internationaal. Omdat veel ruimtelijk beleid nu ook internationaal is geregeld (EU Habitatrictlijn, Kaderrichtlijn Water, Vogelrichtlijn, EU landbouwbeleid) wordt de internationale dimensie sterker.
- Alle particuliere natuur- en milieuorganisaties zijn ervan doordrongen dat klimaatverandering hun werkveld raakt en zijn actief bezig met de consequenties daarvan.
- In Nederland wordt gewerkt aan een Nationaal Natuurnetwerk. De bedoeling daarvan is om het natuurareaal te vergroten en verbindingen tussen gebieden te realiseren. Achterliggende gedachte daarbij is weer dat deze aanpak nodig is om natuurlijke sleutelprocessen als migratie, uitwisseling van genen etc. mogelijk te maken. Toekennen van beheersvergoedingen en monitoring vindt echter plaats op grond van doelsoorten en natuurdoeltypen die op een bepaalde plaats gerealiseerd moeten worden. Daardoor is een systeem dat bedoeld was om flexibiliteit en veerkracht te vergroten in de uitvoeringspraktijk vrij star en kostbaar geworden. In de nieuwe Rijksnatuurvisie is dat onderkend en wordt het behoud van natuurlijke processen weer meer centraal gesteld. Dat biedt kansen.
- Natuurorganisaties in Nederland zoeken steeds meer een inhoudelijk/strategische samenwerking met andere sectoren en zetten zich actief in om multifunctionele natuurgebieden te realiseren. Een voorbeeld hiervan is de inzet sinds 2006 op natuurlijke klimaatbuffers. Dit zijn gebieden die zo worden ingericht dat daarin natuurlijke processen tot werking komen die de gevolgen van klimaatverandering opvangen. Natuurontwikkeling, gecombineerd met bijv. recreatie of delfstoffenwinning, is hier dus een middel om ongewenste klimaateffecten op te vangen. Ook waar beleid in ontwikkeling is, zoals bijv. in het Deltaprogramma, bieden natuurorganisaties hun kennis aan om zoveel mogelijk “meekoppelkansen” te benutten. Daarbij lijken ook de terreinbeherende organisaties steeds meer bereid om actief te werken buiten de eigen terreinen. Dit is een wezenlijke aanvulling op “actie voeren tegen” of “commentaar leveren op”.

Dit alles betekent dat de sector natuur klaar staat om werk te maken van klimaatadaptatie en eerste betekenisvolle stappen zijn in de praktijk reeds gezet. Samenwerking met andere partijen – en door die partijen erkend worden als partner – is daarbij essentieel.

3.2. Klimaatscenario’s en sociaaleconomische ontwikkelingen

In het deltaprogramma worden scenario’s gehanteerd waarin de klimatologische ontwikkeling (2 scenario’s) wordt gecombineerd met de sociaaleconomische ontwikkeling (ook twee scenario’s). Van de daaruit voortkomende 4 scenario’s worden³⁹ de twee meest extreme, Rust en Stoom, in deze rapportage betrokken.

³⁹ Dit is afgesproken bij aanvang van de opdracht, voor alle thema’s.

Tabel 3.2a en 3.2b geven een overzicht van enkele kenmerkende parameters van deze scenario's en in de volgende paragrafen wordt verkend in hoeverre de impact voor de natuur onder deze twee scenario's verschilt.

| | | G | G+ | W | W+ |
|---|--|--------|--------|--------|--------|
| Wereldwijde temperatuurstijging | | +1°C | +1°C | +2°C | +2°C |
| Verandering in luchtstromingspatronen in West Europa | | nee | ja | nee | ja |
| Winter | gemiddelde temperatuur | +0,9°C | +1,1°C | +1,8°C | +2,3°C |
| | koudste winterdag per jaar | +1,0°C | +1,5°C | +2,1°C | +2,9°C |
| | gemiddelde neerslaghoeveelheid | +4% | +7% | +7% | +14% |
| | aantal natte dagen (≥0,1 mm) | 0% | +1% | 0% | +2% |
| 10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden | | +4% | +6% | +8% | +12% |
| hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar | | 0% | +2% | -1% | +4% |
| Zomer | gemiddelde temperatuur | +0,9°C | +1,4°C | +1,7°C | +2,8°C |
| | warmste zomerdag per jaar | +1,0°C | +1,9°C | +2,1°C | +3,8°C |
| | gemiddelde neerslaghoeveelheid | +3% | -10% | +6% | -19% |
| | aantal natte dagen (≥0,1 mm) | -2% | -10% | -3% | -19% |
| | dagsom van de neerslag die eens in de 10 jaar wordt overschreden | +13% | +5% | +27% | +10% |
| potentiële verdamping | | +3% | +8% | +7% | +15% |

Tabel 3.2a. Kentallen voor neerslag, temperatuur en verdamping uit de scenario's G (verwerkt in Deltascenario Rust) en W+ (verwerkt in Deltascenario Stoom) t.o.v. de referentieperiode 1976-2005. Onder "winter" wordt verstaan december, januari en februari, onder "zomer" wordt verstaand juni, juli en augustus. Uit: Bruggeman, W. et al. 2011. Deltascenario's. In de KNMI scenario's 2014 wordt scenario G iets anders benoemd, nl. GL. Scenario W+ heet in de nieuwe terminologie WH. Ook de kentallen van het KNMI 2014 scenario wijken (licht) af van het KNMI 2006 scenario maar niet zodanig dat dit de hoofdlijn van de voorliggende rapportage zou beïnvloeden.

Deltascenario's: overzicht kentallen

| Klimaatverandering | Zichtjaar | referentie | STOOM | | RUST | |
|---|-----------|------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 2000 | 2050 | 2100 | 2050 | 2100 |
| gem. afvoer Rijn in februari (m ³ /s) ¹ | | 2.900 | 3.400 | 4.000 | 3.100 | 3.200 |
| gem. afvoer Rijn in september (m ³ /s) | | 1.800 | 1.300 | 900 | 2.000 | 2.100 |
| gem. afvoer Maas in februari (m ³ /s) | | 480 | 530 | 590 | 500 | 520 |
| gem. afvoer Maas in september (m ³ /s) | | 89 | 48 | 30 | 92 | 94 |
| zeespiegelstijging (cm) | | - | 35 | 85 | 15 | 35 |
| extreem hoge afvoer Rijn 1 / 100 jaar (m ³ /s) | | 12.000 | 14.000 | 17.000 | 13.000 | 14.000 |
| extreem hoge afvoer Maas 1 / 100 jaar (m ³ /s) | | 2.900 | 3.200 | 3.600 | 3.000 | 3.200 |
| extreem lage afvoer Rijn 1 / 10 jaar (m ³ /s) | | 630 | 520 | 420 | 650 | 670 |
| extreem lage afvoer Maas 1 / 10 jaar (m ³ /s) | | 18 | 10 | 6 | 18 | 18 |
| gemiddelde neerslaghoeveelheid winter | | | + 14% | + 28% | + 4% | + 7% |
| gemiddelde neerslaghoeveelheid zomer | | | - 19% | - 38% | + 3% | + 6% |

| Sociaaleconomische ontwikkeling | Zichtjaar | referentie | STOOM | | RUST | |
|---------------------------------|-----------|------------|-------|-----------|------|---------|
| | | 2000 | 2050 | 2100 | 2050 | 2100 |
| aantal inwoners NL (miljoen) | | 16 | 20 | 24 | 15 | 12 |
| economische groei (% per jaar) | | | 2,6 | 2,0 - 2,6 | 0,7 | 0 - 0,5 |
| verstedelijking (% oppervlak) | | 16 | 20 | 25 | 17 | 10 |
| landbouwareaal (% oppervlak) | | 67 | 59 | 70 | 62 | 67 |
| natuur (% oppervlak) | | 17 | 21 | 5 | 21 | 23 |

| | |
|--|--|
| veel klimaatverandering (W+) | |
| matige klimaatverandering (G) | |
| hoge ruimtedruk (Global Economy, en na 2050 Groei van bevolking en economie) | |
| lage ruimtedruk (Regional Communities, en na 2050 Krimp van bevolking en economie) | |

Tabel 3.2b. Kengetallen van de deltasenario's Stoom (rood) en Rust (groen). Zeespiegelstijging is exclusief een bodemdaling van ca. 10 cm per eeuw. Uit: Bruggeman W. et al. 2011. Deltascenario's.

3.3 Waarin verschillen voor de natuur de scenario's tot 2050?

Onder het scenario Stoom zal de natuur het moeilijker krijgen dan onder het scenario Rust – zoveel is duidelijk. Voor kwantificeren ontbreken de gegevens en zijn de onderlinge relaties te complex. Wél is aan te geven welke parameters er waarschijnlijk voor gaan zorgen dat er verschillen tussen beide scenario's optreden. Dat doen we hieronder puntsgewijs, waarbij we in feite de effecten die eerder zijn beschreven samenvatten onder de verschillende "stimuli" die van klimaatverandering uit gaan.

- **Temperatuur.** De temperatuur gaat omhoog maar ook de interjaarlijkse variatie van de (zomer)temperatuur neemt toe. De afstand tussen "zeer koud" en "zeer warm" wordt dus groter. Onder Stoom is de verwachte, gemiddelde temperatuurstijging 2,5 (zomer) tot 3 keer (winter) zo hoog (en dus evenzovele malen sneller!) als onder Rust. De tijd die de natuur krijgt om te reageren is dus onder Stoom 2,5 – 3 keer zo kort als onder Rust en voor sommige soorten zal dat wellicht te kort zijn. Verhoogde temperatuur heeft ook een slechtere waterkwaliteit tot gevolg. De zomer- en winterextremen liggen in Stoom verder uit elkaar dan in Rust. De warmere winter onder Stoom (gemiddeld +2,3°C i.p.v. +0,9°C) kan resulteren in lagere reproductie van schelpdieren in de Waddenzee en Zuidwestelijke Delta. De warmere zomer kan leiden tot grotere drukte en derhalve minder rust in de kustgebieden (strand, duinen en wad) en het rivierengebied. Dat kan echter ook positief uitpakken: meer belangstelling voor deze fraaie en waardevolle landschappen en meer bereidheid te investeren in het behoud ervan.
- **CO₂.** Niet vermeld in de Deltascenario's maar van belang voor de natuur⁴⁰ (en de land- en tuinbouw). Een hogere CO₂-concentratie in de atmosfeer verlaagt namelijk de hoeveelheid

⁴⁰ Dit effect speelt nauwelijks onder bemeste omstandigheden. Daar wordt de grotere watergebruiksefficiëntie vaak gecompenseerd door een toename in productie.

water die de plant verdampt per eenheid van biomassa-productie. Op voedselrijke bodems waar vocht de limiterende factor is kan dit zich uiten in een sterkere plantengroei maar op voedselarme bodems waar de productie van meer biomassa niet mogelijk is vanwege groeibeperking door stikstof of fosfor, zal dit resulteren in een lagere verdamping. In Stoom zal dit effect groter zijn dan in Rust maar voor beide scenario's is het gecombineerde effect van temperatuurstijging en verhoging van het CO₂-niveau op verdamping en bodemvocht niet exact bekend.

- **Neerslag.** In Stoom neemt de winterneerslag ruim 3 keer zo sterk toe als onder Rust. Indien wordt vastgehouden aan een strikt peilbeheer zal er meer moeten worden gespuid met heftiger zoetwaterpulsen en sterfte van bodemleven in het kustgebied als gevolg. De zomerneerslag neemt in Rust licht toe en in Stoom sterk af (-19%). Dat laatste betekent dat een duurzame zoetwatervoorziening t.b.v. natuur, landbouw, boomteelt en peilhandhaving onder Stoom een nog forsere uitdaging vormt dan nu al het geval is.
- **Verdamping.** Onder Stoom is de toename van de verdamping 5 keer zo hoog als onder Rust. Of dit werkelijk het geval is, is onzeker omdat het gaat om de potentiële referentieverdamping. De actuele verdamping valt vaak lager uit, zeker bij droogte, bijv. omdat het dempende effect van de vergrote waterefficiëntie van planten bij hogere CO₂ concentraties niet is verdisconteerd.
- **Wind en storm.** Onder Stoom zal de hoogste daggemiddelde windsnelheid iets meer toenemen dan onder Rust (4% t.o.v. 0%). Naar verwachting levert dit weinig direct effect op hoewel het zijn uitwerking op de verdamping zal hebben (zie hierboven). Voor rukwinden – zie volgende bullet.
- **Extremen.** Extremen (zoals hoosbuien met windvlagen) zullen vermoedelijk vaker gaan voorkomen en heftiger worden (KNMI mond med.). Daaronder ook hagelbuien die lokaal tot het afhagelen van blad kunnen leiden en rukwinden waardoor bomen of delen van bossen omwaaien. Op zich is dit een natuurlijk proces dat leidt tot cyclische verjonging maar het trekt wel maatschappelijke aandacht en kan, als bomen op infrastructuur vallen, ontwrichtend werken. Als extremen vaker gaan voorkomen neemt ook de kans toe dat ze kort achter elkaar gaan voorkomen. Zo neemt de kans op extreme droogte (referentie het droge jaar 2003) onder W+ zodanig toe dat die eens in de 1-3 jaar zal voorkomen. De kans dat er twee van deze droge periodes achter elkaar zullen zitten, is dan groot. Vooral dat laatste kan negatieve gevolgen hebben voor de natuur omdat deze dan onvoldoende hersteltijd krijgt. Dit speelt ook bij voorjaarsstormen. Of deze vaker gaan voorkomen is niet bekend, maar indien dat zo is wordt de kans dat de eieren van wadvogels wegspoelen in twee achtereenvolgende jaren groter. Effecten van extremen zullen onder Stoom heftiger zijn dan onder Rust, maar kwantitatieve gegevens ontbreken.
- **Rivierafvoer gemiddeld en extreem.** In Stoom ligt de gemiddelde winterafvoer ongeveer 10% - 15% hoger dan in Rust. Voor de gemiddelde zomerafvoer zijn de trends onder beide scenario's tegengesteld: onder Stoom 30% lager op de Rijn en zelfs 50% lager op de Maas; onder Rust is er juist een wat hogere zomerafvoer (+10% op de Rijn en + 3% op de Maas). Voor de extremen geldt iets vergelijkbaars. Het hoogwaterextreem ligt onder Stoom hoger dan onder Rust, op beide rivieren. Het laagwaterextreem ligt onder Stoom veel lager dan nu (afname 45% op de Maas, bijna 20% op de Rijn) terwijl het onder Druk juist iets gunstiger (Rijn) wordt of niet veranderd (Maas) t.o.v. de huidige situatie. Het overstromingsrisico neemt op beide rivieren dus in beide scenario's licht toe. In de zomer neemt vooral onder Stoom het waterpeil sterk af. Vooral de maatschappelijke respons ('hoe gaan we het probleem oplossen?') zal bepalen of de gevolgen voor de natuur negatief of positief zullen zijn.
- **Zeespiegelstijging.** Deze is onder Stoom ruim twee keer zo hoog als onder Rust en gegeven de vaste tijdsperiode betekent dit dus ook dat het twee keer zo snel gaat: in Stoom met ongeveer 6mm per jaar tot 2050 (en in de periode 2050-2100 met ongeveer 10 mm per jaar).

Indien de natuur niet zou (of kan) reageren zou het areaalverlies aan kwelders en platen in Stoom dus circa twee keer zo hoog zijn als onder Rust. De natuur reageert echter wel en de verwachting is dat kwelders beide scenario's aankunnen. Voor platen is dat onzeker; duidelijk is dat het "opbouwend vermogen" onder Stoom meer zal worden angesproken dan onder Rust en dat het sediment invangend vermogen zeker onder Stoom (maar eigenlijk in beide scenario's) zoveel mogelijk op peil moet worden gebracht.

- **Aantal inwoners.** Dit is onder Stoom 25% hoger dan nu en onder Rust ruim 5% lager dan nu. Dit zal zijn weerslag hebben op woonkernen en infrastructuur (zie volgende bullet) maar ook op de behoefte aan recreatieruimte. Zeker indien de trend om in steden te wonen toeneemt. De behoefte aan meer natuur en landschap zal onder Stoom dus sterker toenemen met positieve gevolgen voor de natuur (zie ook een na laatste bullet).
- **Economische groei.** Onder Stoom is dit 2,6% per jaar en onder Rust 0,7%. Een verschil in impact op de natuur tussen beide scenario's is niet op voorhand te identificeren.
- **Verstedelijking.** De stedelijke bebouwing groeit onder Stoom van de huidige 16% areaal naar 20% in 2050. Onder Rust blijft het bij 17%. Omdat stedelijke uitbreiding plaatsvindt op landbouwareaal zal dit areaal-effect geen directe gevolgen hebben voor de natuur.
- **Natuur.** Onder zowel Stoom als Rust neemt het areaal toe van 17% nu naar 21% in 2050. Dat is een uitbreiding van 25% en als die er daadwerkelijk komt biedt dat zeker kansen voor meer veerkracht in de natuur.
- **Landbouwareaal.** Dit neemt onder Stoom af van de huidige 67% areaal tot 59% in 2050. In Rust is de afname wat minder: naar 62%. De areaalvermindering komt op het conto van verstedelijking en uitbreiding natuurareaal.

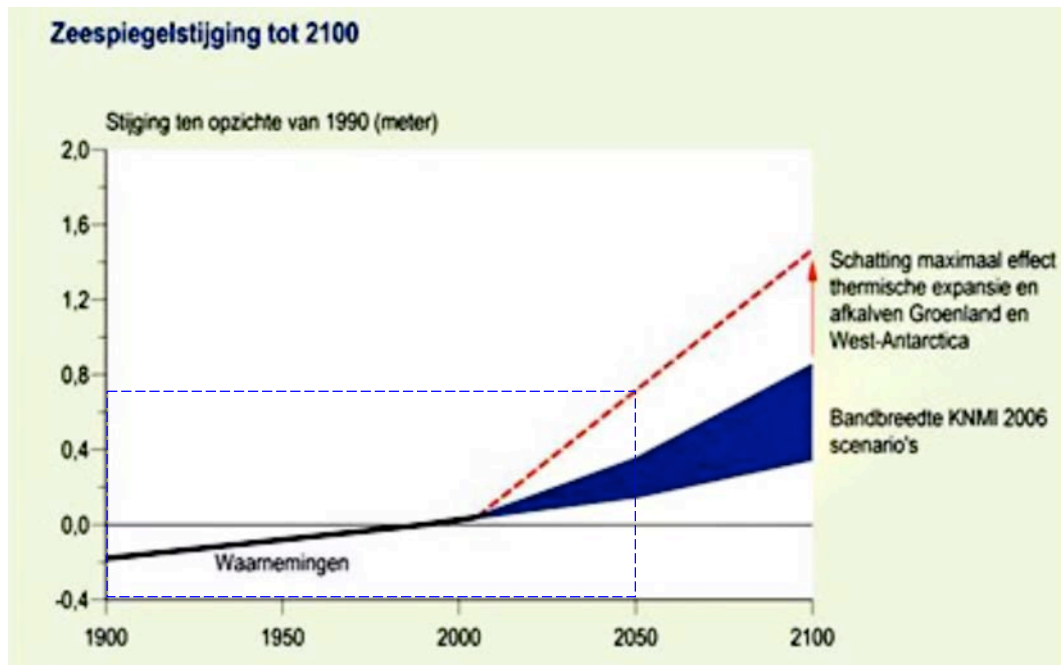
3.4 Worst case scenario's

3.4.1 Gerelateerd aan onzekerheden in en interpretaties van klimaatscenario's

Het eerste type worst-case scenario heeft betrekking op onzekerheden in de klimaatscenario's. De Deltascenario's gaan uit van een zeespiegelstijging van maximaal 85 cm in 2100⁴¹. Maar er zijn ook extremere verwachtingen waarbij wordt uitgegaan van meer uitzetting van oceaانwater en afsmelten van ijskappen. Het MNP (2007) bijvoorbeeld, gaf in de studie *Nederland Later* een worstcase zeespiegelstijging voor Nederland van ongeveer 1,5 meter per eeuw.

Een zeespiegelstijging van meer dan een meter per eeuw is waarschijnlijk niet meer op te vangen door de geomorfologische processen in de Waddenzee. Het worst case klimaatscenario vertaalt zich dus direct in een worst case scenario voor de Wadden: het gebied verdrinkt, huidige planten, dieren en landschappen verdwijnen, de belangrijkste economische pijler (toerisme en recreatie) onder dit gebied valt weg, huizenprijzen dalen, werkloosheid loopt op, leegloop en verpaupering slaan toe. In zekere zin voltrekt dit scenario zich nu deels al in de Oosterschelde, waar de Oosterschelde dam een vrije uitwisseling van sediment zodanig hindert dat oevers en platen eroderen en de basis van het ecosysteem ernstig verzwakt.

⁴¹ In de nieuwe KNMI 2014 scenario's WL en WH ligt de verwachte bovengrens van de zeespiegelstijging iets hoger.



Figuur 3.4.1. Waarnemingen van de zeespiegelstijging en scenario's van het KNMI. Als het maximale effect van het afkalven van ijskappen en thermische expansie wordt meegenomen kan de zeespiegelstijging in 2050 max ca. 75 cm bedragen (vgl. KNMI 35 cm) en in 2100 max 1,50 m (vgl. KNMI 85 cm).⁴²

3.4.2 Wild Cards

In deze categorie vallen extreem ver doorgevoerde cascade effecten. Voorbeeld: er breekt een bosbrand uit op de noordelijke Veluwe; infrastructuur (wegen, communicatie) wordt onbruikbaar; 200 bewoners van een recreatiegebied vinden de dood, de economische schade loopt in de miljarden; als reactie worden omvangrijke stroken bos op de Veluwe en elders in het land gekapt vanuit de veronderstelling dat daarmee een vergelijkbare bosbrand in de toekomst kan worden voorkomen.

3.4.3 Missen van kansen voor open doel

Een realistisch worst-case scenario is naar onze mening dat in het huidige beleid en de uitvoeringspraktijk kansen om klimaatbestendige oplossingen te kiezen worden gemist. Soms is dat het geval omdat een zeer extreme situatie als reëel vertrekpunt wordt gehanteerd (een afvoer van 18.000 m³/s bij Lobith en alles daarvoor laten wijken). In andere gevallen wordt vastgehouden aan modeluitkomsten en berekeningen zonder de beperkingen daarvan in conclusies en afwegingen te betrekken. De vindingrijkheid en innovatiekracht waarmee Nederland een mondiale speler is geworden op het gebied van watermanagement wordt zo onvoldoende benut en uitgebouwd.

Bij voorbeeld: bij rivierveiligheidsmaatregelen blijven we nationaal denken. We negeren de mogelijkheid om samen met Duitsland in te zetten op het vasthouden van water in nieuw te ontwikkelen, natuurlijke sponzen (wetlands) in de Middengebergten. Want "modelberekeningen laten zien dat dit niet werkt". We doen dus niets om nog hogere piekafvoeren te voorkomen. Omdat we dat niet doen en "veiligheid voor alles" gaat, gaan we het rivierengebied in ons land *end of pipe* inrichten op een extreem debiet van 18.000 m³/s bij Lobith. Let wel: het hoogste debiet ooit bereikt is 12.300 m³/s! Daartoe wordt alle natuur uit de uiterwaarden verwijderd want struweel en oobos remmen de afstroming. Omdat we ons zorgen maken over de sterkte van de dijken, gaan we die breder en hoger maken. Vanwege

⁴² Bron: KNMI en NMP.
http://www.knmi.nl/faq_klimaat/gevolgen/hoe%20snel%20stijgt%20de%20zeespiegel.htm

het feit dat we ook met lagere waterstanden te maken krijgen en de vaargeul niettemin op diepte willen houden, concentreren we het water in de zomerperiode nog meer dan nu in een smalle zone in het zomerbed. Daartoe leggen we stenen langsdammen aan, parallel aan de rivieroever. Zo ontstaat een kanaal in een rivier. Het resultaat is een sterk verarmd landschap, tegen enorme kosten uitsluitend ingericht op scheepvaart en afvoer van hoogwater, zonder ruimte voor natuur, ruimtelijke kwaliteit, recreatie en prettig leefklimaat. Het rivierengebied dat de laatste jaren meer en meer ontdekt wordt door recreanten, verliest daarmee het groeiende aantal ondernemers (geld en banen) dat in die sector werkzaam is.

4. Kansen en handelingsperspectief

In 4.1. wordt de belangrijkste bevindingen tot nu toe samengebond, met als conclusie dat een klimaatadaptatiestrategie voor de natuur noodzakelijk is. In 4.2. wordt uiteengezet dat we met ons eigen handelen in hoge mate bepalen of klimaatverandering voor de natuur een kans wordt of een bedreiging. In 4.3. wordt behandeld welke aanknopingspunten er zijn om tussen nu en 2030 zo'n klimaatadaptatiestrategie handen en voeten te geven. In 4.4. verkennen we welke raakvlakken er zijn met de andere thema's die in de Nationale Klimaatadaptatie Strategie (NAS) een plek krijgen en welke kansen dat oplevert. In 4.5 geven we een aantal aandachtspunten mee voor de verdeling van verantwoordelijkheden binnen zo'n Klimaatadaptatiestrategie.

4.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken is duidelijk geworden dat:

- klimaatverandering effecten heeft op de natuur, zowel op het abiotische deel (zeespiegelstijging, hogere temperatuur, natter/droger worden etc.) als op het biotische deel (fenologische verschuivingen, range shifts etc.).
- die effecten op de natuur zich vertalen in een breed scala aan effecten op de maatschappij (uitval zoetwatervoorziening t.g.v. verzilting en/of verminderde aanvoer, frequentere uitval elektriciteitscentrales door opwarming koelwater, slechte zwemwaterkwaliteit, bosbranden, hoger overstromingsrisico etc.).
- er dus aanleiding is om in de Nationale Adaptatiestrategie beleid en maatregelen op te nemen die er toe leiden dat de natuur de klimaatverandering kan overleven of er zelfs van kan profiteren. De natuur heeft vooral ook tijd nodig om te reageren op klimaatverandering: hoe eerder adaptatiebeleid in de praktijk wordt gebracht, hoe groter de tijdspanne voor de natuur om daarvan te profiteren en hoe groter de kans dat eventuele onomkeerbare effecten kunnen worden voorkomen.
- een adaptatiestrategie in hoofdlijnen gericht moet zijn op behoud en ontwikkeling van grote natuurarealen (want deze vergroten de genetische diversiteit en daarmee het vermogen tot genetische en fenotypische aanpassing) en verbindingen tussen gebieden (want deze vergroten het vermogen tot migratie). Daarnaast is het behoud of herstel van natuurlijke processen van belang: geomorfologische processen (zoals sedimentatie om zeespiegelstijging bij te kunnen houden) en ecologische (zoals migratie en successie) om veranderingen in soortensamenstelling binnen een systeem mogelijk te maken.

De natuur heeft echter niet alleen te maken met de gevolgen van klimaatverandering. Ook de wijze waarop we ons als maatschappij voorbereiden op de gevolgen van klimaatverandering is van cruciaal belang. Heini Kujala⁴³ die werkt aan het modelleren van de gevolgen van klimaatverandering voor de natuur zegt daarover: *while striving to reduce epistemic uncertainty is important in climate change and conservation research, other sources of uncertainty such as socio-political factors or volitional human behaviour might constitute far larger determinants of successful conservation actions, and therefore merit stronger focus in research.*

4.2 Maatschappelijke respons als bedreiging en kans

Klimaatverandering werkt in op (besluiten in) de samenleving en dat heeft grote gevolgen voor de natuur – positief of negatief. We illustreren dat met enkele voorbeelden.

In het Deltaprogramma wordt voorzien dat we rekening moeten houden met nog hogere rivierafvoeren dan die waarop Ruimte voor de Rivier (nu in uitvoering) is afgestemd. Als we er voor kiezen ons daartegen te wapenen met dijkversterking en verwijderen van natuurlijke

⁴³ Heini Kujala. 2012. Climate change, species range shifts and uncertainty : A new era of conservation planning.

(hoge) vegetatie in de uiterwaarden werkt dat sterk negatief op de natuur. Als we ervoor kiezen om hogere afvoerpieken te voorkomen door neerslag bovenstrooms tijdelijk vast te houden in nieuw te ontwikkelen natuurgebieden, werkt dat juist zeer positief voor flora en fauna. Ook het werken met natuurlijke vooroevers i.p.v. het met steen versterken van dijken betekent dat werken aan rivier- en kustveiligheid positief uitpakt voor de natuur in plaats van negatief. Als we oprukkende verzilting weg willen houden van zoetwaterinnamepunten door zeearmen af te sluiten of afgesloten te houden, werkt dat negatief uit voor de estuariene natuur en visintrek. Als we in die oprukkende verzilting aanleiding zien om innamepunten veel verder landinwaarts te verplaatsen en zeearmen verder te openen kan dat juist positief werken omdat dit ruimte biedt voor het herstel van contact tussen zee en rivier.

Ook in Hoog Nederland spelen dergelijke keuzes. Zo is daar van groot belang dat een zorgvuldig voorraadbeheer van grondwater plaatsvindt. Dit betekent dat de snelle afvoer van neerslagwater vermeden moet worden. Als we proberen de afvoer te vertragen met (meer) stuwen in beken is dit een maatregel die negatief werkt op de natuur omdat o.a. de migratiemogelijkheden voor vis hierdoor worden beperkt. Wordt ingezet op het inrichten van inzigggebieden⁴⁴ waarin het regenwater wordt opgevangen al voordat het een beekloop bereikt dan werkt dit zeer positief. Vanuit dergelijke gebieden kunnen niet alleen de grondwatervoorraden worden aangevuld maar het natuur- en recreatie areaal neemt met dergelijke gebieden toe. Dat laatste sluit dan weer goed aan op een andere maatschappelijke respons die naar verwachting door klimaatverandering zal plaatsvinden.

Bij oplopende temperaturen zal een grotere behoefte ontstaan aan recreëren in een groene omgeving. Hoewel de actieradius van de recreant fors is, kan die behoefte zich ook vertalen in een behoefte naar meer groen bij of in de stad. Bij de inrichting van die “groengebieden” is dan de keuze aan de orde waarop wordt ingezet: vergroten van het natuurareaal of vergroten van het areaal plantsoen. Het eerste draagt bij aan een duurzame toekomst van de natuur in ons land, het tweede is zonder veel betekenis voor de veerkracht van de natuur.

Vooral de manier waarop we als samenleving omgaan met de (verwachte) gevolgen van klimaatverandering heeft een grote invloed op de overlevings- en ontwikkelingskansen voor de natuur.

Bovenstaande voorbeelden illustreren dat werken aan verbindingen, grote arealen en (aanspreken of herstel van) natuurlijke processen kan plaatsvinden binnen het natuurbeleid, maar ook en vooral daarbuiten. In 4.3 gaan we in op de beleidsterreinen die bepalend zijn voor het (klimaat)adaptief vermogen voor de natuur en de kansen die binnen die beleidsterreinen spelen tussen nu en 2030. In 4.4. gaan we, voor zover niet eerder behandeld, in op raakvlakken met de andere thema's en kansen die op die raakvlakken spelen. We concentreren ons op de mogelijke positieve relaties en gaan niet in op de negatieve omdat we op zoek zijn naar handelingsperspectief. We geven steeds een korte duiding van de kansen want een meer gedetailleerde uitwerking van de mogelijkheden is binnen het bestek van deze rapportage niet mogelijk

4.3 Aanknopingspunten in het beleid en uitvoeringspraktijk

Op diverse terreinen is beleid in ontwikkeling dat, afhankelijk van de keuzes die *nu* worden gemaakt, bepalend is voor het zicht op een klimaatbestendige natuur. Oplettendheid en actie is urgent bij de volgende beleidsterreinen.

⁴⁴

Ook in Laag-Nederland is het vasthouden van neerslagwater een goede maatregel voor zowel het waterbeheer als de natuur omdat dit de hoeveelheid rivierwater (wat rijker is aan nutriënten en soms ook aan zout) die moet worden ingelaten beperkt.

4.3.1 Europees landbouwbeleid

Er wordt gewerkt aan een nieuw Europees landbouwbeleid. De gedachte is dat betalingen in de toekomst meer gekoppeld worden aan de duurzame bijdrage die boeren op hun areaal gaan leveren aan natuur en landschap. Een van de uitwerkingen van die gedachte is dat elke agrariër een percentage van zijn land moet inrichten ten behoeve van natuur. Hier ligt een kans om via een gecoördineerde aanpak deze zo te positioneren dat ofwel grote aaneengesloten arealen ontstaan ofwel verbindingzones. Een andere relevante uitwerking is dat boeren zich om voor subsidie in aanmerking te komen, moeten organiseren in collectieven. Daarmee wordt onder meer beoogd dat agrarisch natuur- en landschapsbeheer zich concentreert in de meest kansrijke gebieden. En dat een koppeling wordt gelegd met onder andere waterbeheer en klimaatadaptatie (zoals waterberging).

4.3.2 Nederlands natuurbeleid

In de Rijksnatuurvisie⁴⁵ die dit jaar verscheen, wordt het ruimte geven aan natuurlijke processen als een belangrijke pijler van het natuurbeleid benoemd. Dit vergt, zo wordt gesteld, een aanpak op landschapsschaal en intensieve samenwerking tussen sectoren. Natuurlijke processen spelen niet alleen in wildernislandschappen een doorslaggevende rol, maar, afhankelijk van de ruimte die daaraan geboden wordt, ook in de stadsnatuur, de natuur van het moderne cultuurlandschap en het half-natuurlijke landschap van heidevelden, blauwgraslanden en hakhout, dat afhankelijk is van traditioneel agrarisch beheer. Dit biedt kansen voor klimaatadaptatie want juist het ruimte geven aan natuurlijke processen is een goede methode om klimaatbestendige natuur te realiseren. Bij klimaatadaptatie (het woord zegt het al) gaat het er immers niet om de verandering te blokkeren maar juist te faciliteren op een wijze die natuurbehoud en –ontwikkeling ten goede komt. Natuurlijke dynamiek die zich soms uit in het lokaal verdwijnen en verschijnen van soorten hoort daar bij. Bovendien biedt een aanpak op landschapsschaal de mogelijkheid om dit te combineren met andere functies zoals waterberging, recreatie en wonen. De uitdaging is om een systeem van betaling en monitoring te ontwikkelen dat aansluit bij deze flexibiliteit, d.w.z. beheersplannen, financiële prikkels (positief en negatief) en monitoring die geënt zijn op het realiseren van essentiële randvoorwaarden (oppervlakte, lage NH₃-depositie, herstel regionale hydrologie etc.) i.p.v. van op doelsoorten en natuurdoeltypen. De natuurvisie meldt dat het kabinet er op inzet dat het Europese natuurbeleid een zwaarder accent legt op natuurlijke dynamiek. Een actie die daarbij aansluit is het op Europese schaal meer samenwerken op het niveau van het Europese natuurnetwerk en de biogeografische regio waartoe Nederland behoort en bepalen welke inzet het best kan plaatsvinden om op Europese schaal de natuur weer op orde te brengen. Verder wil Nederland een conferentie organiseren om op Europese schaal dynamische natuurontwikkeling te bereiken waar het Europese netwerk als geheel sterker van wordt.

4.3.3 Europees natuurbeleid

Binnen Europa is er een project “Green Infrastructure”. De gedachte is dat in allerlei (niet-natuur)beleidsterreinen rekening gehouden moet worden met de behoefte aan een samenhangend netwerk van natuurgebieden en een robuuste en veerkrachtige natuur. Dit sluit zeer goed aan bij datgene wat nodig is om de natuur in ons land (en Europa) klimaatbestendig te maken: grote gebieden en verbindingen daartussen. Er lijkt op dit moment weinig aandacht uit te gaan naar dit beleid-in-ontwikkeling terwijl er wel grote kansen liggen.

4.3.4 Deltaprogramma

In het Deltaprogramma wordt vastgelegd hoe Nederland zich gaat bewapenen tegen de impact van klimaatverandering op het waterbeheer. De conceptversies laten een mix van

⁴⁵ Ministerie van Economische Zaken. 2014. Natuurlijk Verder. Rijksnatuurvisie 2014.

“kansrijke strategieën” zien. Omdat in het kader van het Deltaprogramma vele inrichtings- en beheersmaatregelen worden genomen, is het van belang de kansen die er zijn zo goed mogelijk te benutten. Kansen die (nog) niet (volledig) zijn benut zijn:

- oostelijker innemen van zoetwater
- breder benutten van meekoppelkansen (combineren rivierveiligheid of zoetwatervoorziening met natuurbehoud en -ontwikkeling)
- ruimtelijke kwaliteit en natuurbehoud opnemen als expliciete (neven)doelstellingen van projecten die de afvoercapaciteit van de rivieren na 2015 nog verder moeten vergroten (i.t.t. tot het programma Ruimte van de Rivier waarin van zo'n dubbeldoelstelling sprake was, is dat in het Deltaprogramma Rivieren nog niet het geval).

4.3.5 Hoogwaterbeschermingsprogramma

Het Hoogwaterbeschermingsprogramma is in uitvoering genomen in 2014. Het zal dijktraject voor dijktraject werken aan sterkere (en niet zozeer hogere) dijken. Dijken die het meest risicovol zijn, worden het eerst aangepakt. Dit hoogwaterbeschermingsprogramma kan in potentie bijdragen aan meer veerkracht (groter areaal en verbindingen) van de natuur. Ten eerste door de klei die bij dijkversterkingen nodig zal zijn, te winnen in uiterwaarden die zich lenen voor “reliëfvolgend ontgronden” (= herstel historische geulen) en natuurontwikkeling. Met deze aanpak zijn goede ervaringen opgedaan in het verleden (dijkversterkingen kort na de hoogwaters van 1993 en 1995). Ten tweede door bij de dijkversterking een kleine extra overhoogte (bijv. 5 cm) op de dijk te creëren ten behoeve van de natuur. Daarmee kan voorkomen worden dat de natuurlijke vegetatieontwikkeling in de uiterwaarden (struweel, oobos) steeds moet worden afgekapt, letterlijk, omdat dit teveel opstuwung in het winterbed zou veroorzaken. Deze opstuwung t.g.v. vegetatie varieert per locatie maar is veelal ordegrrootte 5 cm. Grootschalig snoei – en kapwerk (zoals nu met het programma Stroomlijn) kan dus met een iets verhoogde dijk worden voorkomen. Een iets verhoogde dijk kan ook worden opgewaardeerd tot robuuste klimaatdijk – een dijk die zo breed is dat er ruimte is voor andere functies op die dijk zoals wonen.

4.3.6 Klimaatbuffers

Sinds 2006 werken Nederlandse natuurorganisaties samen met I&M aan de realisatie van natuurlijke klimaatbuffers⁴⁶. Dit zijn gebieden die zo worden ingericht dat ze als “ecosysteemdienst” het dempen van de effecten van klimaatverandering leveren. De ontwikkeling van natuur wordt in deze gebieden dus ingezet als middel om de gevolgen van klimaatverandering te helpen opvangen. Het initiatief bestaat nu uit 28 projecten; het merendeel betreft veldprojecten, een ander deel strategische projecten.

In het kader van dit project is, onder meer op grond van ervaringen in 19 veldprojecten, ook in beeld gebracht in hoeverre de klimaatbufferaanpak – waar die mogelijk is – directe kostenbesparingen kan opleveren in vergelijking met een traditionele aanpak. In de studie werd gebruik gemaakt van zowel onderzoek van derden als van gegevens die direct uit de uitvoeringspraktijk van de projecten beschikbaar waren. Er werd bewust voor gekozen om alleen de directe, “harde” financiële opbrengsten in ogenschouw te nemen, d.w.z. dat maatschappelijke baten die niet direct monetariseerbaar zijn niet in beschouwing werden genomen. Ondanks deze beperking komt uit de studie naar voren dat een klimaatbufferaanpak vaak (maar niet altijd) kostenneutraal of goedkoper is dan een traditionele benadering. In tabel 4.3 wordt een overzicht van gegeven van het type maatregelen waarom het gaat en de financiële opbrengsten (of vermeden kosten) die daarmee samenhangen. In box 5 hierna wordt een voorbeeld nader uitgewerkt.

⁴⁶ Natuurlijke klimaatbuffers. Adaptatie aan klimaatverandering, wetlands als waarborg. Stroming in opdracht van Natuurmonumenten, Vogelbescherming, Staatsbosbeheer, ARK Natuurontwikkeling en Waddenvereniging.

Onder de noemer “meekoppelen” of “meekoppelkansen” zetten natuurorganisaties er op in de klimaatbufferbenadering breder geïmplementeerd te krijgen.

Box 5 - Klimaatbufferproject De Onlanden: natuur zeer kostenbesparend

Het klimaatbufferproject De Onlanden beslaat 2200 hectare; grote delen zijn in handen van Staatsbosbeheer en Natuurmonumenten. De kosten voor verwerving en inrichting van het gebied t.b.v. de combinatie van natuurontwikkeling en waterberging (want dat was het doel) bedroegen 33 Meuro. Daarnaast werd 9 Meuro geïnvesteerd in recreatieve voorzieningen. Totale kosten voor deze multifunctionele klimaatbufferbenadering bedroegen dus 42 Meuro. Het alternatief zou een monofunctionele kadeverhoging zijn geweest in een groot gebied daaromheen. Kosten daarvan: 115 Meuro. Het voordeel van “bouwen met de natuur” is hier dus zeer groot: 82 MEuro (71%). Als de inrichting t.b.v. recreatie wordt meegenomen bedraagt de besparing 73 Meuro (63%).

Voor het waterschap is de kostenbesparing nog hoger, nl. 86%. De 115 MEuro voor de kadeverhoging zouden namelijk voor 100% voor rekening zijn gekomen van het Waterschap. In het klimaatbufferproject waren er – vanwege de multifunctionaliteit- meerdere financiers. Het waterschap droeg de helft van de inrichtingskosten t.b.v. natuur en waterberging, dus 16,5 Meuro.

Cijfers: Waterschap Noorderzijlvest (met dank aan P. Vertegaal, Natuurmonumenten)

| Functie | Gevonden besparing / opbrengst | Financiële voordeel |
|--|--|---|
| Vooroever i.p.v. dijkversterking | Besparing van € 16 - € 3500 m ⁻¹ | Waterschappen, Rijkswaterstaat. |
| Overslagbestendige dijk i.p.v. dijkversterking | Besparing 30-70% (tot zelfs 35x zo voordelig) | Waterschappen, Rijkswaterstaat. |
| Recreatie | 2-3x zoveel inkomsten bij opengestelde natuur dan zonder natuur, € 5 - € 3.000 ha ⁻¹ jr ⁻¹ | Recreatieondernemer, gemeente, provincie. |
| CO ₂ -vastlegging (vrijwillige emissiehandel) | € 300 ha ⁻¹ jr ⁻¹ € 4.000 ha ⁻¹ | Bedrijven, Groenfonds, handelaren in vrijwillige emissierechten. |
| Grondstoffenwinning | Tot honderden miljoenen. | Zand-, klei- en grindwinners. Waterschappen en Rijkswaterstaat. |
| Waterzuivering loofbos | € 1.561 ha ⁻¹ jr ⁻¹ | Waterschappen, drinkwaterbedrijven. |
| Waterzuivering grasland | € 264 ha ⁻¹ jr ⁻¹ | Waterschappen, drinkwaterbedrijven. |
| Waterzuivering riet/ruigte | € 960 ha ⁻¹ jr ⁻¹ | Waterschappen, drinkwaterbedrijven. |
| Waterzuivering slik/schor/kwelder/plaat | € 1.148 ha ⁻¹ jr ⁻¹ | Waterschappen, drinkwaterbedrijven. |
| Natuurcompensatie | € 50.000 tot meer dan € 1 miljoen ha ⁻¹ | Waterschap, Rijkswaterstaat, provincie, gemeente, grondstoffenwinner. |
| Waterberging | € 88 - € 588 per m ³ € 68.160 tot € 223.500 ha ⁻¹ | |
| Huizenprijzen | Stijging 5-11% | Huizeigenaren, gemeentes. |
| Gezondheid door zuivering lucht (stof + NO _x): loofbos | € 9.135 - € 14.735 ha ⁻¹ jr ⁻¹ | - |
| Gezondheid door zuivering lucht (stof + NO _x): riet/ruigte | € 770 ha ⁻¹ jr ⁻¹ | - |
| Bestuiving cultuurgewassen | € 374 ha ⁻¹ jr ⁻¹ | Land- en tuinbouw (m.n. fruitteilers). |

Tabel 4.3.6. Mogelijke financiële opbrengsten van natuurlijke klimaatbuffers en de partijen die om die reden mogelijk geïnteresseerd zijn om in zo'n project te investeren. Uit: Stroming 2013. Mogelijkheden om geld te besparen met de inzet van natuur. Voor nadere onderbouwing en referenties t.a.v. de getallen wordt verwezen naar deze studie.

4.4 Kansen op het raakvlak met andere thema's

4.4.1 Transport over water

In het Deltascenario Rust blijven laagwatersituaties op de rivier ongeveer zoals ze nu zijn maar in scenario Stoom gaan lage waterstanden, zowel de gemiddeldes als de extremen, veel meer voorkomen (zie 3.2). De rivierbeheerder zet er op in dat een gegarandeerde vaardiepte (2,80 m voor de Waal) zoveel mogelijk wordt gehandhaafd. Maar dat wordt steeds moeilijker en levert ook spanning op met riviergeveiligheid, natuurontwikkeling en recreatie. De ontwikkeling van schepen met minder diepgang zou én het transport over water én de natuur én de afvoercapaciteit voor hoogwaters veel robuuster kunnen maken (zie box).

Box 6 - Innovatiekansen in de scheepvaart

Uitgangspunt op de Waal is een gegarandeerde vaardiepte (2,80 m) die nog wordt aangeboden bij een afvoer van 1020 m³/s Lobith. Deze afvoer wordt nu ongeveer 10 dagen per jaar onderschreden en dat betekent dat schepen dan niet volledig kunnen worden beladen. Dat is een economische schadepost van gemiddeld € 28 miljoen per jaar en in zeer droge jaren kan dat flink oplopen: in het droge jaar 2003 ordegrrootte € 100 miljoen⁴⁷. Door klimaatverandering gaan “extremen” vaker voorkomen en neemt de druk om meer te gaan baggeren toe. Maar dat is een eindige strategie: probleem is nl. niet de gemiddelde hoogteligging van de rivierbodemb maar de hoeveelheid water die beschikbaar is om over die bodem te stromen.

Waar het voor het onderhoud van de vaargeul zaak is de bedding bij lage waterstanden smal (en dus diep) te houden, is voor de afvoer van hoogwaters juist een brede bedding nodig. Bij rivierverruimende maatregelen in het winterbed is de rivierbeheerder bang dat de nevengeulen die daartoe worden aangelegd zoveel water aan het zomerbed onttrekken dat extra sedimentatie optreedt in de vaargeul. Met kunstgrepen (slechts eenzijdig aantakken van geulen en pas laat mee laten stromen) is dat deels op te lossen maar dat gaat ten koste van de ecologische functie. Er zit dus een forse, inherente spanning tussen het creëren van “Ruimte voor de Rivier” en het handhaven van de gegarandeerde vaardiepte/breedte. Met klimaatverandering zal die spanning toenemen want de extremen in de afvoer (= kritische hoogwater- en laagwatersituaties) nemen toe. Om de vaargeul op diepte te houden, wordt overwogen om langsdammen in de rivier te leggen, parallel aan de oevers. Daardoor zal de ruimtelijke kwaliteit en de beleving (o.a. vissers op kribben) van de rivier volledig verdwijnen en wordt ook het natuurlijke sedimenttransport van oever naar bedding en weer terug stilgelegd. Voor het ecologisch herstel (verplichting uit de Kaderrichtlijn Water) is het nodig meer natuurlijke oevers langs de rivier te realiseren. In de jaren 80 zijn veel oevers langs de IJssel, Maas en Nederrijn in de stortsteen gelegd. Daardoor zijn ze slecht begaanbaar voor recreanten en onbruikbaar voor natuur. Weghalen van deze verharding zodat weer natuurlijke strandjes ontstaan en steilrandjes met oeverwaluwen e.d. is nu meestal niet mogelijk omdat de zorg bestaat dat het vrij bewegende zand de vaargeul zal laten dichtlopen. Het is dus duidelijk dat de grenzen van onze huidige aanpak in zicht komen en klimaatverandering versnelt dat. Door schepen te ontwikkelen met minder diepgang, zou én het transport én de rivierbeheerder én de natuur én de recreant profiteren. Mogelijk kan het (energie-efficiënte) transport over water met ondiep stekende schepen zelfs verder komen dan nu omdat relatief ondiepe rivieren en kanalen voor deze schepen (weer) bevaarbaar worden.

4.4.2 Landbouw en tuinbouw

Landbouw (en zeker de boomteelt) heeft zoet water nodig van goede kwaliteit en met een grote mate van leveringszekerheid. Dit betekent dat deze sector gebaat is bij innamepunten die zo ver van zee liggen dat ze niet verzilten. Daarmee is ook de (klimaatbestendigheid van de) natuur zeer gebaat.

Een andere relatie ligt op verziltende gronden. De landbouw kan daar overschakelen op alternatieve, zilte teelten om nichemarkten te bedienen en dat is voor de natuur geen probleem. Een alternatief zou zijn om de verziltende landbouwgronden om te zetten in natuurgebieden om in ruil daarvoor hoogopgeslibde natuurgebieden om te zetten in landbouwgrond. Dit idee voor “wisselpolders” is enkele jaren geleden geopperd door het Wereld Natuur Fonds. Dit is vergt een vergaande vorm van samenwerking en vertrouwen die

47

http://www.google.nl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDEQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.helpdeskwater.nl%2Fpublic%2Fpages%2F18866%2FKlimaatveranderingenscheepvaartopdegroterivieren.pdf&ei=5VxfU_eIJ6-a0QXM94CoCQ&usg=AFQjCNH3Qxz-Nny1YYHS6eJWfGJuD90eiQ&sig2=WyoQ-sBMVJANK5JV0MIEWw&bvm=bv.65397613,d.d2k

nadere uitwerking nodig heeft.

4.4.3 Visserij

Warme winters kunnen leiden tot minder schelpdieren en een hogere gemiddelde watertemperaturen tot het minder goed doorgroeien van volwassen schol. Hoe ver dat effect strekt is niet bekend. Het is wel duidelijk dat zowel de natuur als de visserij met dit effect te maken krijgt. Of dit gedeelde probleem is om te zetten in een kans (positieve adaptatiemaatregel) is niet op voorhand duidelijk. Wellicht biedt de combinatie met zandsuppletie een mogelijkheid: diepe putten creëren een nieuw onderwatermilieu met onderin een lagere watertemperatuur. Mogelijk kunnen soorten als schol en kabeljauw hiervan profiteren.

4.4.4 Gezondheid

Een groene omgeving werkt positief op de gezondheid: je wordt minder snel ziek en als je ziek bent herstel je in een groene omgeving sneller. Door klimaatverandering zal deze positieve relatie meer worden aangesproken. Naarmate temperaturen in de stad oplopen krijgen mensen meer behoefte aan de koelte van groen en water. Een mechanisme om dit partnership tot werking te brengen is er nog niet maar wel denkbaar en hier ligt zeker een kans.

Er is ook een negatieve relatie: hogere watertemperaturen kunnen leiden tot waterkwaliteitsproblemen (o.a. blauwalgen). Daarnaast zullen ten gevolge van het veranderende klimaat ziekteverwekkers die ons land tot nu toe niet bereikten of hier niet konden overleven, zich hier gaan vestigen. Dit laatste is echter niet te voorkomen door bijv. minder verbindingzones aan te leggen. Los van het feit dat dit een ongewenst paardenmiddel zou zijn: het helpt ook niet want via goederen- en personentransport zullen deze nieuwe soorten ons land toch weten te bereiken.

Andere gezondheidseffecten kunnen zijn een verlenging van het seizoen van hooikoorts en muggenoverlast.

4.4.5 Aanzet tot prioritering

Hiervoor is aangegeven dat het in alle sectoren en beleidsterreinen mogelijk is met geïsoleerde maatregelen en uitvoeringsprogramma's bij te dragen aan de klimaatbestendigheid van de natuur en dat – andersom – de ontwikkeling van natuur zoveel mogelijk wordt ingezet om negatieve klimaateffecten te verminderen.

Op grond van een onafhankelijke multicriteria analyse⁴⁸, waarbij gekeken werd naar het belang van te nemen maatregelen, de urgentie, het no-regret gehalte, de kosten-batenverhouding en het mitigerende effect kwam naar voren dat de beste mogelijkheden liggen op het terrein van integraal water- en natuurbeheer, integraal kustbeheer, het bieden van meer ruimte aan water in zowel het hoofd- als regionale watersysteem. Ook het smeden van nieuwe allianties scoort hoog.

⁴⁸ De Bruin, K. (2011) An economic analysis of of adaptation to climate change under uncertainty.

| Nr. | Sector* | Adaptation option | Importance (40%) | Urgency (20%) | No regret (15%) | Co-benefits (15%) | Mitigation effect (10%) | Weighted sum |
|-----|---------|---|------------------|---------------|-----------------|-------------------|-------------------------|--------------|
| 34 | N | Integrated nature and water management | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4.9 |
| 35 | N | Integrated coastal zone management | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4.9 |
| 40 | W | More space for water a. Regional water system b. Improving river capacity | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4.9 |
| 41 | W | Risk based allocation policy | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4.9 |
| 65 | W | Risk management as basic strategy | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4.9 |
| 68 | W | New institutional alliances | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4.9 |
| 87 | H&I | Make existing and new cities robust avoid 'heat islands', provide for sufficient cooling capacity | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4.8 |
| 75 | E&T | Construct building with less need for air-conditioning/heating | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4.7 |
| 84 | E&T | Change modes of transport and develop more intelligent infrastructure | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4.7 |
| 28 | N | Design and implementation of ecological networks the National Ecological Network | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4.5 |

* N-Nature; W-Water; H&I-Housing & Infrastructure; E&T-Energy & Transport

Tabel 4.4.5. Top-10 van mogelijkheden voor klimaatadaptatie. Hoge scores betekenen een hoge prioriteit. Uit: K. de Bruin, 2011.

4.5 Verantwoordelijkheden

Voor realisatie van een adaptatiebeleid voor de natuur is betrokkenheid van vele beleidsvelden en organisaties nodig. Voor de toedeling van verantwoordelijkheden en samenwerking (de keerzijde van verantwoordelijkheidsverdeling) geven we de volgende aandachtspunten mee.

4.5.1 Ontwikkelverliezen

Het is belangrijk om klimaatadaptatie te verankeren als algemeen uitgangspunt van beleid en dat dan ook te handhaven. Liefst met simpele statements. Bij de start van het Deltaprogramma was een hoopvol vertrekpunt "natuurlijk waar het kan, technisch waar het moet". Hoe breed ook geformuleerd, dit was een ferme, richtinggevende uitspraak. In de loop van het proces is dit uitgangspunt echter verdwenen. Soms treedt verlies verderop in het proces op. In Ruimte voor de Rivier maar ook in het Deltaprogramma Rivieren is er de beleidsmatige wens om het riviereengebied én veiliger én mooier te maken. In de praktijk wordt dit echter enorm bemoeilijkt door de zeer strikte "Beleidsregel Grote Rivieren" die vrijwel geen enkele ontwikkeling of inrichtingsmaatregel in het winterbed toestaat die geen scheepvaart- of rivierveiligheidsdoel heeft. Een multifunctionele benadering waarin meekoppelkansen worden gezocht en benut, is in de praktijk daardoor praktisch onmogelijk.

Naarmate een proces verder voortschrijdt en richting praktijk gaat, kunnen dus "ontwikkelverliezen" optreden. Om dat te voorkomen zou gewerkt kunnen worden met een klein team dat in opdracht van de minister van I&M en EZ bewaakt dat kansen om de natuur in ons land klimaatbestendiger te maken, worden gezien en benut. Deze rapportage kan daarbij dan mogelijk fungeren als (aanzet tot) de focus van zo'n team. In het programma Ruimte voor de Rivier heeft een Q-team gefunctioneerd met een dergelijke rol en dat heeft goede resultaten opgeleverd. Personele continuïteit in zo'n team is dan van groot belang.

4.5.2 Natuurorganisaties als partners

Natuurorganisaties volgen al meerdere jaren een aanpak waarbij ze inhoudelijke samenwerking zoeken met niet-natuurbeschermers. Dit krijgt onder meer vorm in

klimaatbufferprojecten, maar is een bredere trend. Voor de ontwikkeling en implementatie van een adaptatiestrategie voor de natuur én alle doorwerkingen daarvan in andere beleidsvelden, kunnen deze organisaties belangrijke partners zijn want ze hebben zowel strategische (beleids)kennis als inhoudelijke (gebieds- en beheers)kennis in huis (“Hoofd in de wolken, voeten op de grond”). Bovendien bezitten ze terreinen die kunnen worden ingezet. Om tot zo’n partnership te komen is het nodig dat overheden en instanties deze organisaties ook als partner gaan herkennen en erkennen en niet slechts zien al uitvoerders van overheidsbeleid of een sectoraal belang.

4.5.3 Internationale scope

Oplossen van het klimaatprobleem moet je niet willen afschuiven op het buitenland: het is nodig en redelijk om hier als land je eigen verantwoordelijkheid te nemen. Niettemin moet je niet de ogen sluiten voor de mogelijkheid dat sommige klimaatgerelateerde adaptatiemaatregelen mogelijk goedkoper en duurzamer te realiseren zijn in het buitenland dan in Nederland. Een voorbeeld hiervan is de mogelijkheid om de natuurlijke sponswerking in de Duitse Middengebergten (de oorsprong van onze hoogwaters) te herstellen. Daarmee kunnen piekafvoeren worden afgevlakt. Het perspectief: meer herstel- en adaptatiemogelijkheden voor de natuur in Duitsland, meer behoud en adaptatiemogelijkheden voor de natuur in Nederland (want minder noodzaak voor grootschalig afgraven of maaien en kaalkappen van uiterwaarden), terwijl twee landen (o.a. ook een stad als Keulen) van de veiligheidswinst profiteren. Omdat de winst in twee landen valt, lijkt ook een verdeling van kosten redelijk maar zelfs als dat niet zou gebeuren is het denkbaar dat een Nederlandse rivierveiligheids-euro in Duitsland beter is besteed dan in Nederland. Het is essentieel om dit soort “beste mogelijkheden over de grens” goed te onderzoeken, zowel op het gebied van effectiviteit als de financiële en beleidsmatige haalbaarheid.

4.6.3 Nationale scope

Veel klimaatgerelateerde problemen uit zich in Nederland via het water. Bij het opvangen van klimaatgevolgen wordt in het hoogwaterbeheer een nationale scope gehanteerd in zowel beleidsvorming als uitvoering (Rijkswaterstaat). In het regionale waterbeheer is dat minder het geval. Met het Deltaprogramma zoetwater is wel de inzet om tot nationale afwegingen te komen, maar de kennis en de “uitvoeringsmacht” voor het regionale waterbeheer ligt bij de waterschappen. Bij vorming van het nationale beleid wordt daarvan gebruik gemaakt en dit betekent dat nationaal beleid vooral met regionale kennis, afwegingen, belangen en oplossingen wordt gevoed. Het risico is dat integrale oplossingen die vanuit een nationale (klimaatadaptatie-optiek) het beste zouden zijn, niet in beeld komen of onderweg afvallen (“ontwikkelverliezen”). Omdat het zoetwaterbeheer zo’n cruciale succesfactor is in het klimaatadaptatiebeleid, en het gaat om veel geld, verdient dit punt aandacht.

5. Indicatoren voor effecten en adaptief vermogen

In dit hoofdstuk beschrijven we aan de hand van een voorbeeld met welke typen indicatoren de effecten van de klimaatverandering op de natuur en de effectiviteit van klimaatadaptatie acties gemonitord kunnen worden.

5.1. Inleiding

Je krijgt wat je meet en beloont. Deze algemene regel is ook in het natuurbeleid zichtbaar geworden. De doelstelling van de het Nationaal Natuurnetwerk was (en is) om via systeemherstel de natuur in ons land te behouden. Door te sturen op doelsoorten en natuurdoeltypen kwamen hoofddoelen van de strategie (meer robuustheid, meer flexibiliteit, meer veerkracht) echter onder druk te staan.

De nieuwe Rijksnatuurvisie stelt het herstel van ecologische processen (opnieuw) centraal. Dat sluit prima aan op datgene wat nodig is voor een klimaatrobuuste natuur. Het ligt dan ook voor de hand om bij de vertaling van dat beleid in de praktijk ook de indicatoren te ontwikkelen die aangeven in hoeverre een adaptatiestrategie voor de natuur effectief is. Dat is een essentiële maar ook lastige opgave.

5.2. Voorbeeld: indicatoren voor de klimaatbestendigheid van de Waddenzee.

Een volledig set indicatoren voor klimaatgevoeligheid of klimaatbestendigheid kunnen we binnen het bestek van deze opdracht niet ontwikkelen maar we geven wel een richting aan, aan de hand van een voorbeeld uit de Waddenzee.

Doel: monitoren of de wadplaten voldoende meegroeien met de zeespiegelstijging.

Indicator op effectniveau

Het monitoren van de oppervlakte bij eb droogvallende wadplaten is de beste indicator voor de mate waarin de Waddenzee erin slaagt mee te groeien met de zeespiegel. Oppervlakte is ook een goede indicator omdat het bepalend is voor de mate waarin het natuurlijke adaptief vermogen van soorten tot expressie kan komen.

Indicator op procesniveau:

Het monitoren van de aanwezigheid/ongestoordheid van de sediment-invangende mechanismen (diatomeeënlaag, schelpdierbanken, zeegras e.d.) geeft inzicht in de vraag of het gebied zijn maximale veerkracht (coping capacity) op dit punt ('meegroeien') kan ontplooiën.

Indicator op soortsniveau

De scholekster of kanoetstrandloper die voor zijn voedsel afhankelijk is van droogvallende wadplaten, is een indicator op het laagste niveau. Voor communicatiedoeleinden is zo'n indicatorsoort zeer geschikt maar hij geeft minder houvast omdat de aantallen scholeksters ook door andere factoren dan het areaal droogvallende platen worden beïnvloed.

Het is essentieel dat steeds combinaties van indicatoren op deze drie verschillende niveaus worden gekozen. Voorkomen moet worden dat uitsluitend indicatoren op het laagste niveau worden benoemd en zeker dat op dit laagste niveau gestuurd gaat worden, want dan zijn we terug bij af: doelsoorten en natuurdoeltypen.

Voor elk aspect dat van belang is voor de klimaatbestendigheid van de Wadden (elk "doel") kunnen op elk van de niveaus indicatoren worden ontwikkeld. Zo kan op het procesniveau ook gekeken worden naar de mate van isolatie van een gebied. Voor de Waddenzee is dit gezien de schaal waarschijnlijk niet zo relevant maar in regio's waar relatief kleine natuurgebieden ingebed liggen in een cultuurlandschap is bijv. de afstand tot het dichtstbijzijnde natuurgebied

dan wel het aantal verbindende corridors een indicatie voor de veerkracht die de natuur kan ontplooiën.

Voor elk van de klimaatgevoelige onderdelen van de Waddenzee⁴⁹ (bijv. ook kwelders, duinen) kan zo'n set indicatoren worden ontwikkeld. Deze benadering kan vervolgens ook worden uitgewerkt voor Laag Nederland, Hoog Nederland en het Rivierengebied.

⁴⁹ Overigens laat de Waddenacademie een waddenbalans ontwikkelen en dit jaar een 0-meting uitvoeren. Hiermee kan beter worden gevolgd hoe het waddegebied zich ontwikkelt op ecologisch, economisch en sociaal-cultureel gebied, ondermeer als gevolg van klimaatverandering.

6. Kennislacunes

Over de relatie tussen natuur en klimaatverandering is veel bekend. Maar veel ook niet en daarvan is een lange lijst te maken. Die zal, afhankelijk van de deskundigheid en interesse van de personen die hem opstellen, ook niet eenduidig zijn.

Een belangrijke vraag in het kader van deze rapportage is: zijn er zodanige kennislacunes dat dit de voorbereiding en uitvoering van een klimaatadaptatiestrategie voor de natuur in de weg staat? Wij zien de volgende onderwerpen.

- **Kosteneffectiviteit.** In de praktijk blijkt (veronderstelde) kosteneffectiviteit in afwegingen een grote rol te spelen. Hoewel op projectniveau soms wel inzicht is te krijgen in de directe (financiële) kostenbesparing die gerealiseerd kan worden met een “klimaatbufferaanpak” is meer inzicht daarin van belang, met name de trits: voor welke technische oplossing is een “klimaatbufferaanpak” een alternatief, in welke ordegrrootte kunnen kostenbesparingen liggen en op welke schaal is de klimaatbufferaanpak inzetbaar. Dit kan voorkomen dat oplossingen die gebruik maken van het principe “bouwen met de natuur” op grond van veronderstelde meerkosten al afvallen in afwegingen voordat ze goed en wel in beschouwing zijn genomen.
- **Doorwerking in beleid en uitvoeringspraktijk.** Een lacune lijkt ons dat bestaande kennis over en ervaring met klimaatrobuuste oplossingen nog onvoldoende wordt toegepast in beleid en praktijk. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door kennislacunes in bepaalde groepen in de samenleving. Ook kan het zijn dat de kennis wél aanwezig is maar om wat voor reden dan ook toch onvoldoende wordt vertaald in (beleids)afwegingen. Ook dit kan een punt van nader onderzoek zijn: waar zijn kansen gemist en wat was daarvan de oorzaak?
- **Kansen in buurlanden.** In sommige gevallen bereiken klimaatgerelateerde effecten ons via het buitenland. Onder andere bij de problematiek van hoogwaterbestrijding is dat het geval. Er is op dit moment onvoldoende kennis beschikbaar over de voor- en nadelen van een praktische samenwerking met bijv. Duitsland op het vlak van hoogwatersbescherming. Deze voor- en/of nadelen kunnen liggen op het vlak van rivierveiligheid, droogtebestrijding, natuur, kosten en governance.

Bijlage 1

Stakeholderbijeenkomst 'Klimaatverandering en de risico's en kansen voor Natuur' – 25 juni 2014, Utrecht



| Naam | | Organisatie |
|---------|---------------------|---|
| Charles | Aangenendt | Ministerie van Infrastructuur en Milieu |
| Frank | Berendse | Wageningen UR |
| Channah | Betgen | Wageningen UR |
| Esther | Blom | Wereld Natuur Fonds |
| Tjebbe | de Boer | Dienst Landelijk Gebied |
| Wim | Braakhekke | Stroming B.V. |
| Rob | van Dorland | KNMI |
| Marjon | Hendriks | Planbureau voor de Leefomgeving |
| Loek | Hesemans | Ministerie van Economische Zaken |
| Menno | de Jong | New Scientist |
| Mayra | Kapteyn | Innovation Booster |
| Arnold | van Kreveld | Stroming B.V. |
| Roelof | van Loenen Martinet | Gelderse Milieufederatie |
| Anne | Martens | Kennis voor Klimaat |
| Pier | Vellinga | Wageningen UR |
| Coen | Verstand | Provincie Noord-Holland |
| Paul | Vertegaal | Natuurmonumenten |
| Marijke | Vonk | Planbureau voor de Leefomgeving |
| Bram | Vreugdenhil | Provincie Gelderland |
| Alphons | van Winden | Stroming B.V. |
| Flip | Witte | KWR Watercycle Research Institute |

Bijlage 2

Begrippen en definities.

KLIMAATGERELATEERDE STIMULI: All the elements of climate change, including mean climate characteristics, climate variability, and the frequency and magnitude of extremes, to which the system is exposed. Related to gradual changes (e.g. average temperature increase) and extreme events (e.g. floodings).

BLOOTSTELLING (EXPOSURE): The presence of people, livelihoods, species or ecosystems, environmental services and resources, infrastructure, or economic, social, or cultural assets that could be *affected* either adversely or beneficially, *by climate related stimuli*. The effect may be direct or indirect.

IMPACT: Effects on natural and human systems. Effects on lives, livelihoods, health status, ecosystems, economic, social, and cultural assets, services (including environmental), and infrastructure due to the interaction of climate related stimuli and exposure.

WAARSCHIJNLIJKHEID: A measure, estimation or expectation of likelihood of occurrence of an event or scenario.

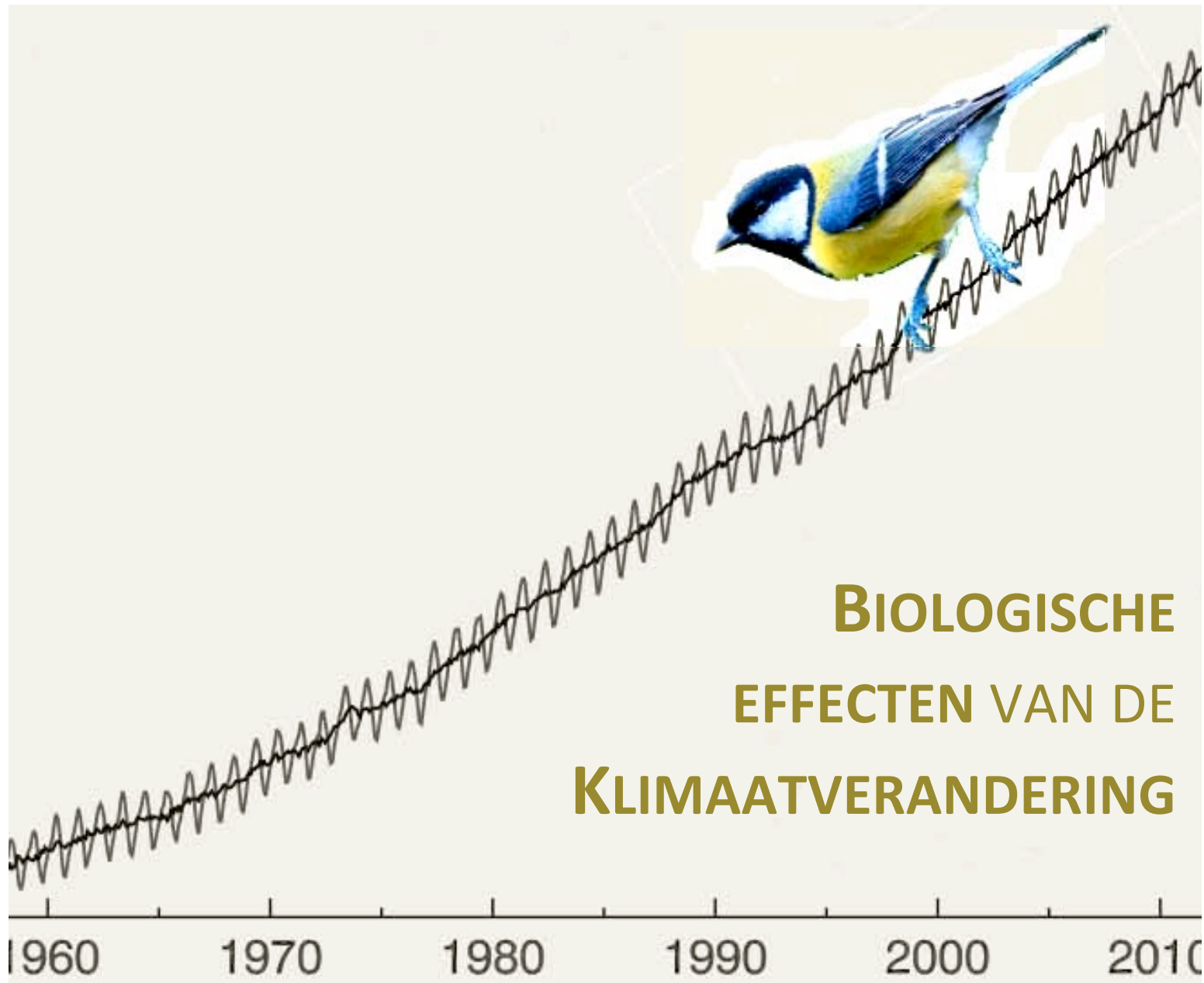
RISICO: The probability or expectation of occurrence of hazardous events or trends combined with the consequences if these events occur.

ADAPTIEF VERMOGEN: The ability to adjust to actual or expected climate and its effects.

CAPACITY: The ability to face and manage effects or adverse conditions due to actual or expected climate.

KWETSBAARHEID: The degree to which a system is susceptible to, or unable to cope with, adverse effects of climate or climate change, including climate variability and extremes. Vulnerability is a function of the character, magnitude, and rate of impact and its capacity to cope and adapt.

ADDENDUM



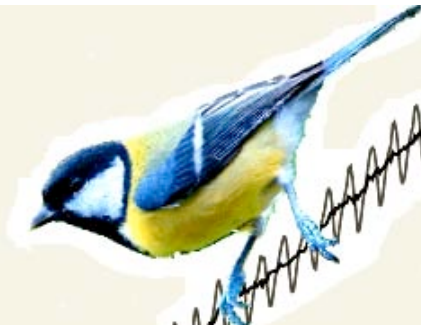
BIOLOGISCHE EFFECTEN VAN DE KLIMAATVERANDERING

Auteur: Menno de Jong
MSc Biologie

Coördinator: Frank Berendse
*Nature Conservation and Plant Ecology Group
Wageningen Universiteit*

In opdracht van: Wim Braakhekke
Bureau Stroming

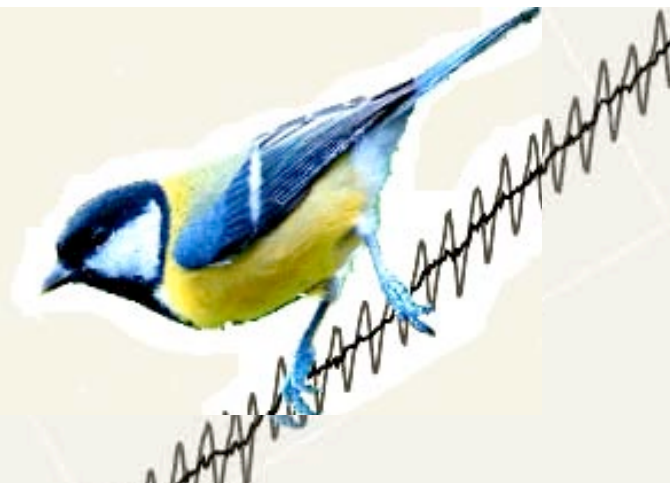
Datum: Mei 2014



Literatuuronderzoek
**BIOLOGISCHE EFFECTEN VAN DE
HUIDIGE KLIMAATVERANDERING**

Mei 2014

Ten geleide

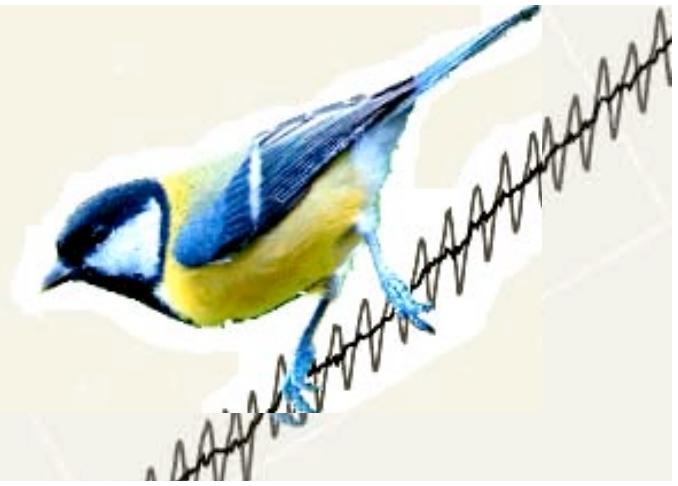


Dit rapport bevat een overzicht van de wetenschappelijke literatuur die momenteel voorhanden is betreffende de effecten van de huidige, antropogene klimaatverandering op de natuur. Het rapport is opgesteld door de Wageningen Universiteit, in opdracht van Bureau Strooming.

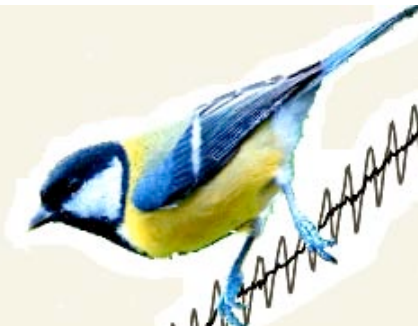
U zult in dit verslag uitsluitend referenties aantreffen naar artikelen over de gevolgen van klimaatverandering, en dus geen referenties naar artikelen over het fenomeen zelf of de oorzaken ervan. Bovendien ligt de focus op studies die, direct of indirect, betrekking hebben op Nederland. Wetenschappelijk onderzoek naar het opschuiven van de boomgrens op bergen, of studies naar afnemende soortenrijkdom in het tropisch regenwoud, om maar twee willekeurige voorbeelden te noemen, zijn buiten beschouwing gelaten.

Het startpunt van het literatuuronderzoek vormden twee meta-analyses uit het jaar 2003 ([Parmesan & Yohe 2003](#); [Root et al 2003](#)). Geprobeerd is om voor de periode tussen het verschijnen van die twee reviews en de verschijningsdatum van dit verslag (mei 2014), een weliswaar niet uitputtend maar wel een breed overzicht te verschaffen van de bestaande literatuur. De meeste aandacht gaat daarbij uit naar veldstudies en experimentele studies, ten koste van modellerstudies.

Inhoudsopgave



1. *Fenologische verschuivingen*
2. *Klimaateffecten op fitness*
3. *Genetische adaptaties*
4. *Poolwaartse migraties*
5. *Extincties*
6. *Interacties tussen soorten*
7. *Synthese*



1. Fenologische verschuivingen

Voor de westkust van het Schotland ligt een klein, dunbevolkt eilandje genaamd Rum. Sinds 1958 is Rum een beschermd natuurgebied en houden ecologen de populatie edelherten op het eiland nauwlettend in de gaten. Dat meerjarige onderzoek heeft geresulteerd in een unieke dataset over in het wild levende zoogdieren. [Moyes et al 2011](#) onderzochten hoe een aantal van de gegevens zich door de tijd heen ontwikkelden en ontdekten een opmerkelijk patroon. Vergeleken met de herten die in 1980 op het eiland rondliepen, bleken hun nazaten uit 2010 zich anders te gedragen. De hinden werden vroeger in het jaar vruchtbaar en baarden eerder. De bronsttijd verschoof een week naar voren. Mannetjesherten wierpen hun gewei eerder af, en ook het vegen van de bast gebeurde vroeger in het jaar dan voorheen. In het minimale geval ging het om een verschuiving van 5 dagen, andere gebeurtenissen schoven in de 30-jarige studieperiode bijna twee weken vooruit.

De bevindingen van [Moyes et al 2011](#) zijn bijzonder in de zin dat het om zoogdieren gaat. Binnen de klasse van zoogdieren werden min of meer vergelijkbare fenologische verschuivingen alleen waargenomen voor rendieren, koeien (beiden tijdstip van geboorte) en een handjevol kleinere soorten, zo blijkt uit een overzicht van [Boutin & Lane 2014](#) en [McCain & King 2014](#). Maar in een bredere context staat de gedragsverandering van de edelherten van het eiland Rum zeker niet op zichzelf. Voor andere groepen organismen, met name vogels en planten, rapporten biologen al jarenlang fenologische verschuivingen (reviews: [Peñuelas & Filella, 2001](#); [Sparks & Menzel 2002](#); [Menzel et al 2006](#); [Bertin 2008](#); [Thackeray et al 2010](#); [Visser 2013](#)). Vogels leggen hun eieren vroeger in het voorjaar ([Crick](#)

and Sparks, 1999), trekvogels brengen meer tijd in hun broedgebieden door (reviews: Lehikoinen et al 2004; Both et al 2007; Gienapp 2007; Rubolini et al 2007; Sparks et al 2007), vlinders verpoppen eerder (Roy and Sparks 2000); en bladeren, bloemen en vruchten komen vroeger in het seizoen tot ontwikkeling, terwijl bladval juist later in het seizoen plaatsvindt (Fitter & Fitter 2002; Penuelas et al 2002; Bertin, 2008; Van Vliet et al 2013).

Voor wie ieder jaar de gebeurtenissen bijhoudt, zijn de verschuivingen ook in Nederland goed merkbaar. Zo bloeit de hazelaar (*Corylus avellana*) tegenwoordig al eind januari, terwijl die boomsoort daar zo'n vijftig tot zestig jaar geleden pas halverwege februari mee begon. Berken (*Betula spp*) openen hun bladeren nu rond 13 april, terwijl ze dat rond 1950 pas omstreeks 22 april deden. Eenzelfde verschuiving van 8 à 9 dagen heeft zich in de afgelopen halve eeuw onder meer voorgedaan bij beuken (*Fagus sylvatica*) (van 29 april naar 20 april), bij Amerikaanse eiken (*Quercus rubra*) (van 2 mei naar 20 april), en bij grove dennen (*Pinus sylvestris*) (van 20 mei naar 9 mei). In de herfst vindt bladval bij al deze soorten daarentegen minimaal acht dagen later plaats. De exacte gegevens, plus die voor nog zo'n 70 andere Nederlandse plantensoorten, zijn terug te vinden in Van Vliet et al 2013.

Ook de site compendiumvoordeleefomgeving.nl bevat uitgebreide datasets over fenologische verschuivingen die zijn waargenomen in Nederland. De gegevens zijn verzameld en openbaar gemaakt door het CBS, het Planbureau voor de Leefomgeving en de Wageningen Universiteit. Een online dossier over de effecten van klimaatverandering op de natuur laat onder meer zien dat van 44 bestudeerde zangvogelsoorten de eilegdatum tussen 1992 en 2012 met gemiddeld 9 dagen is vervroegd, en dat in datzelfde tijdsverloop de vliegperiode van 20 soorten vlinders en libellen met gemiddeld 7 dagen naar voren is geschoven. Een vergelijking van gegevens over meer dan 40 soorten voorjaarsplanten tussen de periode 1940-1968 en de periode 2001-2005, leert dat die planten tegenwoordig 12 dagen eerder tot bloei komen dan halverwege de twintigste eeuw.

Alhoewel er uitzonderingen zijn, is de algehele trend bijna niet te missen. De voorjaarsverschijnselen vinden over het algemeen eerder in het jaar plaats, terwijl de najaarsverschijnselen juist later gebeuren. Met andere woorden: de zomer wordt langer, de winter korter (Sparks & Menzel, 2002). In een meta-analyse van 542 Europese plantensoorten stelden Menzel et al. 2006 vast dat die trend reëel was, en niet het gevolg van *publication bias*. In 78 procent van de door hun onderzochte soorten bleken voorjaar- en zomerverschijnselen als bladontwikkeling, bloemontwikkeling en vruchtontwikkeling eerder in het jaar plaats te vinden dan enkele decennia eerder. Voor 30 procent van alle soorten

was die verandering statistisch significant, terwijl de onderzoekers voor maar 3 procent van alle soorten significant bewijs vonden voor een uitstel (in plaats van vervroeging) van voorjaarsverschijnselen.

Het gegeven dat de waargenomen fenologische verschuivingen zich afspelen in de richting die je op basis van klimaatverandering zou verwachten, meer dan met pure kanswerking kan worden verklaard, is op zichzelf aannemelijk bewijs dat die fenologische verschuivingen een gevolg zijn van de recente klimaatverandering. Eén van die eersten die de aanwezigheid van dat patroon vaststelden, waren [Root et al. 2003](#). Zij zochten op Web of Sciences naar studies waarin wetenschappers berichtten over fenologische verschuivingen. Van de in totaal 694 soorten of soortgroepen die [Root et al 2003](#) in hun meta-analyse meenamen, zo beschreven ze in een artikel getiteld *Fingerprints of global warming on wild animals and plants*, trad iets meer dan 80 procent van de waargenomen fenologische verschuivingen op in de richting die je op basis van hogere temperaturen mag verwachten. Uit een andere meta-analyse uit datzelfde jaar, waarin [Parmesan & Yohe 2003](#) 677 soorten bestudeerden, kwam zelfs een nog iets hogere schatting van 87 procent naar voren. De resultaten zijn terug te lezen in: *A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems*.

[Menzel et al 2006](#) gingen nog een stapje verder en leverden aanvullend bewijs. Gebruikmakend van de beschikbare tijdseries stelden ze grafieken op waarin ze de data waarop een verschijnsel zich door de jaren heen voordeed, afzetten tegen de gemiddelde temperatuur van de voorgaande maand. Voor vrijwel alle soorten en verschijnselen bleek een verband te bestaan tussen temperatuur en datum van voorjaarsverschijnsel. Oftewel: hoe warmer het voorjaar, hoe eerder een bepaald verschijnsel – zoals bijvoorbeeld bladontwikkeling – optrad. Om precies te zijn bleek uit de analyse van [Menzel et al 2006](#) dat 1°C aan temperatuurstijging ertoe leidde dat bladknoppen 2,5 dagen eerder openden. In de herfst leidde een temperatuurstijging van 1°C ertoe dat de bladeren 1 dag later van de bomen vielen. De titel van hun artikel luidde: *European phenological response to climate change matches the warming pattern*.

Temperatuur en fenologische verschijnselen blijken zelfs zo sterk gerelateerd dat je uit fenologische verschuivingen genuanceerde temperatuurschommelingen kunt afleiden. Wanneer je de grafieken van jaarlijkse schommelingen in voorjaarstemperaturen en broedtijden van vogels of datum van bladontwikkeling naast elkaar legt, blijken die grafieken sterk gecorreleerd (zie [Gienapp et al 2007](#) en figuur 2 in [Walther et al 2002](#)). Ook de relatieve koelere periode van de afgelopen tien jaar is terug te lezen in biologische

verschijnselen. [Jaffre et al 2013](#) bestudeerden de migratiepatronen van zeven Europese roofvogelsoorten – de rode wouw, bruine kiekendief, blauwe kiekendief, smelleken, sperwer, buizerd en de torenvalk – in de periode tussen 1980 en 2010. In de jaren tussen 1995 en 2005, toen de temperaturen in Europa aanmerkelijk hoger lagen dan in de voorgaande 15 jaar, vertrokken de roofvogels in de herfst gemiddeld 2 dagen later uit hun broedgebied. Ten opzichte van periode 1990-1995 was het verschil zelfs 7 dagen. Vanaf 2005 daalden de gemiddelde temperaturen in Europa. De roofvogels reageerden daarop door terug te keren naar hun trekgedrag van vóór 1995.

Fenologische verschuivingen volgen niet alleen temperatuursvariaties langs de tijdsas, maar ook langs een ruimtelijke as. Aangezien de opwarming van de aarde sneller verloopt op hoge breedtegraden dan op lage breedtegraden, voorspelden [Root et al. 2003](#) dat de fenologische verschuivingen sterker zouden zijn voor soorten die dicht bij de polen voorkwamen dan voor soorten die dicht bij de evenaar leefden. Een vergelijking van zo'n 110 soorten, opgesplitst in soorten die voorkomen tussen 50° tot 72° noorderbreedte en soorten die voorkomen tussen 32° tot 49.9° noorderbreedte, leverde inderdaad een significant verschil op. Voor de meer noordelijke soorten schoof een willekeurig voorjaarsverschijnsel gemiddeld 5.5 dagen per decennium naar voren op, terwijl de soorten die dicht bij de evenaar leefden een gemiddelde scoorden van 4.2 dagen per decennium.

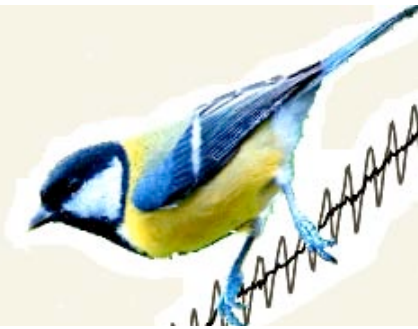
Die schattingen van [Root et al. 2003](#), met een overall gemiddelde van 5,1 dagen per decennium, lagen overigens hoger dan die van [Parmesan & Yohe 2003](#), die uitkwamen op een schatting van 2,3 dagen per decennium. Dat verschil tussen beide schattingen ontstond onder meer omdat [Parmesan & Yohe 2003](#), in tegenstelling tot [Root et al. 2003](#), bij hun berekeningen soorten betrokken die geen fenologische respons vertoonden (aldus [Visser 2013](#)). Een nieuwe analyse van beide datasets resulteerde in een schatting van 2,8 dagen per decennium ([Parmesan, 2007](#)). [Thackeray et al 2010](#), die 726 soorten uit Groot-Brittannië analyseerden, kwamen uit op een gemiddelde van 3,6 dagen per decennium.

Behalve steekproefgemiddeldes zijn de genoemde waarden natuurlijk ook sterke generalisaties. Organismen blijken onderling sterk te verschillen in mate van fenologisch respons. Zo concludeerde [Parmesan 2007](#) (*Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming*) dat fenologische verschuivingen bij amfibieën gemiddeld twee keer sneller verlopen dan bij bijvoorbeeld bomen, vogels en vlinders, en maar liefst achter keer sneller dan bij kruiden, grassen en struiken. [Thackeray et al 2010](#) stelden vast dat landplanten veel sterkere fenologische responsen vertoonden dan

zoetwaterplanten, en dat hetzelfde gold voor ongewervelden (4.1 dagen per decennium) ten opzichte van gewervelden (2.6 dagen per decennium).

Zoals we in hoofdstuk 3 zullen bespreken, lijken de fenologische responsen vooral fenotypische plasticiteit te weerspiegelen, en dus niet zozeer genetische adaptatie. Maar genetische adaptatie of niet, in beide gevallen kunnen fenologische responsen weldegelijk adaptief (ofwel gunstig voor de soort) zijn. Dat dit in de praktijk inderdaad het geval is, en fenologische responsen inderdaad de overlevingskansen van een soort verhogen, bleek uit de studie van [Moller et al 2008](#), die gegevens verzamelden over migratiepatronen en broedsucces van meer dan honderd Europese trekvogels. Ook zij stelden vast dat een groot aantal van de onderzochte soorten in de jaren '90 hun overwinteringsgebied eerder verlieten dan in de voorafgaande twintig jaar. Maar opmerkelijker nog: de onderzoekers concludeerden ook dat de soorten die daar niet in meegingen, het in verhouding slechter deden. Het totaal aantal broedparen van die soorten nam sterker af dan die van soorten die zich wel fenologisch aanpasten. Die conclusie kwam terug in de titel: *Populations of migratory bird species that did not show a phenological response to climate change are declining.*

Fenologische verschuivingen behoren tot de best gedocumenteerde effecten van de recente klimaatverandering op de levende natuur. Maar klimaatverandering grijpt zeker niet alleen in op de fenologie. Zoals we in het volgende hoofdstuk zullen bespreken heeft de opwarming van de aarde tal van effecten op de levende natuur, zowel vermoede als onvermoede.



2. Klimaateffecten op fitness

Een klimaatverandering kan op uiteenlopende manieren invloed uitoefenen op processen in de levende natuur. In een artikel getiteld *Classification of climate-change-induced stresses on biological diversity*, onderscheidde [Geyer et al 2011](#) niet minder dan 90 stressorklassen. De stressfactoren binnen die klassen zouden volgens [Geyer et al 2011](#) werkzaam zijn op drie biologische niveaus, waarbij ze het individuniveau en populatieniveau samentrokken, en daarnaast het gemeenschapsniveau en ecosysteemniveau onderscheidde.

Om het geheel van (mogelijke) klimaateffecten enigszins overzichtelijk te houden en structuur aan te brengen in een overzicht daarvan, ontkom je er niet aan om keuzes te maken. Tijdens het schrijven van dit rapport is de keuze gemaakt om het overzicht te bouwen rondom effecten op populatieniveau. Uitgangspunt daarbij is dat op dat niveau de natuur op drie verschillende manieren kan reageren op omgevingsveranderingen, en dus ook op een veranderend klimaat ([Gienapp et al 2008](#)). Een populatie kan uitsterven (hoofdstuk 5), geografisch verschuiven (hoofdstuk 4), of zich aanpassen aan de nieuwe – bijvoorbeeld warmere, drogere of juist nattere – omgeving door middel van hetzij fenotypische hetzij genetische adaptatie ofwel micro-evolutie (hoofdstuk 3). In hoofdstuk 6 zullen we bespreken hoe klimaatveranderinggedreven veranderingen op populatieniveau kunnen leiden tot verschuivingen binnen of zelfs *van* gemeenschappen en ecosystemen.

Beweren dat populaties als gevolg van klimaatverandering ofwel geografisch kunnen verschuiven ofwel zich genetisch kunnen aanpassen ofwel uitsterven, is feitelijk een andere manier om te zeggen dat de (evolutionaire) fitness van een organisme kan veranderen in

zowel ruimte als tijd. In dit hoofdstuk zullen we ingaan op de directe oorzaken van zo'n veranderend fitnesslandschap, en bespreken hoe klimaatverandering ingrijpt op de overlevingskansen van een organisme.

Als eerste voorbeeld kan de studie van [Matias & Jump 2012](#) genoemd worden. Zij publiceerden in het vakblad *Forest Ecology en Management* een artikel met de titel: *Interactions between growth, demography and biotic interactions in determining species range limits in a warming world: The case of Pinus sylvestris*. In de afgelopen decennia zijn het aantal zaailingen van de grove den (*Pinus sylvestris*) toegenomen aan de noordgrens van de het verspreidingsgebied van deze boomsoort, net als de groeisnelheid van die boompjes. Aan de zuidgrens, in zuidelijk Europa, is er daarentegen juist sprake van een afname van de reproductiecijfers, van een lagere groeisnelheid en soms zelfs van massale sterfte van volwassen bomen. Met andere woorden: het verspreidingsgebied van de grove den verschuift poolwaarts, zoals is waargenomen voor zoveelsoorten (zie hoofdstuk 4). Het mechanisme achter die geografische verschuiving bleek complex of in ieder geval meervoudig, zo concludeerden [Matias & Jump 2012](#). Aan de noordgrens van het verspreidingsgebied van de grove den waren de demografische veranderingen vooral het gevolg van de hogere temperaturen. Aan de zuidgrens bleek niet temperatuur maar droogtestress de doorslaggevende factor te zijn. Daarnaast konden de auteurs niet uitsluiten dat veranderende biotische interacties (insecten, pathogenen, herbivoren) eveneens een rol speelden.

In een studie uit datzelfde jaar concludeerden [Cahill et al 2012](#) dat klimaatverandering juist en vooral inwerkt op organismen door middel van veranderde biotische interacties. In een artikel met de titel *How does climate change lead to extinction?* bespraken de auteurs de bestaande literatuur over klimaatgedreven (lokale) negatieve populatietrends. De vraag die zij daarbij beoogden te beantwoorden was de vraag op welke manier, via welke directe stimuli, organismen het meest hinder ondervinden van klimaatverandering.

Hun literatuurreview leverde zeven studies op waarin de betreffende auteurs directe oorzaken van lokale extincties konden identificeren, en waarbij die directe oorzaken gelinkt konden worden aan de recente klimaatverandering. De studie-organismen varieerden van koraalvissen tot dikhoornschapen, en van platwormen tot Noord-Amerikaanse fluithazen en checkerspot-vlinders. Klimaatverandering werkte in vrijwel alle gevallen indirect, en dus niet direct, op deze soorten in. Een afname in neerslag leidde bijvoorbeeld tot een gewijzigde plantengemeenschap, wat in het nadeel werkte van de dikhoornschapen. Door de hogere

riviertemperaturen in Wales nam voor de platwormen het aantal prooien af. Een hogere variatie in neerslag zorgde voor een mismatch tussen het larvestadium van de checkerspotvlinders en het groeiseizoen van hun gastheerplanten. Voor de andere soorten gold iets soortgelijks. Alleen in het geval van de afname van het aantal Amerikaanse fluithazen vermoedden de onderzoekers een directe invloed van klimaatverandering, aangezien in dit geval een beperkte tolerantie van de fluithazen voor temperatuursextremen een rol leek te spelen.

Klimaatverandering kan dus op meerdere manieren inwerken op processen in de levende natuur, zowel direct als indirect, via tussenliggende biotische en abiotische factoren. (Rosenzweig et al 2008). Er kan daarbij onderscheid gemaakt worden naar:

- Effecten van hogere temperaturen op biologische processen (direct)
- Effecten van hogere temperaturen op abiotische processen, die vervolgens doorwerken op biologische processen (en dus indirect zijn)
- Doorwerking van directe of indirecte effecten binnen een biologisch systeem, als gevolg van veranderende biotische interacties
- Effecten van hogere atmosferische CO₂-gehaltenes

Directe effecten van hogere temperaturen op biologische processen

In de eerste plaats geldt dat een hogere lucht-, water-, en bodemtemperatuur een direct effect hebben op de overlevingskansen van een organisme. Dat kan op verschillende manieren. De volgende voorbeelden kunnen helpen om een idee te geven van de veelzijdigheid van die directe temperatureffecten.

Bij hogere temperaturen (zeker in combinatie met hogere atmosferische CO₂-gehaltenes) groeien planten sneller (Wu et al, 2010, *Responses of terrestrial exosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation*); Peñuelas et al 2013, *Evidence of current impacts of climate change on life: a walk from genes to the biosphere*). Hetzelfde geldt voor algen en bacteriën in zoetwatermeren (Blenckner et al 2007).

Dieren zouden door de hogere temperaturen juist kleiner blijven, omdat Bergmann's Rule – de biologische regel dat dieren in koude oorden groter zijn dan verwanten in warmere streken – niet alleen zou gelden langs een ruimtelijke as maar ook langs een tijdas, al is het bewijs daarvoor op dit moment aanvechtbaar (Teplitsky et al 2008; Gardner, 2011; Sheridan 2011; Ohlberger, 2013). Hittestress zorgt bij insecten voor hogere concentraties van

aminozuren en eiwitten en een verminderd suikermetabolisme (Malmendal et al, 2006; Michaud et al, 2008); de zachtere winters leiden tot lagere mortaliteitscijfers (Bale et al 2002). Uit een experiment waarmee onderzoekers de effecten van hittestress voor een woestijnratsoort (*Neotoma lepide*) onderzochten, kwam naar voren dat een hypnotiserend middel 45% langer in individuen circuleerde die 30 dagen lang aan een temperatuur van 29 graden waren blootgesteld, dan in soortgenoten die 30 dagen lang aan een temperatuur van 21 graden waren blootgesteld. Zoals de onderzoekers, Kurnath & Dearing 2013, verwoordden in de titel van hun artikel (*Warmer ambient temperatures depress liver function in a mammalian herbivore*), wijst dat erop dat hittestress bij zoogdieren kan leiden tot een verminderd levermetabolisme, wat hun overlevingskansen kan beïnvloeden. Een hogere luchttemperatuur zou eveneens invloed hebben op hoe ver geluid draagt, en daarmee op de foerageerprestaties van vleermuizen, die tenslotte hun prooi detecteren via echolocatie, aldus Luo et al 2014.

Effecten van hogere temperaturen op abiotische processen, die vervolgens doorwerken op biologische processen (en dus indirect zijn)

Zoals opgemerkt door Bradshaw & Holzapfel 2010 zijn de gevolgen van klimaatverandering in de abiotische wereld hoofdzakelijk het directe gevolg van de opwarming van de aarde. Hogere temperaturen zijn verantwoordelijk voor het terugtrekken van gletsjers, voor het smelten van het poolijs, en daarmee voor het stijgen van de zeespiegel. Organismen zijn echter geen gletsjers. Ze ervaren de indirecte gevolgen van klimaatverandering vaak meer dan het directe effect van de temperatuursverhoging.

De opwarming van de aarde werkt in op tal van abiotische omgevingsfactoren, die op hun beurt invloed hebben op de overlevingskansen van organismen. Het kan daarbij onder meer gaan om factoren als neerslagpatronen (Knapp et al 2008, *Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems*), bewolkingsindex, zeespiegelniveau (Yamanaka et al 2013), overstroming- en vuurfrequentie (en -intensiteit), bodemvochtigheid (Xu et al 2013, *A meta-analysis of the response of soil moisture to experimental warming*), bodemwaterfluctuaties, rivierafslaghoeveelheden en sedimentatiesnelheden.

Hoe complex en subtiel dergelijke abiotische veranderingen kunnen doorwerken op de levende natuur, kan worden geïllustreerd aan de hand van de studie van Post et al 2013. In een artikel getiteld *Ecological consequences of Sea-Ice Decline* brachten de onderzoekers de biologische gevolgen van de smeltende noordpoolijskap in kaart. Eén consequentie van het

smeltende ijs is, zoals algemeen bekend, dat ijsberen daardoor minder jachtgronden ter beschikking hebben om op zeehonden te jagen. Maar [Post et al 2013](#) wijzen erop dat het smelten van het poolijs veel meer consequenties heeft dan dat alleen. Door gebrek aan geschikt zee-ijs zouden walrussen in steeds grotere aantallen bijeenkomen op stranden. Die massaliteit maakt de walrussen meer vatbaar voor ziekteverspreiding. Door de grotere onvoorspelbaarheid van het ijs, en omdat beloega's en narwals later in het seizoen migreren, kunnen tandwalvissen steeds vaker vast komen te zitten onder het ijs (*ice entrapment*) ([Laidre et al 2011](#)). Habitatfragmentatie, als gevolg van het verdwijnen van zeeijs, kan leiden tot *genetic drift* in geïsoleerd geraakte populaties van poolvossen en wolven, en juist tot hybridisaties tussen populaties walrussen en walvissen, en zelfs tussen ijsberen en grizzly's. Voor algen en andere fotosynthetiserende micro-organismen, die onder de ijskap leven en verantwoordelijk zijn voor 57 procent van de primaire productie in de Noordelijke IJszee, blijft minder leefgebied over. Doordat het ijs eerder in het jaar begint te smelten, krimpt het groeiseizoen, en dreigt de algenbloei uit de pas te gaan lopen met de levenscycli van het zoöplankton. Daardoor missen de kreeftachtigen een feestmaal, want het dunner wordende ijs laat meer zonlicht door, waardoor de primaire productie tijdelijk en lokaal toeneemt ([Post et al 2013](#)).

Doorwerking van directe of indirecte effecten binnen een biologisch systeem, als gevolg van veranderende biotische interacties

Met het benoemen van de ecologische mismatch tussen zoöplankton en phytoplankton en de toegenomen kans op ziekteverspreiding in populaties walrussen, hebben we in feite al een voorschot genomen op deze derde categorie van klimaateffecten. Omdat organismen via onderlinge biotische interacties met elkaar verbonden zijn, kunnen bepaalde klimaateffecten binnen een ecosysteem doorwerken.

Omdat dit onderwerp centraal zal staan in hoofdstuk 6 van dit rapport, kan hier worden volstaan met de opmerking dat als gevolg van biotische interacties klimaateffecten niet alleen kunnen doorwerken, maar ook kunnen worden gedempt, zoals [Post & Pederson 2008](#) aantoonde.

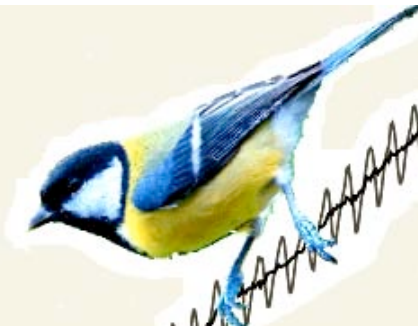
In een langjarig experiment stelden [Post & Pederson 2008](#) een Arctische plantgemeenschap bloot aan kunstmatig hoge temperaturen. In velden waar rendieren en muskusossen graasden, vertoonden die plantgemeenschappen na vijf jaar weinig verschillen met natuurlijke plots (de control). Maar plantgemeenschappen die alleen bloot gesteld waren

aan hogere temperaturen en niet aan herbivorie, hadden zich heel anders ontwikkeld. De hogere temperaturen hadden geleid tot een significante toename van de totale biomassa, en tot een verschuiving van een door grassen gedomineerde vegetatie (de beginsituatie) tot een struikachtige vegetatie die werd gedomineerd door dwergberken (*Betula nana*) en wilgen (*Salix glauca*).

Effecten van hogere atmosferische CO₂-gehaltenes

Niet alleen hogere temperaturen hebben invloed op de natuur, ook de toegenomen atmosferische CO₂-concentraties, de oorzaak van antropogene opwarming van de aarde, beïnvloeden biologische processen. Dat maakt het totaalplaatje iets gecompliceerder. De natuur reageert anders op een combinatie van hogere CO₂-gehaltenes en hogere temperaturen, dan op (directe en indirecte effecten van) hogere temperaturen alleen. Voor een juiste analyse van de gevolgen van klimaatverandering, dienen de effecten van hogere CO₂-concentraties dus in beschouwing te worden genomen, en indien mogelijk worden gescheiden van temperatuureffecten.

De belangrijkste invloed van een hoger CO₂-gehalte is waarschijnlijk dat het droogtestress bij planten tegengaat. Bij hogere CO₂-concentraties hoeven de huidmondjes van planten minder lang of minder ver open te staan om dezelfde hoeveelheid CO₂ binnen te krijgen. Dat betekent ook dat planten hun waterverlies kunnen beperken: planten kunnen hun vocht veel beter vasthouden als de huidmondjes dicht zijn. Het gevolg daarvan is weer dat planten onder hogere CO₂-concentraties sneller kunnen groeien, zeker ook in combinatie met de hogere temperaturen (Körner et al, 2007, Kruijt et al 2008).



3. Genetische adaptaties

Klimaatverandering tast dus, direct of indirect, de overlevingskansen van organismen aan. Organismen zijn echter niet star. Door de tijd en over generaties heen kunnen ze zich aanpassen aan veranderende omstandigheden. Wat aanvankelijk de overlevingskansen van de soort aantastte, vormt daardoor na verloop van generaties geen bedreiging meer.

De bosuil (*Strix aluco*), die wijdverspreid voorkomt in de gematigde zones van Europa, lijkt dat te illustreren. De uil heeft een verenkleed dat van individu tot individu varieert van lichtgrijs tot roodbruin, afhankelijk van de hoeveelheid aanwezige melanine. Die pigmentatie staat los van leeftijd of geslacht, en is in hoge mate erfelijk. De kleurverschillen zijn gradueel van aard, maar als gevolg van een bimodale verdeling kunnen de uilen grofweg worden onderverdeeld in twee groepen: grijze en bruine exemplaren.

Uit een langlopend onderzoek naar een populatie bosuilen in Finland is gebleken dat beide groepen niet alleen verschillen qua kleur van hun verenkleed. Ook in overlevingskansen bestonden er verschillen. Als gevolg daarvan, zo meldden [Brommer et al. 2005](#), brachten de grijze individuen meer nakomelingen voort dan hun bruine tegenhangers.

Maar daarmee was het verhaal nog niet af. [Karell et al 2011](#) wierpen een tweede blik op de gegevens, plus die van latere jaargangen, en ontdekten dat de dataset nog meer te vertellen had. Inderdaad behaalden de grijze individuen, bekeken over de gehele studieperiode van 1981 tot 2008, hogere reproductiecijfers dan de bruine uilen. Maar dat plaatje was langzaam maar zeker aan het veranderen. In de jaren 1981-2008, en dan met name aan het eind van die studieperiode, waren de overlevingskansen van de bruine individuen sterk gestegen,

terwijl de overlevingskansen van de grijze individuen min of meer gelijk bleven. De effecten daarvan waren terug te zien in de populatie. Bestond in 1980 slechts 25 procent van de populatie uit bruine individuen, en was dat aantal eind jaren '80 teruggelopen tot minder dan 15 procent, in 2008 lag datzelfde aantal op 45 procent. Die veranderingen in de studiepopulatie weerspiegelden landelijke veranderingen. Uit vogelringbestanden bleek dat in heel Finland bruine bosuilen een steeds algemenere verschijning werden. In 1960 had 15 procent van de Finse populatie bosuilen uit bruine individuen bestaan, in 2008 was hun relatieve voorkomen opgelopen tot 40 procent (Karell et al 2011).

Was hier sprake van kanswerking (*genetic drift*) of van een evolutionair selectieproces? Karell et al 2011 beargumenteerden het laatste. Volgens hun zijn de verschuivingen te grootschalig, en te consistent, om uit te gaan van kanswerking alleen. De onderzoekers ontwikkelden computermodellen waarin ze de overlevingskansen van grijze en bruine bosuilen beschreven als functie van prooibeschikbaarheid, omgevingstemperatuur en sneeuwlaagdikte. Die modellen wezen sneeuwlaagdikte aan als kritische variabele. Bij geen tot geringe sneeuwlaag (0 tot 5 cm) bleken de overlevingskansen van grijze en bruine individuen aan elkaar gelijk. Maar bij dikkere sneeuwlagen bleken de grijze uilen in het voordeel. Daarbij gold: hoe dikker de sneeuwlaag, hoe meer de overlevingskansen van grijze en bruine uilen divergeerden, in het voordeel dus van de grijze uilen.

Omdat uit meteorologisch onderzoek bekend was dat de gemiddelde sneeuwlaagdikte in zuidelijk Finland tijdens winters was afgenomen van meer 10 centimeter begin jaren '80 tot minder dan 5 centimeter anno 2008, concludeerden Karell et al 2011 dat de relatieve toename van bruine exemplaren in de populatie bosuilen een evolutionaire aanpassing is op de recente klimaatverandering. Op welke manier een bruin verenkleed in een sneeuwrijke omgeving selectieve voordelen bood – via camouflage of een ander mechanisme – konden de onderzoekers echter nog niet zeggen. (Als klimaatverandering en daardoor veranderde sneeuwvalpatronen inderdaad een effect hebben op camouflage en daarmee op overlevingskansen, zou dat overigens niet het enige gedocumenteerde voorbeeld zijn. Recentelijk rapporteerden Mills et al 2013 een mismatch tussen vachtkleur van sneeuw hazen en sneeuwval in de Amerikaanse staat Montana.)

Alhoewel het verband tussen klimaatverandering en de opkomst van de bruine bosuil dus nog niet voor de volle honderd procent vaststaat, is de studie van Karell et al 2011 één van de beste voorbeelden van genetische responsen op klimaatverandering die we momenteel hebben. Het punt is dat er op dit moment nog niet zo heel veel bewijs gevonden is voor

klimaatgedreven genetische responsen. Wetenschappelijke publicaties over door klimaatverandering geïnduceerde biologische responsen zijn er genoeg. Maar studies die die responsen kunnen toeschrijven aan genetische adaptatie, en daarmee de rol van fenotypische plasticiteit uitsluiten, die zijn dun gezaaid (reviews van dergelijke studies: [Gienapp 2008](#); [Hoffmann & Sgro 2011](#); [Merila 2012](#); [Boutin & Lare 2014](#); [Chambertien & Gienapp 2014](#)).

Zoals [Gienapp et al 2008](#) opmerken in hun artikel, getiteld *Climate change and evolution: disentangling environmental and genetic responses*, zijn de meeste studies over de biologische effecten van klimaatverandering gebaseerd op fenotypische scores. Daardoor is het niet mogelijk om fenotypische responsen te scheiden van genetische responsen, en is het dus ook niet bekend of er überhaupt een genetische component in het spel is. De onderzoekers noemen als voorbeeld de reviews van [Parmesan & Yohe 2003](#) en [Root 2003](#). Tezamen overspannen die reviews honderden studies, maar slechts drie daarvan leveren aanwijzingen voor een *mogelijke* genetische respons.

In de introductie van het artikel, getiteld *Evolution in response to climate change: in pursuit of the missing evidence* geeft [Merila 2012](#) een overzicht van de laatste stand van zaken betreffende studies met bewijs voor klimaatveranderinggedreven micro-evolutie. Experimentele studies met fruitvliegjes niet meegerekend, omvat dat overzicht vijf voorbeelden. De studie naar pigmentatie van het verenkleed van de bosuil is daar één van. De andere vier voorbeelden betreffen allen fenologische responsen.

Zo is er de studie naar een populatie zwartkoppen (*Sylvia atricapilla*) die broedt in het zuiden van Duitsland. Oorspronkelijk overwinterde deze migrerende zangvogel alleen op het Iberisch schiereiland. Maar sinds de laatste dertig jaar trekt een deel van de populatie in de herfst niet naar het zuidwesten weg, maar naar het westen, om te overwinteren in Groot-Brittannië. Populatie-genetisch onderzoek heeft aangetoond dat het om twee subpopulaties gaat, die dus genetisch van elkaar zijn gescheiden. Nu is het zo dat vrijwel alle dieren, uiteenlopend van muggen tot knaagdieren, de timing van seizoensgebonden gebeurtenissen – zoals tijdstip van migratie, reproductie, de rui of winterslaap – afstellen op daglengte. Met andere woorden: pas als er per etmaal een minimaal of maximaal aantal uren daglicht is, en dat gedurende een bepaald aantal etmalen achtereen, zal een trekvogel beginnen aan een migratie, of bijvoorbeeld met broeden. Als gevolg van het verschil in daglengte tussen Groot-Brittannië en het Iberisch schiereiland – Groot-Brittannië ligt immers op een hogere breedtegraad – verlaat de Britse populatie zwartkoppen eerder haar overwinteringsgebied.

Bovendien hoeven ze vanaf daar minder afstand af te leggen om in Duitsland aan te komen. Het gevolg is dat de Britse zwartkoppen eerder het broedgebied bereiken dan de Spaanse en Portugese zwartkoppen. Mannetjesvogels die als eerste in het broedgebied aankomen, nemen de beste nestplekken in. De vrouwtjes die als eerste aankomen, hebben de mannetjes met de beste nestplekken voor het uitkiezen. Die paartjes hebben een groter broedsucces. Met andere woorden: er vindt natuurlijke selectie plaats om te overwinteren in Groot-Brittannië, en zo eerder in het broedgebied aan te komen (Berthold et al 1992; Bradshaw & Hopzapfel 2007; Pulido & Berthold 2010).

Het enige zoogdier in het lijstje van Merila 2012 is de Amerikaanse rode eekhoorn (*Tamiasciurus hudsonicus*). Reale et al 2003 beargumenteerden dat tussen 1981 en 2001 als gevolg van toegenomen droogtestress, en het daardoor toegenomen aanbod van sparrenkegels, de geboorteperiode van een gemonitorde Canadese populatie 18 dagen vooruit was geschoven. Bevielen vrouwtjes uit het jaar 1989 gemiddeld nog op 8 mei, vrouwtjes uit het jaar 1998 deden dat gemiddeld rond 20 april. Uit stamboomanalyse kwam naar voren dat het moment van geboorte deels overerfelijk is (voor degenen die dat wat zeggen; $h^2 = 0.15$), en dat de waargenomen fenologische verschuiving dan ook deels (voor 13 procent) genetisch was bepaald.

Fenotypische versus genetische responsen

Om dit hoofdstuk goed te kunnen begrijpen, is het van belang het verschil te kennen tussen fenotypische (niet te verwarren met fenologische) en genetische responsen. Dat onderscheid kan misschien het eenvoudigst verduidelijkt worden aan de hand van een voorbeeld.

Westerse mensen die veel tijd in de zon doorbrengen, ontwikkelen gedurende hun leven een dikkere, donkerdere huid dan mensen die dag in dag uit binnen zitten. Die zongebruinde huid beschermt ze tegen schadelijke effecten van zonnestraling. Maar omdat die aanpassing van een dikkere, donkerde huid uitsluitend fenotypisch is – wat wil zeggen: niet gepaard gaat met veranderingen in je DNA – kun je die 'aangeleerde' eigenschap niet doorgeven aan je kinderen.

Toen onze voorouders uit Afrika migreerden, hebben zij geleidelijk een lichtere huid gekregen, vermoedelijk zodat blanken via hun huid met behulp van zonlicht vitamine D kunnen aanmaken. Hierbij is sprake van genetische aanpassing: de lichtere huid wordt van

generatie op generatie doorgegeven, en zelfs als blanken nu opgroeien in hartje Afrika, blijven ze blank. Er is sprake van een genetische respons.

Waarom is het zo belangrijk om te vast te stellen of een bepaalde waargenomen respons genetisch of fenotypisch van aard is? Daar zijn twee redenen voor. Ten eerste geldt dat fenotypische plasticiteit zijn grenzen kent: de huid van een blanke kan variëren in pigmentatie, maar zal nooit zo donker worden als die van een neger. Het kan dus zijn dat een soort een bepaalde omgevingsverandering aanvankelijk aardig lijkt te kunnen weerstaan, totdat een zekere tolerantielimiet bereikt wordt en de soort alsnog (lokaal) zal uitsterven. Ten tweede geldt dat een fenotypische respons strikt genomen niet als een aanpassing mag worden beschouwd. Fenotypische plasticiteit is eerder een uiting van het feit dat hoe een organisme eruit ziet, zowel wordt bepaald door genen als door de omgeving. Wanneer de omgeving verandert (zoals in het geval van klimaatverandering), zal een organisme daardoor ook veranderen.

Veel fenologische responsen (let op: niet fenotypische responsen), en dan met die van planten, zijn daar een voorbeeld van. Voor veel plantensoorten geldt dat het moment in het jaar waarop ze beginnen met bloeien, of bladeren ontwikkelen of juist afwerpen, wordt bepaald door de omgevingstemperatuur. Een bepaalde minimum of maximum aan temperatuur gedurende een zeker tijdsbestek, vormt voor planten het signaal om een bepaald proces in gang te zetten. Het behoeft dus weinig verbazing dat, nu de temperaturen op aarde mondiaal stijgen, veel plantensoorten eerder tot bloei komen en later in het najaar hun bladeren afwerpen.

Voor dieren ligt dat anders. Het feit dat zij eveneens, net als planten, bepaalde seizoensgerelateerde gebeurtenissen op een ander moment in het jaar (eerder of later) plannen, is opmerkelijker. Bij de timing van die gebeurtenissen speelt namelijk veelal niet temperatuur maar daglengte een beslissende rol, en daglengte is tenslotte ongevoelig voor klimaatverandering.

Het verschijnsel dat bepaalde gebeurtenissen in de levenscyclus van een organisme worden getriggerd door daglengte, wordt fotoperiodiciteit genoemd (Bradshaw & Hopzapfel 2010). Een deel van onze kennis over fotoperiodiciteit hebben we te danken aan onderzoek naar een steekmug met de wetenschappelijke naam *Wyeomyia smithii*, die zijn eitjes legt in carnivore bekerplanten. Zo heeft laboratoriumonderzoek aangetoond dat populaties van deze soort die op 30 graden noorderbreedte voorkomen pas in winterslaap gaan als er per etmaal minder dan 12 uur aan daglicht overblijft, terwijl populaties die op 46 graden

noorderbreedte leven, al in winterslaap gaan als het nog 15 uur per dag licht is. Dat strookt met veldobservaties, waaruit is gebleken dat populaties op 30 graden noorderbreedte pas in november aan de winterslaap beginnen en populaties op 42.5 graden noorderbreedte het eind augustus al voor gezien houden. Het strookt ook met het gegeven dat de levensomstandigheden voor de steekmug op 42.5 graden noorderbreedte vroeger in het najaar ongunstig worden dan op 30 graden noorderbreedte (Bradshaw & Hopzapfel 2010).

Relevant voor ons verhaal is nu dat Bradshaw & Hopzaphel 2001 vaststelden dat steekmuggen die in het jaar 1972 in het veld werden verzameld en vervolgens in gecontroleerde klimaatkamers werden getest op hun fotoperiodiciteit, andere testresultaten opleverden dan steekmuggen die in het jaar 1996 in het veld werden verzameld. De drempelwaarde (het maximaal aantal uren daglicht waarbij de steekmug in winterslaap gaat) bleek lager te liggen voor de muggen uit 1996 dan voor de muggen uit 1972. Daarbij gold dat dat verschil groter was voor populaties die voorkwamen op hogere breedtegraden, waar de effecten van klimaatverandering het sterkst zijn. Omdat de muggen werden getest in klimaatkamers met identieke omgevingscondities, concludeerden Bradshaw & Hopzaphel 2001 dat die verandering in kritische fotoperiode, die een aanpassing lijkt te zijn op klimaatverandering, het gevolg moest zijn van genetische aanpassing.

De zoektocht naar bewijs voor genetische responsen op klimaatverandering

We hebben nu vier voorbeelden besproken van (mogelijke) genetische aanpassing aan klimaatverandering: die van de bosuil, zwartkop, Amerikaanse rode eekhoorn, en die van de steekmug *Wyeomyia smithii*. Het vijfde en laatste voorbeeld uit het lijstje van Merila 2012, betreffende de vervroegde bloeitijd van koolzaad (*Brassica napus*) (Franks et al 2007), zullen we verderop kort bespreken.

Vijf voorbeelden van genetische aanpassing aan klimaatverandering is natuurlijk een karig lijstje. Maar in een recent artikel merken Merila & Hendry 2014 op dat er vooralsnog weliswaar weinig studies zijn die de invloed van fenotypische plasticiteit bij klimaatadaptaties volledig kunnen uitsluiten, maar dat omgekeerd evengoed geldt dat er weinig studies zijn die een genetische respons volledig kunnen uitsluiten. Hun punt is dat je zonder bewijs van het tegendeel er niet zonder meer van uit mag gaan dat een bepaalde respons een fenotypische respons is (net zo min als dat je van het tegenovergestelde uit mag gaan). Vooral niet omdat het niet eenvoudig is om een klimaatgedreven genetische adaptatie aan te tonen. Daarvoor moet je tenslotte minimale drie zaken bewijzen: dat de

eigenschap in kwestie erfelijk is, dat er natuurlijke selectie in werking is (met andere woorden: dat het bezit van die eigenschap de overlevingskansen vergroot ten opzichte van individuen die die eigenschap niet bezitten), en dan ook nog dat er een link bestaat met klimaatverandering.

Het recente artikel van [Merila & Hendry 2014](#) maakt onderdeel uit van een themanummer van de journal *Evolutionary applications*. In dat themanummer, getiteld *Climate change, adaptation and phenotypic plasticity*, wordt een uitgebreid overzicht gegeven van de bestaande literatuur over genetische of fenotypische responsen op de huidige klimaatverandering. Daarbij passeren verschillende groepen organismen afzonderlijk van elkaar de revue, waaronder zoogdieren ([Boutin & Lane 2014](#)), vogels ([Chambartien & Gienapp 2014](#)), vissen ([Crozier & Hutchings 2014](#)) planten ([Franks et al 2014](#)) en ongewervelden ([Schilthuizen & Kellermann 2014](#); [Stoks et al 2014](#)).

Uit het themanummer blijkt dat het zojuist genoemde overzicht van [Merila 2012](#) niet uitputtend was, en dat er meer studies bestaan die aanwijzingen hebben gevonden voor een genetische aanpassing aan klimaatverandering – zij het nog steeds niet bijster veel. Eén zo'n studie is die van [Brakefield & De Jong 2011](#). Deze onderzoekers van de universiteit van Leiden monitorde decennialang populaties lieveheersbeestjes (*Adalia bipunctata*) in Nederland. Vergelijkbaar met wat we eerder zagen voor bosuilen, kunnen die lieveheersbeestjes op basis van de kleur van hun pantser worden ingedeeld in twee aparte klassen: rood met zwarte stippen, en zwart met rode stippen. Bekend is dat de pantserkleur genetisch wordt bepaald. Daarbij zijn meerdere genen betrokken, waarvan de allelen voor zwart steeds dominant zijn over niet-zwart.

Begin jaren '80 stelden de onderzoekers vast dat er dwars door Nederland een gradiënt in pantserkleur liep. De frequentie van zwarte individuen nam geleidelijk toe naarmate je vanuit de kust richting Duitsland reed: van 10 procent aan de kust naar 60 procent landinwaarts. Uit latere surveys in 1991, 1995, 1998 en 2004 bleek dat die gradiënt langzaam aan het verdwijnen was, zozeer zelfs dat die tegen het jaar 2004 nagenoeg was verdwenen. De frequentie zwarte lieveheersbeestjes was nu overal in het land ongeveer gelijk, namelijk rond de 20 procent.

Laboratoriumexperimenten waarin lieveheersbeestjes werden blootgesteld aan factoren als straling, warmte, en windstroming, leidden tot de vaststelling dat zwarte individuen (ten opzichte van rode individuen) in het voordeel zijn bij lage temperaturen, weinig wind, hoge stralingsintensiteit, en bij wisselend bewolkt weer waarbij de zon met tussenpozen schijnt.

Dertig jaar geleden waren die omstandigheden landinwaarts in Nederland aanwezig, zowel tijdens de zomer als in het vroege voorjaar, wanneer de lieveheersbeestjes tevoorschijn komen uit hun winterslaap. In de tussenliggende drie decennia is het klimaat in Nederland echter veranderd, zoals bekend, en dan met name landinwaarts. In het binnenland is het nu warmer, en is er minder bewolking. De verschillen in klimaat aan de kust en die landinwaarts zijn daarmee grotendeels verdwenen – net als de verschillen in frequenties zwarte lieveheersbeestjes (Brakefield & De Jong 2011; Schilthuizen & Kellermann 2014). De vraag die zich daarbij opdringt is verwoord in de titel van het artikel van Brakefield & De Jong 2011: *A steep cline in labybird melanism has decayed over 25 years: a genetic response to climate change?*

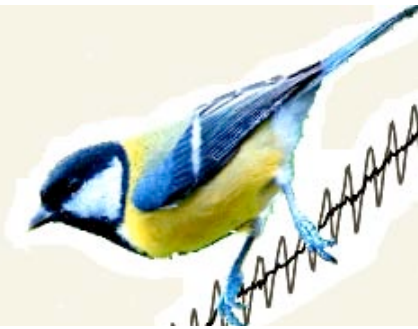
De studie van Brakefield & De Jong 2011, net als de meeste andere studies die we in dit hoofdstuk hebben besproken, is een voorbeeld van een studie over tijd, waarbij klimaatveranderingenresponsen kunnen worden geanalyseerd door datasets uit verschillende jaartallen met elkaar te vergelijken. Zoals besproken door Franks et al 2014 (*Plant responses to climate change*) is dat niet de enige methode om genetische klimaatresponsen te detecteren.

Eén zo'n alternatieve onderzoeksmethode wordt gevormd door experimenten waarbij onderzoekers zaden van verschillende generaties planten (van dezelfde populatie) ontkiemen in een *common garden experiment*. Zo vergeleken Nevo et al 2012 gerst- en tarweplanten uit samples van 2008 met die van samples uit 1980, waarbij de zaden, als vanzelfsprekend, verzameld waren in hetzelfde gebied. De tarweplanten van zaden uit 2008 bloeiden 8.5 dagen eerder dan tarweplanten van zaden uit 1980; bij de gerstplanten liep het verschil zelfs op tot 11 dagen. Omdat de planten opgroeiden onder exact dezelfde groeiomstandigheden, moeten die verschillen wel een genetische verandering reflecteren.

De eerder genoemde – want door Merila 2012 geciteerde – Franks et al 2007 voerden een vergelijkbare studie uit met koolzaad (*Brassica napus*). Zij vergeleken in een *common garden experiment* planten van zaden die 11 jaar na elkaar in hetzelfde gebied verzameld waren. Nakomelingen bleken 1.9 tot 8.6 dagen eerder tot bloei te komen dan de voorouderlijke planten. Ook hier gold: omdat de planten opgroeiden onder dezelfde omstandigheden, konden die verschillen alleen maar het gevolg zijn van veranderingen in de genenpoel.

Als laatste voorbeeld dient hier de studie van Anderson et al 2012, die nog een andere onderzoeksmethode hanteerden. Als studie-organisme fungeerde daarbij een plant uit de kruisbloemenfamilie: *Boechera stricta*. Uit een experiment waarin de onderzoekers

kunstmatig selecteerden op vroege bloeiers, bleek dat evolutionaire selectie kon leiden tot een vervroeging van de bloeitijd van 0.2 tot 0.5 dagen per generatie. Dat was iets meer dan 20 procent van de vervroeging in bloeitijd die voor deze plantensoort tussen 1973 en 2011 in het wild is gesignaleerd. In dit geval bleek de fenologische respons dus zowel een genetische als een fenotypische component te hebben. De titel van het artikel luidde dan ook: *Phenotypic plasticity and adaptive evolution contribute to advancing flowering phenology in response to climate change.*



4. Poolwaartse migraties

In het vorige hoofdstuk hebben we een handjevol voorbeelden gezien van genetische adaptatie aan klimaatverandering. De beschikbare literatuur over (door klimaatverandering gedreven) range shifts is omvangrijker. Veelvuldig geciteerde meta-analyses en reviews zijn [Parmesan & Yohe 2003](#), [Hicking 2006](#), [Parmesan 2006](#), [Thomas 2010](#), [Garamvoelgyi & Hufnagel 2013](#) en [Chen 2011](#).

Vergelijkbaar met wat we eerder zagen voor fenologische verschuivingen, denken onderzoekers te weten dat veel van de waargenomen recentelijke range shifts toe te schrijven zijn aan klimaatverandering omdat de verschuivingen veelal plaatsvinden in de richting die je op basis van een opwarmende aarde zou verwachten. Dat houdt in: bergopwaarts in het geval van een verticale verschuiving, en poolwaarts in het geval van een horizontale verschuiving (waar wij ons op zullen concentreren).

Zoals geïllustreerd door [Burrows et al 2011](#), [VanDerWal et al 2013](#) en [Burrows et al 2014](#) is het idee dat verspreidingsgebieden alleen noordwaarts of zuidwaarts zouden verschuiven, feitelijk te zwart-wit, omdat klimaatverandering leidt tot fjnscalige verschuivingen van klimaatzones die onder meer beïnvloeden worden door de ligging van kustlijnen. Een versimpelde voorstelling van zaken, waarbij migraties worden geclassificeerd als ofwel noordwaarts ofwel zuidwaarts, helpt echter om de gegevens overzichtelijk en analyseerbaar te houden.

Uit een recente studie naar migratiepatronen van landplanten in Groot-Brittannië, uitgevoerd door [Groom 2013](#), bleek bijvoorbeeld dat verspreidingsgebieden in werkelijkheid

in alle richtingen inkrimpen en uitdijen. [Groom 2013](#) visualiseerde dat met behulp van circulaire histogrammen (zoals de 360 graden van een kompas), die weergaven in welke richtingen de meeste soorten binnen een bepaalde klasse of streek waren gemigreerd. Uit die histogrammen blijkt dat Britse plantensoorten in de afgelopen 50 jaar alle kanten op zijn gemigreerd: niet alleen naar het noorden of het zuiden, maar ook naar het westen en naar het oosten, en alles wat daar tussenin zit. Ook blijkt uit die histogrammen dat de gemiddelde migratierichting nooit perfect noordwaarts of zuidwaarts is, maar bijvoorbeeld noordnoordoost, of zuidwestwest. Uit die gedetailleerde routemaps leidde [Groom 2013](#) desondanks een aantal grove conclusies af. Van de ongeveer 500 soorten die gedurende de studieperiode hun verspreidingsgebied vergrootten, deed zo'n 56 procent dat in een overheersend noordwaartse richting. Van de ongeveer 400 soorten die terrein inleverden, schoof zo'n 53% naar het noorden – in beide gevallen ongeveer de helft dus. [Groom 2013](#) verwoordde zijn conclusie in de titel: *Some poleward movement of British native plants is occurring, but the fingerprint of climate change is not evident.*

[Hicking et al 2006](#) verzamelden eveneens gegevens over verspreidingsgebieden in Groot-Britannië. Zij concentreerden zich echter niet op plantensoorten, maar op diersoorten. Ze vonden bruikbare gegevens over in totaal 329 soorten uit uiteenlopende taxa, en bekeken voor die soorten hoe de noordelijke grenzen van hun verspreidingsgebieden tussen 1960 en 2000 veranderden. De titel van hun artikel, *A wide range of taxonomic groups are expanding polewards*, vatte de onderzoeksresultaten in één zin samen. Van de onderzochte 329 soorten schoof de noordgrens van 275 soorten (84 procent) gedurende de studieperiode noordwaarts. Van 52 soorten schoof de noordgrens in zuidelijke richting, en bij 2 soorten kwam de grens niet van zijn plek. Die resultaten waren sprekender dan die van de grootschalige review van [Parmesan & Yohe 2003](#), die vonden dat van in totaal 226 onderzochte distributiegrenzen, er 106 (47 procent) verschoven in de verwachte richting, er 36 in tegenovergestelde richting opschoven, en er 84 stabiel bleken. (De genoemde getallen zijn overgenomen van [Thomas 2010](#), en beslaan alleen regionale en continentale range shifts, niet lokale range shifts.)

[McCain & King 2014](#) deden een literatuurstudie naar effecten van klimaatverandering op zoogdieren. Voor populaties van 50 zoogdierensoorten vonden ze gegevens over hun geografische verspreidingsgebied door de jaren heen. Van die 50 soorten waren er 13 (26 procent) waarvoor bewijs bestond voor een noordwaartse range shifts. De verspreiding van

de overige 37 soorten bleef gedurende de studieperiodes onveranderd, wat inhoudt dat geen enkele soort zuidwaarts migreerde.

Op de website Compendiumvoordeleefomgeving.nl, op de webpage 'Ongewervelde dieren en areaalverschuiving' van het dossier 'Effecten van de klimaatverandering', zijn gegevens bijeengebracht over de geografische verspreiding van honderden soorten Europese ongewervelden. Van de onderzochte soorten waarvan de noordgrens van het verspreidingsgebied in Nederland of net ten zuiden van Nederland ligt, is het verspreidingsgebied van zo'n 100 soorten, met name loopkevers, libellen, zweefvliegen en weekdieren, in de afgelopen decennia naar het noorden verschoven. Van zo'n 50 dieren, waaronder veel bijensoorten, is het verspreidingsgebied juist naar het zuiden verschoven. Daarnaast bleef van 125 soorten het verspreidingsgebied waar het was. In dit databestand ligt het relatieve aandeel van noordwaarts geschoven soorten dus op 37 procent.

In hoeverre zijn dergelijke percentages indicatief voor een universele biologische respons op klimaatverandering? Veel van de onderliggende studies bestrijken een periode van meerdere decennia, en gaan terug tot 1960 of zelfs verder. Onwaarschijnlijk is dat gedurende die periode het leefgebied van een soort alleen veranderde in klimatologisch opzicht. Mogelijk raakte het habitat gefragmenteerd, vond er een invasie plaats van exoten, of nam het aantal bestuivers af. Al dat soort externe factoren kunnen eveneens invloed uitoefenen op de verspreiding van soorten (Root, 2003).

Om te corrigeren voor andere invloeden (dan klimaatverandering) op het geografisch voorkomen van soorten voerde Thomas 2010 (*Climate, climate change and range boundaries*) een simpele berekening uit. Hij wees erop dat de 52 zuidelijke verschuivingen in de dataset van Hicking et al 2006 het gevolg moesten zijn van andere invloeden dan klimaatverandering – zoals de introductie van exoten, habitatfragmentatie, etc – en dat je dat aantal daarom als relatieve maat kan nemen voor de sterkte van dergelijke effecten. Op basis van die redentatie stelde Thomas 2010 het percentage van 84 procent bij tot $(100 \cdot (275 - 52) / 329 =) 68$ procent.

Een andere kanttekening die bij de genoemde cijfers kan worden geplaatst, is dat onderzoekers vaak niet het hele verspreidingsgebied van een populatie of soort monitoren, maar alleen een grensgebied gebied. Een consequentie daarvan is dat wanneer een buitengrens blijkt te verschuiven, dat inderdaad kan betekenen dat als gevolg van klimaatverandering het verspreidingsgebied opschuift, maar ook simpelweg dat de populatie groeit, en als gevolg daarvan het verspreidingsgebied in alle richtingen uitbreidt. Wie alleen

een klein deel van het verspreidingsgebied monitort, bijvoorbeeld de noordelijke bovengrens, heeft daar geen zicht op.

Thomas & Lennon 1999 pakten het daarom anders aan. Met behulp van *The Atlas of Breeding Birds in Britain & Ireland* en *The New Atlas of Breeding Birds in Britain & Ireland* vergeleken ze de complete verspreidingsgebieden van Britse vogelsoorten met die van twee decennia eerder. Zoals te verwachten was gold van soorten die in het zuiden van Groot-Brittannië voorkwamen en waarvan het totale verspreidingsgebied in de tussenliggende jaren was afgenomen, de noordgrens van hun verspreidingsgebied omlaag was geschoven. Bij een algehele toename van de grootte van verspreidingsgebied, was de noordgrens omhoog. Het omgekeerde gold voor vogelsoorten die broedden in het noorden van Groot-Brittannië. Toch bleek uit de gegevens dat klimaatverandering wel degelijk eveneens een rol speelde. In het artikel *Birds extend their ranges northwards* maakten **Thomas & Lennon 1999** dat inzichtelijk met een grafiek. De x-as van die grafiek gaf weer of een verspreidingsgebied in grootte was toegenomen (positieve getallen) dan wel afgenomen (negatieve getallen). De y-as toonde of de noordgrens van de zuidelijke soorten naar het noorden (positieve getallen) of naar het zuiden (negatieve getallen) was opgeschoven. In zo'n grafiek geeft het punt waar de regressielijn de y-as snijdt (waarbij geldt $x = 0$, oftewel: een in grootte gelijkblijvend verspreidingsgebied) de gecorrigeerde schatting voor hoezeer de verspreidingsgebieden in de tussenliggende periode van 20 jaar poolwaarts zijn geschoven. Die schatting kwam uit op 18.9 km (ofwel 9,5 km per decennium).

Het sterkste bewijs dat klimaatverandering een rol speelt in de gedocumenteerde range shifts, werd misschien wel geleverd door **Chen et al 2011**. Net als **Root et 2003** eerder al beargumenteerden voor fenologische verschuivingen, beredeneerden **Chen et al 2011** dat aangezien de opwarming van de aarde sneller verloopt op hoge breedtegraden dan op lage breedtegraden, de range shifts sterker zouden zijn voor soorten die dicht bij de polen voorkwamen dan voor soorten die dicht bij de evenaar leefden. Op basis daarvan stelden de onderzoekers een formule op die voor iedere breedtegraad de verwachte hoeveelheid geografische verschuiving weergaf, uitgedrukt in kilometers. Na vergelijking met beschikbare gegevens van in totaal 754 soorten, bleken die verwachte waardes sterk te correleren met de werkelijke, waargenomen waardes. Soorten die voorkwamen op hogere breedtegraden migreerden inderdaad sneller dan soorten die dicht bij de evenaar voorkwamen. (Het artikel heet dan ook: *Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming.*)

De gemiddelde snelheid van verschuiving waarop [Chen et al 2011](#) uitkwamen, voor alle soorten langs alle breedtegraden samen, was iets meer dan 16,5 kilometer per decennium. Omdat [Chen et al 2011](#) een groot deel van hun database overnamen uit [Hicking et al 2006](#), is het misschien niet heel verwonderlijk dat die laatst genoemde onderzoekers een vergelijkbare schatting gaven: 12,5 tot 25 kilometer per decennium. [Parmesan & Yohe 2003](#) zaten met een schatting van 6.1 kilometer per decennium ruim onder de helft daarvan.

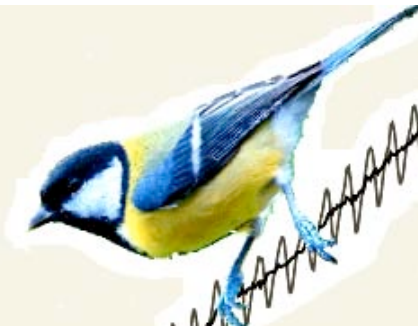
Twee van de bekendste soorten die recentelijk vanuit het zuiden Nederland hebben veroverd, vermoedelijk daarbij geholpen door klimaatverandering, liggen ruim boven dat gemiddelde. De wespenspin werd in 1980 voor het eerst in Nederland waargenomen, aan de rivier Gulp in Zuid-Limburg. Nog geen dertig jaar later, in 2008, bleek de soort de oversteek naar de Rottumerplaat te hebben gemaakt. Gedurende zijn opmars door Nederland legde de soort zo'n 100 kilometer per decennium af. De eikenprocessierups migreerde met 150 kilometer per decennium zelfs nog iets sneller. In 1991 werd de rups voor het eerst waargenomen in Noord-Brabant, in 2010 trof men voor het eerst exemplaren aan in Groningen (www.compendiumvoordeleefomgeving.nl).

Maar het kan nog sneller. [Poyri et al 2009](#), die onderzoek deden naar de migratiepatronen van vlinders in Finland, stelden vast dat minimaal drie soorten in acht jaar tijd meer dan 300 kilometer noordwaarts waren gemigreerd. Die migratiesnelheid, van bijna 400 kilometer per decennium, was volgens de auteurs goed voor een wereldrecord.

Per soort bestaan er dus grote verschillen in migratiesnelheden. [Hicking et al 2006](#) onderzochten de gemiddelde migratiesnelheden van taxonomische groepen (zoals zoogdieren, vogels, vlinders, vissen, spinnen, libelles en andere groepen ongewervelden), en concludeerden dat de verschillen tussen die groepen statistisch significant zijn. [Berg et al 2010](#) voerden een vergelijkbare analyse uit, met dat verschil dat ze een indeling maakten naar trofisch niveau (planten, herbivore ongewervelden, predatoren, en dat zowel bovengronds als ondergronds). Om de verschillende gemiddelde migratiesnelheden in één grafiek te kunnen tonen, waren ze gedwongen gebruik te maken van een log-schaal.

Het is niettemin onjuist om te denken dat bepaalde taxonomische groepen wel de dans zullen ontspringen, en andere groepen niet. Zoals benadrukt door [Chen et al 2011](#), is de variatie *binnen* taxonomische groepen vaak groter dan de variatie *tussen* taxonomische groepen. Met andere woorden: binnen een taxonomische groep zijn er zowel soorten die zeer traag migreren als soorten die heel snel migreren.

Zijn er misschien andere factoren (dan taxonomische groep of trofisch niveau) die de verschillen in migratiesnelheden eveneens, of zelfs nog beter, kunnen verklaren? Om die vraag te beantwoorden, voerden de zojuist ook al even genoemde [Pöyri et al 2009](#) een hele reeks aan statistische testen uit, waarbij ze de migratiesnelheden van Finse vlindersoorten (afhankelijke variabele) afzetten tegen factoren (verklarende variabelen) als lichaamsgrootte, broedgebied (bos of grasland), overwinteringsstadium (larve, pop, of volwassen individu), en type gastheerplant (grassen, kruiden of houtachtig). Uit die analyses, zo melden de auteurs in een artikel getiteld *Species traits explain recent range shifts of Finnish butterflies*, kwam ondermeer naar voren dat vlindersoorten die voorkomen in bossen sneller migreren dan soorten die geassocieerd zijn met graslanden. De auteurs voegden daar aan toe dat die uitkomst misschien niet heel verrassend is wanneer je bedenkt dat Finland hoofdzakelijk uit bossen bestaat, en graslanden alleen geïsoleerd voorkomen. De bevindingen van [Poyri et al 2009](#) zijn met name interessant omdat ze het belang illustreren van natuurlijke corridors. De Finse vlindersoorten leveren empirisch bewijs voor de stelling dat om de klimaatverandering en de verschuiving van klimaatzones bij te kunnen benen, veel soorten dat soort corridors daadwerkelijk nodig hebben.



5. Extincties

Hoeveel kilometer per decennium een gemiddeld verspreidingsgebied precies opschuift, is op zichzelf misschien niet zo heel relevant. Maar inzicht in de snelheid van range shifts kan antwoord geven op de vraag of soorten snel genoeg migreren om de klimaatverandering bij te benen.

Als we uit moeten gaan van de modellen van [Loarie et al 2009](#), is het antwoord op die vraag: ja, soorten migreren snel genoeg. In een artikel getiteld *The velocity of climate change* gaven zij een schatting van hoe snel een soort moet opschuiven om in de toekomst dezelfde omgevingstemperatuur te behouden. Uitgaande van IPCC's A1B uitstootscenario, kwam die schatting uit op een gemiddelde van 0.42 kilometer per jaar, ofwel 5 kilometer per decennium – minder dan zelfs de meest behoudende schatting over de snelheid van actuele range shifts (de 6.1 kilometer per decennium van [Parmesan & Yohe 2003](#)). Daarbij dient wel te worden opgemerkt dat er tussen biomen grote onderlinge verschillen bestonden. In sommige gebieden moeten soorten minimaal 1.26 kilometer per jaar migreren, ofwel 15 kilometer per decennium, om de klimaatverandering bij te houden, aldus [Loarie et al 2009](#).

Of soorten snel genoeg migreren, is echter onderhevig aan discussie. Vraag verschillende wetenschappers naar het antwoord, en ze zullen verschillende, tegenovergestelde, antwoorden geven.

[Warren et al 2013](#) bijvoorbeeld waren minder positief gestemd. De onderzoekers voerden eveneens een mondiale analyse uit en deden daarvan verslag in het artikel *Quantifying the benefit of early climate change mitigation in avoiding biodiversity loss*. Hun modellen

voorspelden dat wanneer organismen niet migreerden, 57 procent van alle plantsoorten en 34 procent van alle diersoorten (met een onzekerheidsmarge van in totaal 12 procent) rond het jaar 2080 meer dan de helft van hun verspreidingsgebied zouden hebben moeten inleveren. Migratiegedrag kon die negatieve effecten slechts ten dele tegengaan, namelijk met zo'n 40 tot 60 procent.

Het onderzoek van [Warren et al 2013](#) sloot aan op een eerdere studie van [Thuiller et al 2005](#). In het artikel *Climate change threats to plant diversity* concludeerden die onderzoekers dat het tempo van de huidige klimaatverandering voor veel Europese plantensoorten te hoog lag. De onderzoekers modelleerden de toekomstige ranges van 1.350 Europese plantensoorten onder verschillende klimaatscenario's. Hun modellen lieten zien als gevolg van habitatverlies meer dan de helft van al die soorten tegen het jaar 2080 op IUCN's Rode Lijst van bedreigde soorten zouden prijken.

Dezelfde onderzoeksgroep publiceerde een jaar later de uitkomsten van simulaties voor Europese amfibieën en reptielen, en meldde dat die ectothermen volgens hun modellen minder zouden lijden onder klimaatverandering dan wel eens voorspeld ([Araujo et al 2006](#), *Climate change and the decline of amphibians and reptiles in Europe*). Die conclusie werd echter weer in twijfel getrokken door de modellen van [Buckley et al 2013](#) (*Can terrestrial ectotherms escape the heat of climate change by moving?*).

Grofweg gesteld, zo beweert [Thuiller 2007](#) in de opiniesectie van *Nature*, geldt dat met iedere 1°C aan mondiale temperatuurstijging, klimaatzones met gemiddeld 160 kilometer noordwaarts opschuiven. Aangezien volgens sommige klimaatmodellen de temperatuur op aarde voor het jaar 2100 met 4°C zal zijn gestegen, houdt dat in dat soorten deze eeuw zeker 500 kilometer richting de polen zullen moeten migreren om in geschikte klimaatzones te blijven. Dat komt neer op $500/10 = 50$ kilometer per decennium, aanzienlijk meer dan de gemiddeldes van 6.1 tot 19 kilometer per decennium, die tot nu toe in de natuur zijn waargenomen. Het KNMI-scenario 'Stoom', het meest ongunstige scenario, gaat zelfs uit van 5.6°C aan temperatuurstijging (in zomers). Als we [Thuiller 2007](#) moeten geloven, vertaalt zich dat naar een klimaatzoneverschuiving van bijna 900 kilometer, oftewel 90 kilometer per decennium – een snelheid waar alleen de snelstmigrerende soorten kunnen tippen.

Bovengenoemde voorspellingen zijn allen gebaseerd op computermodellen. Daarom is het misschien aardig om een studie te benoemen die zich meer baseerde op bestaande empirische gegevens. [Bertrand et al 2011](#) beantwoordden de vraag namelijk vanuit een heel ander, origineel invalshoek. Zij baseerden zich op bestaande gegevens over bosvegetaties,

verspreid over Frankrijk, gedurende de periode 1965 tot 2008. Op basis van gegevens uit de periode 1965-1975 relateerden de onderzoekers omgevingstemperatuur aan soortsaamenstelling. Met andere woorden: ze onderzochten welke soortenset je mag verwachten bij welke gemiddelde lokale jaartemperatuur, en vice versa. Daarmee verschaften de onderzoekers zich een biologische maat voor temperatuur. Die proxy kon worden vergeleken met de werkelijk gemeten temperatuur. De onderzoekers stelden vast dat vanaf het jaar 1986 de van vegetatie afgeleide temperatuur en de werkelijk gemeten temperatuur uiteen begonnen te lopen. Meer preciezer geformuleerd gold dat de proxy achterbleef op de werkelijke waarde.

Opvallend daarbij was dat in tegenstelling tot heersende gedachtes – dat klimaatverandering vooral een bedreiging vormt voor soorten op bergtoppen – dat verschil het grootst bleek in laaglandgebieden, zoals verwoord in de titel van het artikel: *Changes in plant community lag behind climate warming in lowland forest*. In verband daarmee is het misschien interessant om te benoemen dat [Loarie et al 2009](#) stellen dat soorten die in vlakke, lage gebieden leven, meer zullen moeten migreren om de klimaatverandering bij te benen, dan soorten in gebergtes leven. De redenatie daarachter is dat bij een stabiel klimaat je in een vlak terrein grote afstanden dient af te leggen om in een andere klimaatzone terecht te komen, terwijl in gebergtes (als gevolg van de hoogteverschillen) verschillende klimaatzones dicht op elkaar liggen.

Klimaatgedreven extinctions: hebben die zich al voorgedaan?

Het bekendste artikel over het vraagstuk van klimaatgedreven extinctions verscheen in januari 2004 in *Nature* en droeg de titel *Extinction risk from climate change*. De auteurs, [Thomas et al 2004](#), simuleerden met een computermodel de toekomstige verspreiding van 1.103 soorten, uiteenlopend van planten, zoogdieren, reptielen en kikkers, tot vlinders en andere ongewervelden. De conclusies waren alarmerend. De simulaties lieten zien dat rond het jaar 2050 tussen de 15 en 37 procent van alle soorten uitgestorven of ernstig bedreigd zouden zijn. Met andere woorden: door toedoen van de mens werden miljoenen dieren en planten in hun voortbestaan bedreigd. Die voorspelling van [Thomas et al 2004](#) haalde wereldwijd de nieuwskranten.

Latere vergelijkbare onderzoeken konden rekenen op minder media-aandacht, maar leverden daarom niet minder zorgwekkende resultaten op. Ze waarschuwden [Malcolm et al 2006](#) dat bepaalde biodiverse *hotspots*, zoals bijvoorbeeld het Middellandse Zeegebied, in

een eeuw tijd meer dan 2000 soorten zouden kunnen verliezen, en wezen de modellen van [Sekercioglu et al 2008](#) uit dat minstens 550 vogelsoorten in 2100 zouden zijn uitgestorven als gevolg van op bergen omhoog schuivende klimaatzones, en dat nog eens 2150 vogelsoorten (van de in totaal 8500 landvogelsoorten) met uitsterven zouden worden bedreigd.

Hoe betrouwbaar zijn de modellen en hun dramatische voorspellingen? [Moritz & Agudo 2013](#) (*The future of species under climate change: resilience or decline?*) moeten het antwoord daarop schuldig blijven, maar merken wel op dat de voorspelde gevolgen van de huidige klimaatverandering vaak veel zwartgalliger zijn dan waartoe onze kennis over de gevolgen van voorbije klimaatveranderingen aanleiding geeft.

Feit is dat, afgezien misschien van *lokale* extincties (reviews: [Parmesan 2006](#), [Thomas et al 2006](#) en [Cahill 2012](#)), er voorlopig nauwelijks tot geen wetenschappelijk bewijs is gevonden van extincties die het gevolg van de recente klimaatverandering ([Cahill 2012](#)).

Het veelbesproken artikel van [Thomas et al 2004](#) benoemde één extinctie die met zekerheid aan klimaatverandering toegeschreven zou zijn. Dat betrof het uitsterven van de gouden pad, wetenschappelijke naam: *Bufo periglenes*. Die geelkleurige pad leefde in de tropische hooglandbossen van Costa Rico, totdat midden jaren '80 de populaties plotseling één voor één crashten. Volgens [Pounds et al, 1999](#) wees alles erop dat die massale sterfte het gevolg was van een veranderde luchtvochtigheid, wat op zijn beurt weer was gekoppeld aan de hogere oceaantemperaturen.

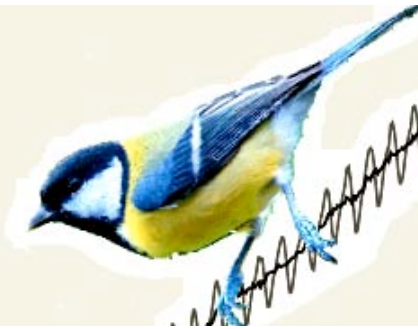
Zeven jaar later kwamen [Pounds et al 2006](#) echter met een andere verklaring. De gouden pad bleek niet de enige paddensoort uit de Nieuwe Wereld die recentelijk was uitgestorven. In de afgelopen 20 tot 30 jaar was tweederde van alle klompvoetpadden (*Atelopus*) van Midden- en Zuid-Amerika eveneens van de aardbodem verdwenen. De dader bleek een fungus, *Batrachochytrium dendrobatidis*. Toch ging de mens volgens [Pounds et al 2006](#) ook niet helemaal vrijuit. De reden dat de fungus had kunnen toeslaan zou namelijk de klimaatverandering zijn. Door de hogere temperaturen overlapte het overlevingsgebied van de fungus sinds kort met die van de amfibieën die op grotere hoogtes (en dus in relatief koudere omgevingen) voorkwamen.

Dit voorbeeld illustreert het wankele bewijs voor klimaatgedreven extincties. Op het moment dat [Cahill et al 2012](#) hun artikel publiceerden, telde IUCN's lijst van recente extincties in totaal 864 soorten. Twintig daarvan konden volgens het IUCN geheel of gedeeltelijk worden toegeschreven aan klimaatverandering. Maar het daadwerkelijke bewijs

dat die twintig extincties linkt aan klimaatverandering, is allesbehalve ijzersterk. Vaak ook zijn er tal van andere factoren in spel, factoren die zwaarder wegen.

Op het lijstje staan onder meer de gouden pad en zes klompvoetpadsoorten, zoals beschreven door [Pounds et al 2006](#). Daarnaast telt de lijst vier slakkensoorten en twee vissoorten, die allen uitstierven als gevolg van droogte en het verdwijnen van een aquatische habitat. Achter de zes vogelsoorten op de lijst staan meerdere doodsoorzaken opgesomd, waaronder jacht, vuur, droogte en ontbossing. Klimaatverandering zou een rol spelen door middel van overstromingen door storm, of juist via droogte.

Op het lijstje prijkt ook één zoogdier. Dat zoogdier is een hutia (*Geocrapromys thoracatus*), die leefde op het eilandje Little Swan voor de kust van Honduras en daarom Little Swan hutia heette. De soort stierf uit aan het eind van de vijftiger jaren, nadat in 1955 de orkaan Janet op het eiland huishield, en er in de daaropvolgende jaren huiskatten op het eiland werden geïntroduceerd. De link met klimaatverandering zou zijn dat heftige orkanen, zoals orkaan Janet, zich tegenwoordig vaker voordoen.



6. Interacties tussen soorten

In het eerste hoofdstuk hebben we gezien dat klimaatverandering leidt tot fenologische verschuivingen. Daarbij is kort benoemd dat er per soort en per trofisch niveau grote verschillen kunnen bestaan in mate van fenologische respons (zoals aangetoond door [Parmesan 2007](#), [Berg et al 2010](#) en [Thackeray 2010](#)). In theorie kunnen die verschillen leiden tot trofische asynchronie: dat voorheen op elkaar afgestemde biologische cycli uit de pas gaan lopen.

Een bekend praktijkvoorbeeld daarvan is de studie naar eiken, vlinders en zangvogels, uitgevoerd door het NIOO. Klimaatverandering blijkt wel sterke invloed uit te oefenen op het moment dat de bladeren van de zomereik in het voorjaar ontknopen en ook op de *hatching date* en groeisnelheid van herbivore rupsen – volgens [Van Asch et al 2013](#) zou die verschuiving van de *hatching date* overigens ook een genetische respons zijn – maar veel minder op het tijdstip dat de eerste mezenkuikens uit het ei kruipen.

Terwijl de rupsenpiek vanaf de jaren '80 met zo'n 7,5 dagen per decennium vooruit is geschoven, bleven koolmezen, pimpelmezen en zwarte mezen steken op 3,6 tot 5 dagen per decennium ([Both et al 2009](#)). Dat was weliswaar een sterkere reactie dan [Visser et al 1998](#) rapporteerden, die eerder, in een artikel getiteld *Warmer springs lead to mistimed reproduction in great tits (Parus major)*, nog concludeerden dat koolmezen zich helemaal niet aanpasten. Volgens [Both et al 2009](#) was daar dus wel sprake van, maar gold desondanks nog wel dat de rupsenpiek niet meer optimaal samenviel met de intensieve voerperiode van de mezenkuikens.

Zoals beargumenteerd door [Both et al 2009](#) (*Climate change and unequal phenological changes across four trophic levels: constraints or adaptations?*) en [Visser et al 2012](#) (*Adaptive phenological mismatches of birds and their food in a warming world*) kunnen daar verschillende redenen voor bestaan. Het kan zijn dat de mezen simpelweg niet in staat waren om zich – hetzij fenotypisch, hetzij genetisch – aan te passen aan de veranderende omstandigheden. Maar een andere mogelijkheid is dat de trofisch asynchronie in zekere zin adaptief was. Misschien dat het voordeel van een perfecte synchronisatie met de rupsenpiek niet opwoog tegen de fitnesskosten die gepaard gingen met vroeger in het voorjaar broeden. Misschien ook dat het te maken had met het gedrag van de sperwer, de belangrijkste natuurlijke vijand van de mezen, die volgens de data van [Both et al 2009](#) overigens geen fenologische respons vertoonde.

Voor één soort concludeerden de Nederlandse ecologen dat de trofische asynchronie in ieder geval niet adaptief was. Langdurige monitoring toonde aan dat de bonte vliegenvanger (*Ficedula hypoleuca*), een lange afstandstrekvogel, nauwelijks haar broedtijd vervroegde, misschien daarin beperkt door het tijdstip van aankomst in Nederland. In een artikel in *Nature* met de titel *Climate change and population declines in a long-distance migratory bird*, rapporteerden [Both et al 2006](#) een sterke achteruitgang van het aantal broedparen in Nederland, en dat de sterkste afnames (tot 90% reductie) zich voordeden in gebieden waar de rupsenpiek het vroegst in het voorjaar optrad. Vanwege die indirecte link tussen klimaatverandering en de populatiecrashes, voorspelden [Both et al 2006](#) een verdere terugloop van aan het aantal broedparen. Maar vanaf het moment dat [Both et al 2006](#) hun artikel publiceerden, nam het aantal bonte vliegenvangers in Nederland weer toe, zozeer zelfs dat het aantal broedparen dat jaarlijks in ons land neerstrijkt, inmiddels is verdubbeld ([Van Turnhout et al 2011](#)). Zo ontstond er niet alleen een mismatch tussen trofische niveaus, maar ook een mismatch tussen voorspelling en werkelijkheid.

De case study van de trofische asynchronie tussen Nederlandse rupsen en zangvogels laat twee dingen zien. Ten eerste dat biologische responsen niet op zichzelf staan. Aangezien soorten de elementen vormen van een ecosysteem, en die elementen wederzijds met elkaar verbonden zijn via onderlinge relaties, werken veranderingen op populatieniveau of soortniveau door tot op hogere niveaus, en leiden ze tot verschuivingen binnen of zelfs van ecosystemen ([Van der Putten 2010](#) en [Walther 2010](#)).

Ten tweede laat de case study zien hoe moeilijk het is om klimaateffecten op ecosystemen nauwkeurig te voorspellen. Misschien dat dat ook de reden is dat het wetenschappelijke

onderzoek naar biologische responsen op klimaatverandering zich tot nu toe gedeeltelijk heeft beperkt tot op soortniveau, en dat klimaateffecten op complexe ecosystemen minder goed onderzocht zijn (aldus [Walther 2010](#)). Uniek is bijvoorbeeld een recent verschenen studie van [Ovaskeinen et al 2013](#), met daarin een ecosysteem-brede analyse van fenologische responsen van zo'n 200 seizoensgebonden verschijnselen in een Russische taiga (*Community-level phenological response to climate change*).

[Tylianakas et al 2008](#) schreven een brede review over de effecten op biotische interacties van de belangrijkste *drivers* van mondiale verandering, waarbij ze niet alleen keken naar CO₂-uitstoot en klimaatverandering, maar ook naar stikstofdepositie, de introductie van exoten en de afname en versnippering van natuurlijk leefgebied. Ze maakten onderscheid naar vijf categorieën van waargenomen effecten:

- Verminderd mutualisme (bijvoorbeeld bestuiving en zaadverspreiding)
- Multitrofische effecten in de bodemvoedselketen
- Verschuivingen in de relatieve dominantie van dier en plantensoorten
- Toename of afname van predatie op herbivoren, en een toename van herbivorie
- Toename van pathogene invloeden op planten en dieren

Een zeer inzichtelijk overzicht van klimaatveranderingseffecten op biotische relaties wordt gegeven door [Berg et al 2010](#), in een artikel getiteld *Adapt or disperse: understanding species persistence in a changing world*. [Berg et al 2010](#) hebben in dat artikel een lijst opgesteld van alle mogelijke typen biologische interacties – bijvoorbeeld die tussen prooi en predator, tussen plant en bestuiver, tussen plant en herbivoor, plant en ziekteverwekker, gastheer en ziekteverwekker, etc. – en daarbij voorbeelden en referenties gegeven van hetzij gevonden, hetzij verwachte effecten van klimaatverandering. Eén zo'n verwacht effect is een hogere levensverwachting van gastheren in gastheer-parasietrelaties, omdat een hogere omgevingstemperatuur rechtstreeks leidt tot een actiever afweersysteem.

Soms zijn de empirisch gevonden effecten niet één-twee-drie te verklaren. Zo blijkt uit een meta-analyse van [Stiling & Cornelissen 2007](#) over de invloed van stijgende CO₂-gehaltenes op biotische interacties dat, hoewel de hoeveelheid herbivore insecten onder hogere CO₂-concentraties significant afneemt (wat op zich al vragen oproept), de totale consumptie van plantaardig materiaal alsnog stijgt.

Naast die directe effect van hogere temperaturen en CO₂-gehaltenes, dreigen biotische relaties vooral verstoord te worden doordat actoren (zoals plant en bestuiver (zie [Schweiger et al 2012](#))) als gevolg van klimaatverandering elkaar kunnen gaan mislopen of juist ontmoeten

(Schweiger et al 2008; Berg et al 2010, Walther 2010). Als gevolg van klimaatgedreven range shifts kunnen er zogeheten niet-analoge gemeenschappen ontstaan, zoals Walther 2010 bespreekt in het artikel *Community and ecosystem responses*. Het effect daarvan is in wezen vergelijkbaar met de introductie van een exoot (Van der Putten 2010).

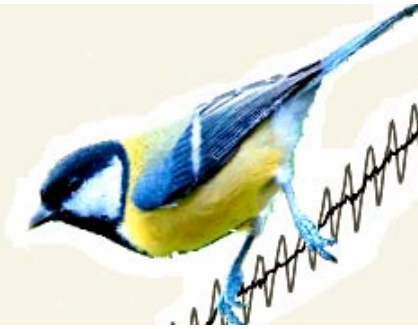
Zoals we net besproken hebben voor rupsen en zangvogels, kunnen fenologische verschuivingen eveneens leiden tot asynchronie, namelijk tot asynchronie van bepaalde gebeurtenissen die zich afspelen op verschillende trofische niveaus. In een review van bestaande wereldwijde studies naar fenologische mismatches, vonden Visser & Both 2005 (*Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yard stick*) elf praktijkvoorbeelden. In acht van die elf case studies week de fenologische verschuivingsnelheid van het studieorganisme af van de ideale situatie. De voorbeelden betroffen onder meer: de relatie tussen zoetwaterplankton en diatomen, de relatie tussen getijdeschaaldieren en planktonbloei, migratiegedrag en eilegdatum van vlinders ten opzichte van eiken en bloeitijd van kruiden, migratiegedrag van de wespindief ten opzichte van wespenabundantie, en de eilegdatum van drieteenmeeuwen, zeekoeten en kuifaalscholvers ten opzichte van abundantie van Noorse spiering (*Ammodytes marinus*).

Burthe et al 2012 deden nader onderzoek naar de interacties tussen Noorse zandspiering en zeevogelsoorten. In een artikel getiteld *Phenological trends and trophic mismatch across multiple levels of a North Sea pelagic food web* beargumenteerden de onderzoekers dat de vissen steeds later in de zomer een bepaalde grootte bereikten, maar dat de zeevogels daarop niet wachtten. Ondanks de lagere energie-intake per vis, vonden de onderzoekers geen negatieve effecten op de broedsucces van de zeevogels.

Negatieve fitness-effecten als gevolg van fenologische verschuivingen werden wel gevonden door Plard et al 2014 in een populatie reeën (*Mismatch between birth date and vegetation phenology slows the demography of the roe deer*) en door Post & Forchhammer 2008 (*Climate change reduces reproductive success of an Arctic herbivore through trophic mismatch*) voor een populatie rendieren. De laatsten, Post & Forchhammer 2008, meldden dat als gevolg van de temperatuurstijging planten op Groenland sinds 1993 steeds vroeger in het jaar groeien, maar dat het tijdstip van de geboorte van rendierkalfjes, dat niet wordt bepaald door temperatuur maar door daglengte, niet is veranderd. In vijftien jaar tijd was het aantal geboortes met 75 procent afgenomen, en waren de mortaliteitscijfers onder rendierkalven ook nog eens toegenomen.

Omdat de mens eveneens onderdeel uitmaakt van een ecosysteem, en verbonden is met andere soorten door middel van biotische adaptaties, kan zijn aanpassing aan de klimaatverandering eveneens invloed uitoefenen op andere soorten. Sinds de jaren '80 beginnen de Nederlandse boeren, in reactie op de hogere voorjaarstemperaturen, zo'n 15 dagen eerder met het maaiseizoen. De broedperiode van de grutto is daarentegen niet verschoven. Doordat broedperiode en maaiseizoen nu grotendeels overlappen, zijn gruttokuikens vaker blootgesteld aan maaiactiviteiten – en dat terwijl de grutto het toch al zo moeilijk heeft (Kleijn et al 2010).

Het voorbeeld van de grutto waarschuwt ons dat onze klimaatadaptatiestrategieën, zowel de bewuste als de onbewuste, consequenties kunnen hebben voor de overlevingskansen van andere organismen – en dat die klimaatadaptatiestrategieën niet alleen de ongewenste effecten van klimaatveranderingen kunnen tegengaan, maar soms juist versterken.



7. Synthese

Dat de huidige, antropogene klimaatverandering de natuur niet ongemoeid laat, tonen recente verschuivingen in de timing van seizoensgebonden biologische verschijnselen. Vergeleken met enkele decennia geleden, leggen vogels tegenwoordig vroeger in het voorjaar hun eieren en komen planten eerder tot bloei. Vlinders verpoppen eerder en de bronsttijd begint vroeger, terwijl in het najaar loofbomen juist enkele dagen of weken later hun bladeren verliezen en dieren later in winterslaap gaan (Parmesan & Yohe 2005; Root et al 2003).

Organismen kunnen op twee manieren inspelen op een opwarmende aarde en de bijkomende veranderingen in hun leefomgeving: door zich aan te passen (micro-evolutie), of door te migreren (Gienapp et al 2008). Wat die eerste optie betreft: vooralsnog hebben wetenschappers slechts enkele praktijkvoorbeelden gevonden van klimaatgedreven micro-evolutie (Gienapp et al 2008; Merila 2012; Merila & Hendry 2014). De wetenschappelijke literatuur over recente verschuivingen van verspreidingsgebieden, de tweede optie, is daarentegen omvangrijk. Het feit dat die waargenomen *range shifts* zich significant vaker voordoen in de richting die je op basis van klimaatverandering zou verwachten – namelijk richting de polen, ofwel van de evenaar vandaan (Parmesan & Yohe 2003; Hicking et al 2006) – en dat soorten sneller blijken te migreren in gebieden waar de aarde sneller opwarmt (Chen et al 2011), vormen aanwijzingen dat die range shifts het gevolg zijn van klimaatverandering.

De snelheid waarmee die range shifts zich voltrekken ligt gemiddeld rond de 6 tot 25 km per decennium (Parmesan & Yohe 2003; Hicking et al 2006; Chen et al 2011). De variatie tussen soorten is echter groot, en er zijn uitschieters bekend van migratiesnelheden tot honderden kilometers per decennium (zie bijv. Poyri 2009). Wetenschappers zijn verdeeld over de vraag hoeveel soorten snel genoeg (kunnen) migreren om de verschuiving van klimaatzones bij te benen. Modellerstudies voorspellen dat talloze soorten als gevolg van klimaatverandering in hun voortbestaan zullen worden bedreigd. Een aantal van die modellen voorspellen zelfs dat dit zal gelden voor meer dan een kwart van alle dier- en plantensoorten op aarde (Thomas et al 2004; Thuiller et al 2005; Sekercioglu et al 2008; Warren et al 2013).

Voorlopig is het bewijs voor klimaatgedreven extincties niettemin schaars of misschien wel afwezig. Van de ongeveer 900 extincties die zich volgens het IUCN in de afgelopen eeuwen hebben voorgedaan, zou er voor ongeveer 20 een link kunnen worden gelegd met klimaatverandering. In vrijwel alle gevallen is die link met klimaatverandering echter aanvechtbaar (Cahill 2012).

Wat geldt voor praktijkvoorbeelden van klimaatgedreven extincties, geldt ook voor praktijkvoorbeelden van klimaatgedreven negatieve populatietrends: ze zijn vooralsnog niet vaak waargenomen. Het is daarom te vroeg om harde conclusies te trekken over op welke manier organismen het meest lijden onder klimaatverandering. Op basis van de spaarzame voorbeelden die tot nu toe gedocumenteerd zijn, lijkt het er echter op dat de indirecte effecten van klimaatverandering, en dan met name de verstoring van (a)biotische interacties (ofwel ecologische mismatches, zie: Visser & Both 2005; Berg et al 2010; Tylianakas et al 2008) een grotere bedreiging vormen dan de temperatuurstijging op zich (Cahill 2012).

Literatuurlijst



- Anderson, J. T., Inouye, D. W., McKinney, A. M., Colautti, R. I., & Mitchell-Olds, T. (2012). Phenotypic plasticity and adaptive evolution contribute to advancing flowering phenology in response to climate change. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 279(1743), 3843-3852. doi: DOI 10.1098/rspb.2012.1051
- Araujo, M. B., Thuiller, W., & Pearson, R. G. (2006). Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. *Journal of Biogeography*, 33(10), 1712-1728.
- Bale, J. S., Masters, G. J., Hodkinson, I. D., Awmack, C., Bezemer, T. M., Brown, V. K., . . . Whittaker, J. B. (2002). Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8(1), 1-16. doi: DOI 10.1046/j.1365-2486.2002.00451.x
- Berg, M. P., Kiers, E. T., Driessen, G., van der Heijden, M., Kooi, B. W., Kuenen, F., . . . Ellers, J. (2010). Adapt or disperse: understanding species persistence in a changing world. *Global Change Biology*, 16(2), 587-598. doi: DOI 10.1111/j.1365-2486.2009.02014.x
- Berthold, P., Helbig, A. J., Mohr, G., & Querner, U. (1992). Rapid Microevolution of Migratory Behavior in a Wild Bird Species. *Nature*, 360(6405), 668-670.
- Bertin, R. I. (2008). Plant phenology and distribution in relation to recent climate change. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 135(1), 126-146. doi: Doi 10.3159/07-Rp-035r.1
- Bertrand, R., Lenoir, J., Piedallu, C., Riofrio-Dillon, G., de Ruffray, P., Vidal, C., . . . Gegout, J. C. (2011). Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*, 479(7374), 517-520.
- Blenckner, T., Adrian, R., Livingstone, D. M., Jennings, E., Weyhenmeyer, G. A., George, D. G., . . . Teubner, K. (2007). Large-scale climatic signatures in lakes across Europe: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 13(7), 1314-1326. doi: DOI 10.1111/j.1365-2486.2007.01364.x
- Both, C., Bouwhuis, S., Lessells, C. M., & Visser, M. E. (2006). Climate change and population declines in a long-distance migratory bird. *Nature*, 441(7089), 81-83. doi: Doi 10.1038/Nature04539
- Both, C., van Asch, M., Bijlsma, R. G., van den Burg, A. B., & Visser, M. E. (2009). Climate change and unequal phenological changes across four trophic levels: constraints or adaptations? *Journal of Animal Ecology*, 78(1), 73-83. doi: DOI 10.1111/j.1365-2656.2008.01458.x
- Boutin, S., & Lane, J. E. (2014). Climate change and mammals: evolutionary versus plastic responses. *Evol Appl*, 7(1), 29-41. doi: 10.1111/eva.12121
- Bradshaw, W. E., & Holzapfel, C. M. (2001). Genetic shift in photoperiodic response correlated with global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(25), 14509-14511.
- Bradshaw, W. E., & Holzapfel, C. M. (2008). Genetic response to rapid climate change: it's seasonal timing that matters. *Molecular Ecology*, 17(1), 157-166. doi: DOI 10.1111/j.1365-294X.2007.03509.x

- Bradshaw, W. E., & Holzapfel, C. M. (2010). Light, Time, and the Physiology of Biotic Response to Rapid Climate Change in Animals. *Annual Review of Physiology*, *72*, 147-166. doi: DOI 10.1146/annurev-physiol-021909-135837
- Brakefield, & Jong, D. (2011). A steep cline in labybird melanism has decayed over 25 years: a genetic response to climate change? .
- Brommer, J. E., Ahola, K., & Karstinen, T. (2005). The colour of fitness: plumage coloration and lifetime reproductive success in the tawny owl. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, *272*(1566), 935-940.
- Brommer, J. E., Merila, J., Sheldon, B. C., & Gustafsson, L. (2005). Natural selection and genetic variation for reproductive reaction norms in a wild bird population. *Evolution*, *59*(6), 1362-1371.
- Buckley, L. B., Tewksbury, J. J., & Deutsch, C. A. (2013). Can terrestrial ectotherms escape the heat of climate change by moving? *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, *280*(1765).
- Burrows, M. T., Schoeman, D. S., Buckley, L. B., Moore, P., Poloczanska, E. S., Brander, K. M., . . . Richardson, A. J. (2011). The Pace of Shifting Climate in Marine and Terrestrial Ecosystems. *Science*, *334*(6056), 652-655. doi: DOI 10.1126/science.1210288
- Burrows, M. T., Schoeman, D. S., Richardson, A. J., Molinos, J. G., Hoffmann, A., Buckley, L. B., . . . Poloczanska, E. S. (2014). Geographical limits to species-range shifts are suggested by climate velocity. *Nature*, *507*(7493), 492-495. doi: 10.1038/nature12976
- Burthe, S., Daunt, F., Butler, A., Elston, D. A., Frederiksen, M., Johns, D., . . . Wanless, S. (2012). Phenological trends and trophic mismatch across multiple levels of a North Sea pelagic food web. *Marine Ecology Progress Series*, *454*, 119-+.
- Cahill, A. E., Aiello-Lammens, M. E., Fisher-Reid, M. C., Hua, X., Karanewsky, C. J., Ryu, H. Y., . . . Wiens, J. J. (2013). How does climate change cause extinction? *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, *280*(1750). doi: Artn 20121890
- Chen, I. C., Hill, J. K., Ohlemuller, R., Roy, D. B., & Thomas, C. D. (2011). Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming. *Science*, *333*(6045), 1024-1026. doi: DOI 10.1126/science.1206432
- Crick, H. Q. P., & Sparks, T. H. (1999). Climate change related to egg-laying trends. *Nature*, *399*(6735), 423-424. doi: Doi 10.1038/20839
- Crozier, L. G., & Hutchings, J. A. (2014). Plastic and evolutionary responses to climate change in fish. *Evol Appl*, *7*(1), 68-87. doi: 10.1111/eva.12135
- Fitter, A. H., & Fitter, R. S. R. (2002). Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*, *296*(5573), 1689-1691. doi: DOI 10.1126/science.1071617
- Franks, S. J., Sim, S., & Weis, A. E. (2007). Rapid evolution of flowering time by an annual plant in response to a climate fluctuation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *104*(4), 1278-1282. doi: DOI 10.1073/pnas.0608379104
- Franks, S. J., Weber, J. J., & Aitken, S. N. (2014). Evolutionary and plastic responses to climate change in terrestrial plant populations. *Evol Appl*, *7*(1), 123-139. doi: 10.1111/eva.12112
- Garamvoelgyi, A., & Hufnagel, L. (2013). Impacts of Climate Change on Vegetation Distribution No. 1 Climate Change Induced Vegetation Shifts in the Palearctic Region. *Applied Ecology and Environmental Research*, *11*(1), 79-122.
- Gardner, J. L., Peters, A., Kearney, M. R., Joseph, L., & Heinsohn, R. (2011). Declining body size: a third universal response to warming? *Trends in Ecology & Evolution*, *26*(6), 285-291. doi: DOI 10.1016/j.tree.2011.03.005

- Geyer, J., Kiefer, I., Kreft, S., Chavez, V., Salafsky, N., Jeltsch, F., & Ibsch, P. L. (2011). Classification of Climate-Change-Induced Stresses on Biological Diversity. *Conservation Biology*, 25(4), 708-715. doi: DOI 10.1111/j.1523-1739.2011.01676.x
- Gienapp, P., Leimu, R., & Merila, J. (2007). Responses to climate change in avian migration time - microevolution versus phenotypic plasticity. *Climate Research*, 35(1-2), 25-35. doi: Doi 10.3354/Cr00712
- Gienapp, P., Teplitsky, C., Alho, J. S., Mills, J. A., & Merila, J. (2008). Climate change and evolution: disentangling environmental and genetic responses. *Molecular Ecology*, 17(1), 167-178. doi: DOI 10.1111/j.1365-294X.2007.03413.x
- Groom, Q. J. (2013). Some poleward movement of British native plants is occurring, but the fingerprint of climate change is not evident. *PeerJ*, 1:e77.
- Hickling, R., Roy, D. B., Hill, J. K., Fox, R., & Thomas, C. D. (2006). The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Global Change Biology*, 12(3), 450-455. doi: DOI 10.1111/j.1365-2486.2006.01116.x
- Hoffmann, A. A., & Sgro, C. M. (2011). Climate change and evolutionary adaptation. *Nature*, 470(7335), 479-485. doi: Doi 10.1038/Nature09670
- Jaffre, M., Beaugrand, G., Goberville, E., Jiguet, F., Kjellen, N., Troost, G., . . . Luczak, C. (2013). Long-Term Phenological Shifts in Raptor Migration and Climate. *Plos One*, 8(11). doi: ARTN e79112
- Karell, P., Ahola, K., Karstinen, T., Valkama, J., & Brommer, J. E. (2011). Climate change drives microevolution in a wild bird. *Nature Communications*, 2. doi: Artn 208
- Kleijn, D., Schekkerman, H., Dimmers, W. J., Van Kats, R. J. M., Melman, D., & Teunissen, W. A. (2010). Adverse effects of agricultural intensification and climate change on breeding habitat quality of Black-tailed Godwits *Limosa l. limosa* in the Netherlands. *Ibis*, 152(3), 475-486.
- Knapp, A. K., Beier, C., Briske, D. D., Classen, A. T., Luo, Y., Reichstein, M., . . . Weng, E. (2008). Consequences of More Extreme Precipitation Regimes for Terrestrial Ecosystems. *Bioscience*, 58(9), 811-821. doi: Doi 10.1641/B580908
- Körner, C. J., & Norby, R. (2007). CO₂ Fertilization: When, Where, How Much? In J. G. Canadell, D. E. Pataki & L. F. Pitelka (Eds.), *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Kruijt, B., Witte, J. P. M., Jacobs, C. M. J., & Kroon, T. (2008). Effects of rising atmospheric CO₂ on evapotranspiration and soil moisture: A practical approach for the Netherlands. *Journal of Hydrology*, 349(3-4), 257-267. doi: DOI 10.1016/j.jhydrot.2007.10.052
- Kurnath, P., & Dearing, M. D. (2013). Warmer ambient temperatures depress liver function in a mammalian herbivore. *Biology Letters*, 9(5). doi: Unsp 20130562
- Laidre, K., Heide-Jorgensen, M. P., Stern, H., & Richard, P. (2012). Unusual narwhal sea ice entrapments and delayed autumn freeze-up trends. *Polar Biology*, 35(1), 149-154.
- Lehikoinen, E., Sparks, T. H., & Zalakevicius, M. (2004). Arrival and departure dates. *Birds and Climate Change*, 35, 1-31. doi: Doi 10.1016/S0065-2504(04)35001-4
- Loarie, S. R., Duffy, P. B., Hamilton, H., Asner, G. P., Field, C. B., & Ackerly, D. D. (2009). The velocity of climate change. *Nature*, 462(7276), 1052-U1111.
- Luo, J., Koselj, K., Zsebok, S., Siemers, B. M., & Goerlitz, H. R. (2014). Global warming alters sound transmission: differential impact on the prey detection ability of echolocating bats. *J R Soc Interface*, 11(91), 20130961. doi: 10.1098/rsif.2013.0961
- Malcolm, J. R., Liu, C. R., Neilson, R. P., Hansen, L., & Hannah, L. (2006). Global warming and extinctions of endemic species from biodiversity hotspots. *Conservation Biology*, 20(2), 538-548. doi: DOI 10.1111/j.1523-1739.2006.00364.x

- Malmendal, A., Overgaard, J., Bundy, J. G., Sorensen, J. G., Nielsen, N. C., Loeschcke, V., & Holmstrup, M. (2006). Metabolomic profiling of heat stress: hardening and recovery of homeostasis in *Drosophila*. *American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, *291*(1), R205-R212.
- McCain, C. M., & King, S. R. B. (2014). Body size and activity times mediate mammalian response to climate change *Global Change Biology*.
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., . . . Zust, A. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, *12*(10), 1969-1976. doi: DOI 10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x
- Merila, J. (2012). Evolution in response to climate change: In pursuit of the missing evidence. *Bioessays*, *34*(9), 811-818. doi: DOI 10.1002/bies.201200054
- Merila, J., & Hendry, A. P. (2014). Climate change, adaptation, and phenotypic plasticity: the problem and the evidence. *Evol Appl*, *7*(1), 1-14. doi: 10.1111/eva.12137
- Michaud, M. R., Benoit, J. B., Lopez-Martinez, G., Elnitsky, M. A., Lee, R. E., & Denlinger, D. L. (2008). Metabolomics reveals unique and shared metabolic changes in response to heat shock, freezing and desiccation in the Antarctic midge, *Belgica antarctica*. *Journal of Insect Physiology*, *54*(4), 645-655.
- Mills, L. S., Zimova, M., Oyler, J., Running, S., Abatzoglou, J. T., & Lukacs, P. M. (2013). Camouflage mismatch in seasonal coat color due to decreased snow duration. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *110*(18), 7360-7365. doi: DOI 10.1073/pnas.1222724110
- Moller, A. P., Rubolini, D., & Lehikoinen, E. (2008). Populations of migratory bird species that did not show a phenological response to climate change are declining. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *105*(42), 16195-16200.
- Moritz, C., & Agudo, R. (2013). The Future of Species Under Climate Change: Resilience or Decline? *Science*, *341*(6145), 504-508. doi: DOI 10.1126/science.1237190
- Moyes, K., Nussey, D. H., Clements, M. N., Guinness, F. E., Morris, A., Morris, S., . . . Clutton-Brock, T. H. (2011). Advancing breeding phenology in response to environmental change in a wild red deer population. *Global Change Biology*, *17*(7), 2455-2469. doi: DOI 10.1111/j.1365-2486.2010.02382.x
- Ohlberger, J. (2013). Climate warming and ectotherm body size - from individual physiology to community ecology. *Functional Ecology*, *27*(4), 991-1001. doi: Doi 10.1111/1365-2435.12098
- Ovaskainen, O., Skorokhodova, S., Yakovleva, M., Sukhov, A., Kutenkov, A., Kutenkova, N., . . . Delgado, M. D. (2013). Community-level phenological response to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *110*(33), 13434-13439. doi: DOI 10.1073/pnas.1305533110
- Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, *37*, 637-669. doi: DOI 10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100
- Parmesan, C. (2007). Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Global Change Biology*, *13*(9), 1860-1872. doi: DOI 10.1111/j.1365-2486.2007.01404.x
- Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, *421*(6918), 37-42. doi: Doi 10.1038/Nature01286

- Penuelas, J., Filella, I., & Comas, P. (2002). Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology*, 8(6), 531-544. doi: DOI 10.1046/j.1365-2486.2002.00489.x
- Penuelas, J., Sardans, J., Estiarte, M., Ogaya, R., Carnicer, J., Coll, M., . . . Jump, A. S. (2013). Evidence of current impact of climate change on life: a walk from genes to the biosphere. *Global Change Biology*, 19(8), 2303-2338.
- Plard, F., Gaillard, J., Coulson, T., Mark Hewlson, A. J., Delorme, D., Warnant, C., & Bonenfant, C. (2014). Mismatch between birth date and vegetation phenology slows the demography of roe deer. *Plos Biology*.
- Post, E. (2013). Erosion of community diversity and stability by herbivore removal under warming. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 280(1757). doi: Artn 20122722
- Post, E., Bhatt, U. S., Bitz, C. M., Brodie, J. F., Fulton, T. L., Hebblewhite, M., . . . Walker, D. A. (2013). Ecological Consequences of Sea-Ice Decline. *Science*, 341(6145), 519-524. doi: DOI 10.1126/science.1235225
- Post, E., & Forchhammer, M. C. (2008). Climate change reduces reproductive success of an Arctic herbivore through trophic mismatch. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 363(1501), 2369-2375. doi: DOI 10.1098/rstb.2007.2207
- Post, E., & Pedersen, C. (2008). Opposing plant community responses to warming with and without herbivores. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(34), 12353-12358. doi: DOI 10.1073/pnas.0802421105
- Pounds, J. A., Bustamante, M. R., Coloma, L. A., Consuegra, J. A., Fogden, M. P. L., Foster, P. N., . . . Young, B. E. (2006). Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, 439(7073), 161-167. doi: Doi 10.1038/Nature04246
- Pounds, J. A., Fogden, M. P. L., & Campbell, J. H. (1999). Biological response to climate change on a tropical mountain. *Nature*, 398(6728), 611-615. doi: Doi 10.1038/19297
- Poyry, J., Luoto, M., Heikkinen, R. K., Kuussaari, M., & Saarinen, K. (2009). Species traits explain recent range shifts of Finnish butterflies. *Global Change Biology*, 15(3), 732-743. doi: DOI 10.1111/j.1365-2486.2008.01789.x
- Pulido, F., & Berthold, P. (2010). Current selection for lower migratory activity will drive the evolution of residency in a migratory bird population. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(16), 7341-7346. doi: DOI 10.1073/pnas.0910361107
- Reale, D., McAdam, A. G., Boutin, S., & Berteaux, D. (2003). Genetic and plastic responses of a northern mammal to climate change. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 270(1515), 591-596. doi: DOI 10.1098/rspb.2002.2224
- Root, T. L., Price, J. T., Hall, K. R., Schneider, S. H., Rosenzweig, C., & Pounds, J. A. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421(6918), 57-60. doi: Doi 10.1038/Nature01333
- Rosenzweig, C., Karoly, D., Vicarelli, M., Neofotis, P., Wu, Q. G., Casassa, G., . . . Imeson, A. (2008). Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*, 453(7193), 353-U320. doi: Doi 10.1038/Nature06937
- Roy, D. B., & Sparks, T. H. (2000). Phenology of British butterflies and climate change. *Global Change Biology*, 6(4), 407-416. doi: DOI 10.1046/j.1365-2486.2000.00322.x
- Rubolini, D., Moller, A. P., Rainio, K., & Lehikoinen, E. (2007). Intraspecific consistency and geographic variability in temporal trends of spring migration phenology among European bird species. *Climate Research*, 35(1-2), 135-146. doi: Doi 10.3354/Cr00720

- Rustad, L. E. (2008). The response of terrestrial ecosystems to global climate change: Towards an integrated approach. *Science of the Total Environment*, 404(2-3), 222-235. doi: DOI 10.1016/j.scitotenv.2008.04.050
- Schilthuizen, M., & Kellermann, V. (2014). Contemporary climate change and terrestrial invertebrates: evolutionary versus plastic changes. *Evol Appl*, 7(1), 56-67. doi: 10.1111/eva.12116
- Schweiger, O., Heikkinen, R. K., Harpke, A., Hickler, T., Klotz, S., Kudrna, O., . . . Settele, J. (2012). Increasing range mismatching of interacting species under global change is related to their ecological characteristics. *Global Ecology and Biogeography*, 21(1), 88-99. doi: DOI 10.1111/j.1466-8238.2010.00607.x
- Schweiger, O., Settele, J., Kudrna, O., Klotz, S., & Kuhn, I. (2008). Climate Change Can Cause Spatial Mismatch of Trophically Interacting Species. *Ecology*, 89(12), 3472-3479. doi: Doi 10.1890/07-1748.1
- Sekercioglu, C. H., Schneider, S. H., Fay, J. P., & Loarie, S. R. (2008). Climate change, elevational range shifts, and bird extinctions. *Conservation Biology*, 22(1), 140-150. doi: DOI 10.1111/j.1523-1739.2007.00852.x
- Sparks, T. H., Huber, K., Bland, R. L., Crick, H. Q. P., Croxton, P. J., Flood, J., . . . Tryjanowski, P. (2007). How consistent are trends in arrival (and departure) dates of migrant birds in the UK? *Journal of Ornithology*, 148(4), 503-511. doi: DOI 10.1007/s10336-007-0193-6
- Sparks, T. H., & Menzel, A. (2002). Observed changes in seasons: An overview. *International Journal of Climatology*, 22(14), 1715-1725. doi: Doi 10.1002/Joc.821
- Stiling, P., & Cornelissen, T. (2007). How does elevated carbon dioxide (CO₂) affect plant-herbivore interactions? A field experiment and meta-analysis of CO₂-mediated changes on plant chemistry and herbivore performance. *Global Change Biology*, 13(9), 1823-1842. doi: DOI 10.1111/j.1365-2486.2007.01392.x
- Stoks, R., Geerts, A. N., & De Meester, L. (2014). Evolutionary and plastic responses of freshwater invertebrates to climate change: realized patterns and future potential. *Evol Appl*, 7(1), 42-55. doi: 10.1111/eva.12108
- Teplitsky, C., Mills, J. A., Alho, J. S., Yarrall, J. W., & Merila, J. (2008). Bergmann's rule and climate change revisited: Disentangling environmental and genetic responses in a wild bird population. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(36), 13492-13496. doi: DOI 10.1073/pnas.0800999105
- Thackeray, S. J., Sparks, T. H., Frederiksen, M., Burthe, S., Bacon, P. J., Bell, J. R., . . . Wanless, S. (2010). Trophic level asynchrony in rates of phenological change for marine, freshwater and terrestrial environments. *Global Change Biology*, 16(12), 3304-3313. doi: DOI 10.1111/j.1365-2486.2010.02165.x
- Thomas, C. D. (2010). Climate, climate change and range boundaries. *Diversity and Distributions*, 16(3), 488-495. doi: DOI 10.1111/j.1472-4642.2010.00642.x
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., . . . Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427(6970), 145-148. doi: Doi 10.1038/Nature02121
- Thomas, C. D., Franco, A. M. A., & Hill, J. K. (2006). Range retractions and extinction in the face of climate warming. *Trends in Ecology & Evolution*, 21(8), 415-416. doi: DOI 10.1016/j.tree.2006.05.012
- Thomas, C. D., & Lennon, J. J. (1999). Birds extend their ranges northwards. *Nature*, 399(6733), 213-213. doi: Doi 10.1038/20335
- Thuiller, W. (2007). Biodiversity - Climate change and the ecologist. *Nature*, 448(7153), 550-552. doi: Doi 10.1038/448550a

- Thuiller, W., Lavorel, S., Araujo, M. B., Sykes, M. T., & Prentice, I. C. (2005). Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *102*(23), 8245-8250.
- Turnhout, C. v., Ballering, L., & Both, C. (2011). Populati trends en broedsucces van bonte vliegenvanger in Nederland: een update. *Limosa*, *84*, 38-45.
- Tylianakis, J. M., Didham, R. K., Bascompte, J., & Wardle, D. A. (2008). Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, *11*(12), 1351-1363. doi: DOI 10.1111/j.1461-0248.2008.01250.x
- van Asch, M., Salis, L., Holleman, L. J. M., van Lith, B., & Visser, M. E. (2013). Evolutionary response of the egg hatching date of a herbivorous insect under climate change. *Nature Climate Change*, *3*(3), 244-248. doi: Doi 10.1038/Nclimate1717
- Van der Putten, W. H., Macel, M., & Visser, M. E. (2010). Predicting species distribution and abundance responses to climate change: why it is essential to include biotic interactions across trophic levels. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, *365*(1549), 2025-2034. doi: DOI 10.1098/rstb.2010.0037
- Van der Veen, M., Wiesenekker, E., Nijhoff, B. S. J., & Vos, C. C. (2010). Klimaat Response Database, versie 2.0. Ontwikkeld binnen het Klimaat voor Ruimte Programma.
- Van Vliet, A. J. H., Bron, W. A., Mulder, S., Van der Slikke, W., & Odé, B. (2013). Observed climate-induced changes in plant phenology in the Netherlands. *Regional Environmental Change*.
- VanDerWal, J., Murphy, H. T., Kutt, A. S., Perkins, G. C., Bateman, B. L., Perry, J. J., & Reside, A. E. (2013). Focus on poleward shifts in species' distribution underestimates the fingerprint of climate change. *Nature Climate Change*, *3*(3), 239-243. doi: Doi 10.1038/Nclimate1688
- Visser, M. E. (2013). Phenological shifts in animals under contemporary climate change. In S. A. Levin (Ed.), *Encyclopedia of Biodiversity* (Vol. 5, pp. 716-727).
- Visser, M. E., & Both, C. (2005). Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, *272*(1581), 2561-2569. doi: DOI 10.1098/rspb.2005.3356
- Visser, M. E., te Marvelde, L., & Lof, M. E. (2012). Adaptive phenological mismatches of birds and their food in a warming world. *Journal of Ornithology*, *153*, S75-S84. doi: DOI 10.1007/s10336-011-0770-6
- Visser, M. E., van Noordwijk, A. J., Tinbergen, J. M., & Lessells, C. M. (1998). Warmer springs lead to mistimed reproduction in great tits (*Parus major*). *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, *265*(1408), 1867-1870.
- Walther, G. R. (2010). Community and ecosystem responses to recent climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, *365*(1549), 2019-2024. doi: DOI 10.1098/rstb.2010.0021
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., . . . Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, *416*(6879), 389-395.
- Warren, R., VanDerWal, J., Price, J., Welbergen, J. A., Atkinson, I., Ramirez-Villegas, J., . . . Lowe, J. (2013). Quantifying the benefit of early climate change mitigation in avoiding biodiversity loss. *Nature Climate Change*, *3*(7), 678-682. doi: Doi 10.1038/Nclimate1887
- Wu, Z. T., Dijkstra, P., Koch, G. W., Penuelas, J., & Hungate, B. A. (2011). Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*, *17*(2), 927-942.

Xu, W. F., Yuan, W. P., Dong, W. J., Xia, J. Z., Liu, D., & Chen, Y. (2013). A meta-analysis of the response of soil moisture to experimental warming. *Environmental Research Letters*, 8(4). doi: Artn 044027