

# Van de regen in de drup?

**Verkenning van de mogelijke effecten van  
klimaatverandering op de Nederlandse mariene  
ecosystemen**

**12 december 2003**

Werkdocument RIKZ/OS/2003.604x

# Van de regen in de drup?

**Verkenning van de mogelijke effecten van  
klimaatverandering op de Nederlandse mariene  
Ecosystemen**

**12 december 2003**

Auteurs: S. Mulder  
L. Peperzak

---

# Inhoudsopgave

---

**Inhoudsopgave 3**

**Samenvatting 4**

**1 Inleiding 5**

**2 Klimaatscenario's 7**

**3 Abiotische veranderingen 11**

**4 Ecologische effecten 15**

**5 Ecologische scenario's 23**

**6 Conclusies en aanbevelingen 25**

**Referenties 27**

**Bijlage 31**

**Bijlage 32**

---

# Samenvatting

---

Dat het klimaat aan het veranderen is wordt voor iedereen steeds duidelijker. Meer regenval en daardoor meer overstromingen en zomertemperaturen die recordhoogtes halen. Wetenschappers hebben aanwijzingen dat de gemiddelde wereldtemperatuur stijgt, er een versnelde zeespiegelstijging optreedt en de jaargemiddelde neerslag toeneemt. In deze rapportage zijn de 'worst case' voorspellingen voor het jaar 2100 gebruikt om de mogelijke effecten van klimaatverandering op de Nederlandse mariene ecosystemen te verkennen. De abiotische veranderingen die optreden door klimaatverandering, zoals bijvoorbeeld stijging van de watertemperatuur, toename van erosie van de kust en het verdrinken van intergetijdengebieden kunnen een verscheidenheid aan ecologische effecten teweegbrengen. Per soortgroep en ook per soort zijn deze effecten verschillend. Een 'worst case scenario' geeft weer hoe de situatie er mogelijk in 2100 uitziet. Door de verhoging van de temperatuur zal er mogelijk een verschuiving in de soortensamenstelling optreden ten gunste van de zuidelijke soorten. Een zeespiegelstijging van 1 meter veroorzaakt erosie van de kust, waardoor habitatverlies optreedt voor kwelderplanten en kustvogels. De nutriëntenhuishouding zal veranderen door de verhoogde rivierafvoeren, waardoor de primaire productie mogelijk toeneemt. Dit zou een soortverschuiving naar giftige algen tot gevolg kunnen hebben.

Klimaatonderzoek krijgt mondiaal en ook in Nederland veel aandacht. Relaties tussen klimaat en veranderingen in soortendiversiteit, dichtheid en biomassa die in het verleden hebben plaatsgevonden worden gebruikt om voorspellingen te doen over de effecten van klimaatverandering op de ecologie. Door de vele onzekerheden en de complexiteit van het ecosysteem zijn de ecologische gevolgen echter zeer moeilijk in te schatten. Het is van belang om een beter beeld te krijgen van deze onzekerheden en de complexiteit van het ecosysteem. Aanbevolen wordt om de bestaande basisgegevens goed op peil te houden en eventueel uit te breiden, onderzoek te doen naar ecosysteem interacties en bij het formuleren van beleid rekening te houden met de toekomstige veranderingen.

---

# 1 Inleiding

---

De afgelopen jaren zijn er in de stroomgebieden van de grote rivieren in Europa regelmatig grote overstromingen geweest. Daarnaast bereiken de zomertemperaturen in het Middellandse zeegebied de laatste jaren vaak record hoogtes. Daardoor is de gemiddelde burger er nu wel van overtuigd dat ons klimaat verandert. Het is echter niet slechts beleving, want steeds meer onderzoekers zijn tot de overtuiging gekomen dat het klimaat mondiaal verandert. De wetenschappelijke bewijzen die dit aantonen stapelen zich op. En als reactie daarop houden de wetenschappers zich dan ook meer en meer bezig met het onderzoeken van de eventuele gevolgen die dat voor de mens, het milieu, het landschap en de ecosystemen kan hebben.

Er zijn in het verleden diverse initiatieven geweest om de effecten van klimaatverandering te verkennen. Eén van eerste rapporten van Rijkswaterstaat legde de nadruk op zeespiegelrijzing en de daaruit voortvloeiende kosten voor het verhogen van dijken en aanpassen van spuisluizen (de Ronde 1990). Een grootschalig onderzoek werd uitgevoerd in het Nationaal Onderzoek Programma Mondiale Luchtverontreiniging en Klimaatverandering, het NOP I (1989-1995) en het NOP II (1995-2001) (Zwerver en Kok 1999; Kok *et al.* 2001). Dit onderzoek was gericht op het Nederlandse klimaatbeleid, zonder expliciete aandacht voor de zoute ecosystemen (Kok *et al.* 2001). Onderzoek naar de effecten van klimaatverandering op zoute ecosystemen vindt in Nederland wel plaats, maar is tot nu toe met name uitgevoerd voor de Waddenzee (Louters en Gerritsen 1994; Brinkman 1995; Brinkman *et al.* 2001).

Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor de rijkswateren en daarmee de aangewezen partij om in haar beheer en beleid te anticiperen op toekomstige ontwikkelingen. Tijdens de discussiemiddag 'Effecten klimaatverandering op ecosysteem Noordzee' (november 2000, Den Haag) is de directie Noordzee geadviseerd effecten van klimaatverandering in een meerjarig onderzoeksprogramma in te bedden. Binnen het thema Eutrofiëring en Productiviteit is dan ook afgesproken om onderzoek te doen naar eventuele effecten van klimaatverandering op de rijkswateren. Het RIKZ heeft de opdracht gekregen om de mogelijke effecten op de zoute ecosystemen te verkennen. Dit rapport is daarvan het resultaat. Het RIZA verricht een vergelijkbare studie voor de zoete rijkswateren (Mooij *et al.* in concept).

## Afbakening

Deze verkenning richt zich op de Nederlandse zoute en brakke rijkswateren. De mogelijke effecten van de klimaatverandering zullen voor de verschillende wateren niet hetzelfde zijn. Daarom wordt in dit rapport zonodig onderscheid gemaakt tussen de volgende deelgebieden/types: centrale Noordzee, Noordzee kustzone, Waddenzee, Oosterschelde en Westerschelde. In de verschillende deelgebieden is gekeken naar de volgende systematische hoofdgroepen: bacteriën, virussen, fytoplankton, fytoënthos, zoöplankton, wieren en hogere planten, zoöënthos, vissen, vogels en zoogdieren.

---

## Methodiek

De verkenning werd in vier fasen opgesplitst::

- 1) De klimaatveranderingen die belangrijk zijn voor de ecologie van de Nederlandse zoute wateren zijn in kaart gebracht (hoofdstuk 2),
- 2) Deze klimaatveranderingen zijn in interviews voorgelegd aan deskundigen op abiotisch gebied (oceanografen, morfologen en chemici, bijlage 2). Vervolgens is een lijst opgesteld met ecologisch relevante abiotische factoren die mogelijk veranderen door een gewijzigd klimaat (hoofdstuk 3),
- 3) Per hoofdgroep is aan de hand van de lijst met abiotische factoren een overzicht gemaakt van het effect van klimaatverandering (Tabel II). Dit is uitgevoerd door middel van een literatuurstudie en interviews met deskundigen (hoofdstuk 4). Voor iedere combinatie van abiotische factor en hoofdgroep was de nulhypothese: "er is geen effect" .
- 4) Tot slot wordt een 'worst case' scenario beschreven waarbij het effect van grootst mogelijke klimaatverandering op het zoute ecosysteem wordt beschreven (hoofdstuk 5).

Het commentaar en de verwachtingen van de deskundigen zijn schriftelijk vastgelegd, maar omdat hun reacties 'best expert guesses' zijn, worden zij niet bij naam in de tekst geciteerd. In bijlage 2 is een lijst opgenomen van de geraadpleegde deskundigen.

## Dankwoord

Klimaatverandering is een complex onderwerp en een beschrijving van de effecten van klimaatverandering zo mogelijk nog complexer. Bij het opstellen van deze rapportage hebben de auteurs veel hulp en steun gekregen van Ed Stikvoort van het RIKZ in Middelburg. Ook zonder de expertise van de deskundigen op de verschillende vakgebieden zou deze rapportage niet tot stand zijn gekomen. Theo Prins (RIKZ Middelburg) en Gerard Janssen (RIKZ Haren) hebben zeer waardevolle commentaren geleverd op de conceptrapporten.

---

## 2 Klimaatscenario's

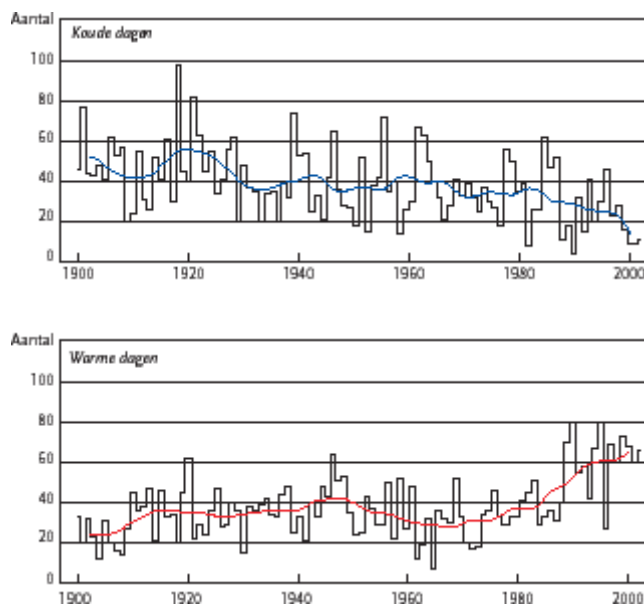
---

In 2001 bracht het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) het derde klimaatrapport uit, waarin voor de eerste keer geconcludeerd werd dat de wereldwijde temperatuurstijging in de afgelopen 50 jaar te wijten is aan menselijk handelen (IPCC 2001). In de 20<sup>e</sup> eeuw was de totale stijging van de luchttemperatuur ca. 0,6 °C, de zeewatertemperatuur steeg met ongeveer de helft. Deze temperatuurstijging is voor een deel het gevolg van de toename van het broeikasgas CO<sub>2</sub>. In de Bilt is het aantal koude dagen de afgelopen eeuw afgenomen en is het aantal warme dagen toegenomen (zie figuur 1).

---

**Figuur 1**

Het aantal relatief koude en warme dagen in de loop van de 20e eeuw in de Bilt.. De rode lijn is het gemiddelde van 10 jaar (Bron: KNMI).



Op basis van het IPCC rapport bracht het KNMI een brochure uit met relevante conclusies omtrent het weer en het water in de 21<sup>e</sup> eeuw (KNMI 2001). De klimaatscenario's die hierin voor de Nederlandse situatie geschetst worden, vormen het uitgangspunt voor deze verkenning van ecologische effecten. De relevante conclusies voor het jaar 2100 zijn:

- De gemiddelde wereldtemperatuur nabij het aardoppervlak zal minstens 1,4 tot 5,8 °C stijgen. Gemiddeld over Europa (en dus Nederland) zal de temperatuur zelfs iets sterker stijgen.
  - o de kans op zomerse hittegolven neemt toe
  - o de kans op vorstdagen neemt af
- In de centrale Noordzee zal de stijging van de watertemperatuur 50-70% van de stijging van de luchttemperatuur bedragen.
- De zeespiegel zal 0,1 tot 0,9 m stijgen

- 
- De hoeveelheid neerslag zal gemiddeld met 12% stijgen
    - o de winterneerslag neemt toe met 25%
    - o de kans op perioden met extreme neerslag neemt toe
    - o de kans op gemiddeld "natte jaren" neemt toe
    - o de Rijn zal 's zomers minder en 's winters méér water afvoeren
  
  - De toename van de atmosferische CO<sub>2</sub> concentratie ten opzichte van 1750 is op dit moment 31% (IPCC 2001). Voor het jaar 2100 wordt een toename van 19-219% ten opzichte van de huidige CO<sub>2</sub> concentratie verwacht.
  
  - Het is onduidelijk of het windklimaat, en de frequentie en intensiteit van stormen, zal veranderen

**In deze verkenning wordt uitgegaan van een 'worst case scenario' in 2100: een stijging van de jaargemiddelde luchttemperatuur met 6°C en van de watertemperatuur met 4°C, een zeespiegelstijging van 1 meter, een toename van de jaargemiddelde neerslag met 12% en een toename van de CO<sub>2</sub> concentratie met 220%.**

Naast de wereldwijde antropogene klimaatverandering in de 21<sup>e</sup> eeuw door een toename van CO<sub>2</sub> zijn er korter durende klimaatschommelingen die samenhangen met grootschalige processen in de atmosfeer. De belangrijkste voor Nederland is de Noord-Atlantische Oscillatie (NAO), oftewel fluctuaties in het gemiddelde luchtdrukverschil tussen de Azoren en IJsland. Perioden met een positieve NAO worden afgewisseld door perioden met een negatieve NAO. De laatste 10 jaar bevindt Nederland zich in een positieve NAO periode. Een positieve NAO index leidt 's winters tot meer westelijke winden met hogere temperaturen en meer neerslag dan normaal.

Van minder belang op het Nederlandse weer is de El Niño Southern Oscillation (ENSO), kortweg 'El Niño'. Als de El Niño index in de maanden december-februari hoog is, dan valt er in Nederland in de daaropvolgende lentemaanden maart-mei meer regen dan gemiddeld (KNMI 1999). Wat de invloed van de NAO en El Niño over een eeuw zal zijn is onduidelijk. De uitkomsten van verschillende klimaatmodellen spreken elkaar tegen en het KNMI (1999) concludeert dan ook dat het moeilijk is een nauwkeurige schatting te maken van het effect van een toename van broeikasgassen op de NAO. Daarom kan er in deze verkenning niet ingegaan worden op de NAO index in het jaar 2100. Wel is het zo dat de positieve NAO van de afgelopen 10 jaar, met zachte en natte winters, een indicatie geeft van hoe het klimaat zal gaan veranderen op de lange termijn. Omdat het meeste onderzoek over effecten van klimaatverandering op zoute ecosystemen is gericht op het effect van de NAO, wordt er wel gebruik gemaakt van literatuur over de NAO.

Een ander aspect waar geen rekening mee wordt gehouden in deze verkenning is de kans dat de Warme Golfstroom stagneert door het smelten van Noordpoolijs, waardoor een abrupte temperatuurverlaging in Europa optreedt. De kans dat deze stagnatie in de 21<sup>e</sup> eeuw plaats vindt is echter klein en bovendien is het temperatuureffect tegengesteld aan die van de mondiale opwarming.



---

Bij het voorspellen van de effecten van klimaatverandering in 2100 zou eigenlijk ook rekening gehouden moeten worden met menselijke ingrepen, aangezien de effecten door allerlei maatregelen en activiteiten verminderd of versterkt zouden kunnen worden. Het is bijvoorbeeld niet ondenkbaar dat gedurende de 21<sup>e</sup> eeuw de rivierafvoeren naar zee worden beïnvloed. Door een verbeterde zoetwaterberging in Duitsland en Nederland kan de kans op hoge piekafvoeren verminderd worden. Een verandering in landbouwmethoden kan leiden tot een sterke reductie van (kunst)-mestgebruik en een vermindering van de nutriëntenvrachten naar zee. Gaswinning leidt tot bodemdaling en versterkt daarmee de relatieve zeespiegelstijging. Omdat deze ingrepen moeilijk te voorspellen zijn, zijn de mogelijk daaruit voortvloeiende toekomstige veranderingen die van invloed kunnen zijn op de effecten van klimaatverandering in deze verkenning niet meegenomen. De effecten van ingrepen die momenteel al plaatsvinden en die in de toekomst worden geïntensiveerd, zoals zandsuppleties en commerciële visserij, worden wel meegenomen.



---

## 3 Abiotische veranderingen

---

De belangrijkste elementen van klimaatverandering zijn:

- 1) temperatuurstijging
- 2) zeespiegelrijzing
- 3) neerslagtoename
- 4) toename CO<sub>2</sub>
- 5) veranderd windklimaat?

Ieder van deze elementen apart, maar in sommige gevallen ook in combinatie leiden tot een verandering in tal van abiotische variabelen die sturend zijn voor ecologische processen.

- 1) Temperatuurstijging

Het meest bekende effect van de verwachte mondiale klimaatverandering in 2100 is een verhoging van de luchttemperatuur. In Nederland treden dan de volgende directe effecten op:

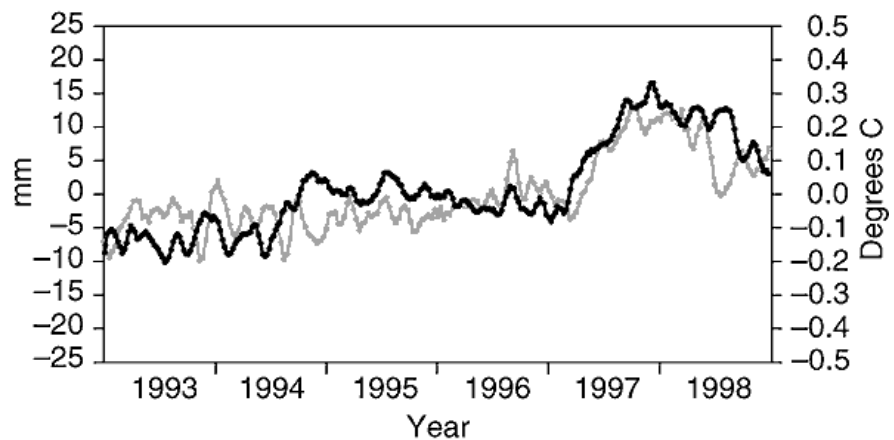
- a) Verhoging van de luchttemperatuur, in deze verkenning wordt uitgegaan van 6°C. Het is mogelijk dat de wintertemperatuur meer zal stijgen dan de zomertemperatuur.
- b) Verhoging van de watertemperatuur in deze verkenning wordt uitgegaan van 4°C. Hoe dichterbij de kust hoe meer de watertemperatuur de luchttemperatuur zal volgen.

- 2) Zeespiegelrijzing

Klimaatverandering leidt tot een verhoging van de watertemperatuur en via zogenaamde thermische uitzetting tot zeespiegelrijzing. Figuur 2 laat een dergelijk verband zien voor de periode 1993-1998.

---

**Figuur 2**  
Wereldgemiddelde zeespiegel variaties (grijze lijn) berekend met behulp van de TOPEX/POSEIDON satelliet altimeter data, vergeleken met de globaal gemiddelde zeewateroppervlak temperatuur variaties (zwarte lijn) voor 1993-1998. (Bron: Cazenave *et al.* 1998).



---

Volgens het 'worst-case-scenario' zal de zeespiegel in 2100 1 meter gestegen zijn. De volgende 'processen' kunnen daarvan het gevolg zijn:

- a) Toename van erosie van de kust:
  - toename van zandsuppleties ten behoeve van kustverdediging
  - daardoor verzanding van de Waddenzee
  - kwelder/schorren-afslag
  - toename van de troebelheid van het zeewater
- b) 'Verdrinken' van intergetijdengebieden zoals slikken, platen en schorren wanneer de sedimentatiesnelheden de zeespiegelrijzing niet bij zal kunnen houden. Dit is het geval bij een zeespiegelrijzing van meer dan 0,4 tot 0,6 meter per eeuw.
- c) Landwaartse verschuiving van de zoet-zout overgangen in estuaria
- d) Toename van zoute kwel in de lage kustgebieden.

.....  
**Foto 1**  
Geulen en platen in de Waddenzee.



### 3) Neerslagtoename

Klimaatverandering leidt tot meer neerslag. In deze verkenning wordt uitgegaan van een gemiddelde toename van 12% met directe en indirecte effecten. De effecten op de rivierafvoer zijn in de winter en de zomer verschillend.

- a) Een toename van de neerslag leidt tot een toename van de:
  - atmosferische stikstofdepositie
  - zoetwaterlens onder het duinmassief.
- b) In de winter leidt meer neerslag tot een toename van de rivierafvoer met als consequentie:

- 
- een verlaging van de saliniteit in de kustgebieden
  - een zeewaartse verschuiving van zoet-zout overgangen in de estuaria
  - meer uitspoeling van nutriënten
  - meer uitspoeling van toxische stoffen
- c) In de zomer is er door een afname van de neerslag en de wintersneeuwval minder water in de rivier. Bovendien neemt de verdamping toe en dit wordt niet gecompenseerd door een toename van de gemiddelde neerslag. Er zullen wel meer zware buien voorkomen. Het gevolg is:
- een afname van de gemiddelde zomerafvoer
  - een grotere kans op piekafvoeren

#### 4) Toename CO<sub>2</sub>

Van nature voorkomende broeikasgassen zoals CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O zorgen ervoor dat leven op aarde mogelijk is. De concentraties van deze gassen zijn sinds het begin van de industriële revolutie sterk gestegen, wat leidt tot een versterking van het natuurlijke broeikas effect. Voor deze verkenning is vooral de toename van CO<sub>2</sub> van belang en wordt er uitgegaan van een toename van 220%.

#### 5) Veranderd windklimaat?

Het is tot op heden onduidelijk of de klimaatverandering in 2100 zal leiden tot een ander windklimaat (KNMI 1999, 2001). In het verleden ging men er vanuit dat met name de stormfrequentie en intensiteit flink zouden toenemen (Pagee, 2000). Uit recent onderzoek blijkt echter dat de toename van stormintensiteit en het golfklimaat in de laatste 4 decennia van de 20<sup>e</sup> eeuw binnen de natuurlijke variabiliteit van die eeuw vallen (WASA-group 1998). Het algemene beeld dat bestaat over een verhoging van erosie door een toename van de frequentie en intensiteit van stormen en meer turbulentie in de kustzone met als gevolg een verhoging van de troebelheid, wordt dus niet door de huidige klimaatmodellen onderschreven. Om die reden wordt er in deze rapportage vanuit gegaan dat het windklimaat niet verandert.



---

## 4 Ecologische effecten

---

De ecologische effecten van de verschillende elementen van klimaatverandering worden beschreven per hoofdgroep. Waar nodig wordt onderscheid gemaakt tussen de verschillende deelgebieden. In bijlage 1 wordt onderstaande schematisch weergegeven.

### Virussen

Virussen zijn micro-organismen waarop de meeste abiotische veranderingen ten gevolge van klimaatverandering geen direct effect zullen hebben. Virussen hebben namelijk een levende gastheer nodig om zich te vermenigvuldigen. Deze gastheer kan een bacterie zijn (het virus heet dan bacteriofaag), maar het afgelopen decennium zijn ook virussen gevonden die zich in fytoplankton vermenigvuldigen (Brussaard *et al.* 1999). Ook zijn er virussen die ziekten veroorzaken bij vogels en zeezoogdieren. In het algemeen wordt er van uitgegaan dat virusinfecties zullen toenemen als hun gastheren, bijvoorbeeld door een ongunstige klimaatverandering, een verzwakte conditie hebben. Nadelige interacties worden bovendien veroorzaakt doordat populaties onder druk staan door bijvoorbeeld habitatverlies en toxische stoffen in het milieu (Harvell *et al.* 1999). Het transport van virusdeeltjes naar zee neemt toe bij een verhoogde rivierafvoer en vergroot daarmee de kans dat virussen van een land- of zoetwatergastheer overgaan op een gastheer in het zoute water (Harvell *et al.* 1999).

### Bacteriën

Bacteriën zijn ééncellige micro-organismen die zich voeden met organisch koolstof. Dit koolstof is afkomstig van primaire producenten zoals kwelderplanten en algen. Een toename van de temperatuur van water en bodem is gunstig voor de groei van bacteriën, hetgeen zal leiden tot een versnelde afbraak van organisch materiaal. Een indirect effect is dan een versnelde mineralisatie en een toename van de zuurstofloosheid. Dit kan vervolgens leiden tot een verminderde fosfaat-buffering, waardoor er meer fosfaat door de bodem wordt nageleverd. Bovendien vindt een betere vastlegging van zware metalen plaats omdat er onder anaërobe omstandigheden meer sulfide aanwezig is.

Afslag van kwelders door zeespiegelrijzing leidt tot een verhoging van het organisch stofgehalte in het water en is daarom gunstig voor bacteriën. Samen met een verhoging van de watertemperatuur kan dit leiden tot een versnelling van de 'bacterial-loop', waardoor anorganische nutriënten sneller beschikbaar komen voor het plantaardige leven in zee. De verzanding van de Waddenzee, die een afname van het organisch koolstof gehalte veroorzaakt, is daaraan tegengesteld. Omdat het organisch koolstof gehalte in de Nederlandse kustzone vrij hoog is lijkt het effect van veranderingen in het koolstof gehalte door bovengenoemde processen klein te zijn.

### Fytoplankton

Het fytoplankton bestaat in principe uit ééncellige in het water zwevende organismen die, samen met het *fytobenthos* in en op de bodem, de basis vormen van het mariene voedselweb. Fytoplanktoncellen gebruiken zonlicht

---

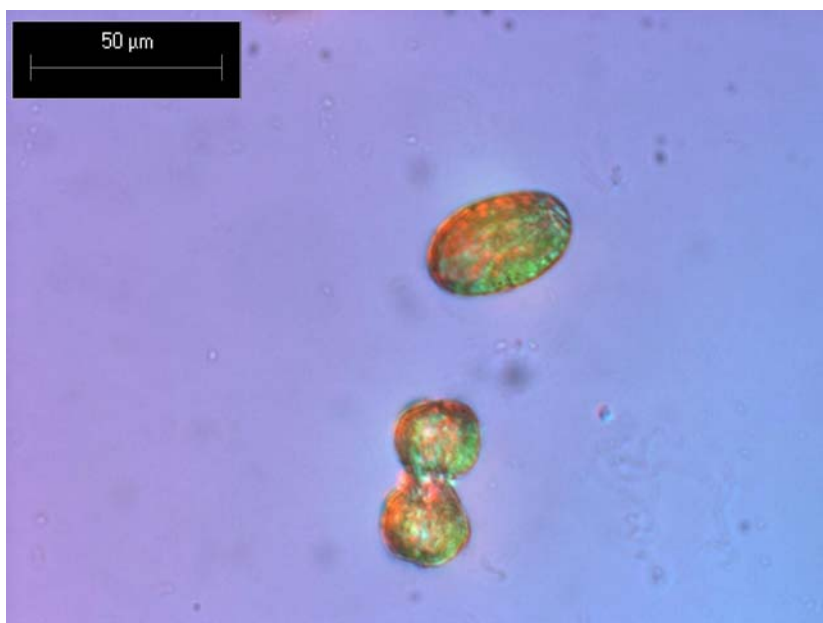
om anorganische nutriënten zoals nitraat en fosfaat om te zetten in organische bestanddelen. Daarbij wordt anorganisch koolstof –CO<sub>2</sub>– het broeikasgas dat de belangrijkste oorzaak is van de klimaatverandering, opgenomen. Er is daarom een grote wetenschappelijke belangstelling voor de rol van het fytoplankton in de koolstofcyclus en het broeikas effect. Voor ondiepe kustzeeën als de Noordzee geldt echter dat het door fytoplankton vastgelegde CO<sub>2</sub> door (bacteriële) respiratie weer in zijn geheel vrijkomt (de Haas *et al.* 2002).

De 31% toename van de CO<sub>2</sub>-concentratie in de atmosfeer sinds 1750 (IPCC 2001) heeft geleid tot een toename van de CO<sub>2</sub>-concentratie in het zeewater. Indien CO<sub>2</sub> een voor fytoplanktongroei limiterend nutriënt zou zijn, dan zou een verhoging van het CO<sub>2</sub>-gehalte leiden tot een versnelde fytoplanktongroei. Echter, CO<sub>2</sub> is vaak geen limiterend nutriënt en het directe effect op fytoplankton lijkt verwaarloosbaar. Als het CO<sub>2</sub>-gehalte in de atmosfeer met 219% toeneemt in 2100 (IPCC 2001) zal er geen effect waarneembaar zijn op de totale productie, maar mogelijk zal er wel een soortenverschuiving plaatsvinden.

De stijging van de watertemperatuur wordt vaak als reden opgevoerd voor een hogere primaire productie: het vastleggen van CO<sub>2</sub> in organisch koolstof. De achterliggende reden is dat de bij deze productie betrokken enzymen sneller hun werk doen bij een hogere temperatuur. Echter, fytoplanktoncellen zijn geen koolstoffabriekjes met enzymen. Een deel van de soorten is namelijk gespecialiseerd in het groeien bij een lage temperatuur zoals bijvoorbeeld aan het eind van de winter. Hogere watertemperaturen in de winter zullen dan leiden tot een lagere productie van deze 'koud water'-soorten.

Fytoplanktonsoorten die later in het jaar, bij hogere temperaturen hun optimum vinden, zullen eerder kunnen gaan groeien. In de zomer kan de watertemperatuur echter zodanig hoog oplopen dat fytoplanktonsoorten die van nature in gematigde zeeën voorkomen het niet meer kunnen bolwerken. Hun plaats kan worden ingenomen door 'warm water'-soorten uit het zuiden. Het is ook denkbaar dat in combinatie met hogere piekafvoeren in de zomer, die tot watergelaagdheid in de kustzone leidt, nieuw geïntroduceerde giftige plaagalgen bloeien gaan vormen (Peperzak 2003).

.....  
**Foto 2**  
Giftige plaalg *Fibrocapsa japonica*





---

Indirecte klimaateffecten die de hoeveelheid lichtenergie in de waterkolom verminderen, bijvoorbeeld kusterosie, zullen ter plaatse leiden tot een verminderde fytoplankton- en fyto benthosgroei. In de Waddenzee zou een verzanding die gepaard gaat met een verbeterd lichtklimaat het tegenovergestelde kunnen bewerkstelligen.

Andere secundaire klimaateffecten die de groei van het fytoplankton beïnvloeden zijn verhoogde rivierafvoeren die gepaard gaan met een verhoogde afvoer van nutriënten (stikstof en fosfaat) en een toename van de atmosferische stikstofdepositie. Dit laatste zal voornamelijk gelden in gebieden met een lage stikstofconcentratie in het water: met name de centrale Noordzee. Dit resulteert in effecten die tegenstrijdig zijn met het huidige eutrofiëringsbeleid dat erop gericht is de antropogene belasting van de Noordzee te verminderen.

Het fyto benthos en het fytoplankton reageren in het algemeen op dezelfde manier op de klimaateffecten. Het verschil is dat het fyto benthos, dat in ondiep water of op droogvallende platen leeft, ook gevoelig is voor een stijging van de luchttemperatuur. Een verhoogde rivierwaterafvoer lijkt voor het kustbewonende fyto benthos, dat saliniteitverschillen gewend is, weinig effect op te leveren.

### Zoöplankton

Zoöplankton is in deze verkenning de verzamelnaam voor in het water zwevend dierlijk plankton dat zich voedt met fytoplankton. Een stijging van de watertemperatuur kan leiden tot een aantal uiteenlopende effecten. Ten eerste zal het zoöplankton sneller kunnen groeien zolang het voedsel niet limiterend is. Ten tweede heeft een hogere watertemperatuur een niet-lineaire afname van de viscositeit van het water tot gevolg (Vogel 1996). Op de microscopische planktonschaal is viscositeit enorm belangrijk en het is in theorie mogelijk dat de voedselopname door het zoöplankton door een te grote temperatuurstijging wordt bemoeilijkt (Peperzak 2003).

Net als het fytoplankton bestaat het zoöplankton uit een verzameling soorten met ieder hun eigen brede of smalle temperatuuroptimum. Het is daarom niet uit te sluiten dat sommige soorten bij een verhoging van 6°C verdwijnen en er nieuwe voor in de plaats komen. Omdat het zoöplankton een belangrijke schakel in de voedselketen is, zijn er al diverse onderzoeken uitgevoerd naar het effect van de temperatuur in het Atlantische gebied ten gevolge van klimaatschommelingen (NAO). In de jaren 1960-1999 is in de Noordoost Atlantische Oceaan en in de Europese kustzeeën een noordelijke verschuiving van 10° waargenomen van 'warm water'-soorten. Dit ging gepaard met een afname van de 'koud water'-soorten. Deze verschuivingen werden in verband gebracht met het gecombineerde effect van opwarming van de noordelijke Aarde en de NAO (Beaugrand *et al.* 2002).

Eetbare zoöplanktonsoorten zoals copepoden zouden echter ook vervangen kunnen worden door 'gelatine'-plankton, oneetbare kwalletjes. Dit kan negatieve secundaire gevolgen hebben voor de volgende stap in de voedselketen: vis. Zoöplanktonsoorten die nu pas laat in het voorjaar, bij hogere temperaturen gaan groeien, zouden eerder in het seizoen kunnen profiteren van de eerste diatomeënbloei. Dit kan betekenen dat door sterkere begrazing door de copepoden, andere, minder eetbare 'plaagalgen'-soorten gaan domineren, het zou ook kunnen betekenen dat het zoöplankton juist beter profiteert van het voedselaanbod. De effecten op het voedselweb zijn op dit moment niet goed voorspelbaar.

Zeespiegelrijzing met al haar consequenties zal weinig direct effect op het zoöplankton uitoefenen. Indirecte effecten kunnen worden verwacht als

---

door een toename van erosie en troebelheid er in de kustzone een afname van het fytoplankton plaatsvindt. Verhogingen van waterafvoeren lijken, op de toename van toxische stoffen na, weinig effect op het zoöplankton uit te oefenen.

### **Planten**

Met planten in de zoute wateren worden hier kweldervegetatie, duinvegetatie en aan substraat vastgehechte macrowieren bedoeld. De effecten van klimaatverandering op planten kunnen zowel negatief als positief zijn. Een stijging van de lucht- en de watertemperatuur heeft invloed op vegetatie door de positieve relatie tussen hogere temperaturen en de groeisnelheid (Gray en Mogg 2001; Scavia *et al.* 2002). Een toename van de temperatuur kan echter ook een verschuiving van de groeiperiode van kweldervegetatie veroorzaken, wat van belang is voor de diersoorten die foerageren op de kwelders (brandganzen, rotganzen, smienten). Een hogere watertemperatuur kan ook een verschuiving van de geografische grenzen van zeewieren tot gevolg hebben. De grenzen schuiven op naar het noorden, waardoor noordelijke soorten mogelijk worden terug gedrongen door zuidelijke soorten (Breeman 1990).

Door erosie kan kwelderafslag optreden. Waarschijnlijk kunnen met name de kwelders op de Waddeneilanden de zeespiegelstijging niet bijhouden doordat de sedimentatiesnelheden daar laag liggen. Hierdoor zal een geleidelijke regressie van de vegetatie optreden (Dijkema 1997). Een toename van zoute kwel door zeespiegelstijging kan voor een soortenverschuiving zorgen doordat soorten verdwijnen die niet zouttolerant zijn en er soorten verschijnen die wel zouttolerant zijn. Veel kwelderplanten kunnen echter leven in een redelijk breed saliniteit bereik.

Een toename van CO<sub>2</sub> kan de primaire productie van planten verhogen wanneer andere factoren als nutriënten en neerslag niet limiterend zijn (Scavia *et al.* 2002). Daarnaast kan de zouttolerantie toenemen bij een verhoging van CO<sub>2</sub> in de lucht (Rozema 1990). Bepaalde groepen zeewieren zullen waarschijnlijk harder gaan groeien bij een toename van CO<sub>2</sub>, waardoor een soortenverschuiving op kan treden.

### **Bodemfauna**

De bodemfauna van de kustwateren in Nederland bestaat uit een grote diversiteit aan wormen, schelpdieren en kreeftachtigen. Bodemfauna neemt in het zoute milieu een sleutelpositie in omdat het aan de ene kant de primaire consument is van fytoplankton en fytobenthos en, aan de andere kant, een heel belangrijke voedselbron vormt voor mobiele invertebraten, vissen en vogels (referenties in de Jong *et al.* 1999).

De temperatuur is voor bodemfauna van belang door de invloed op reproductie, groei en mortaliteit. Veel soorten kunnen leven onder verschillende temperatuurregimes, maar voor soorten die op de grens van hun verspreidingsgebied leven kunnen kleine temperatuurverschillen al grote gevolgen hebben. Veel soorten (bijvoorbeeld zandkokerworm, kokkel, garnaal en krab) zijn gevoelig voor strenge winters en verdwijnen uit de Waddenzee of trekken van de intergetijde gebieden naar sublitorale gebieden (Beukema 1990). Een strenge winter leidt echter bij met name tweekleppigen ook tot een hoge populatie-aanwas, terwijl na zachte winters de nieuwe aanwas regelmatig uitblijft (Beukema, 1992). Met behulp van modellen is bijvoorbeeld berekend dat een hogere watertemperatuur in de winter zorgt voor een slechtere reproductie en een slechtere ontwikkeling van larven van het nonnetje *Macoma baltica* (Brinkman *et al.*, 2001). Maar daarnaast kunnen zachte winters leiden

---

tot een grotere diversiteit en een stabiele biomassa vanwege de instroom van immigranten en de lagere mortaliteit. (Beukema 1992).

Temperatuurverandering veroorzaakt ook een verschuiving in de soortensamenstelling: in de laatste jaren is het aantal zuidelijke soorten toegenomen in de Noordzee, terwijl het aantal noordelijke soorten is afgenomen. Met name in de periode 1990-1995 is het aantal kreeftachtigen met een normaal zuidelijke verspreiding substantieel toegenomen (VOFF 1997).

Erosie van de kustzone, veroorzaakt door een versnelde zeespiegelstijging, leidt tot een verandering in de kustmorfologie. Er kunnen veranderingen optreden in de waterdiepte, de steilheid van de vooroever en de breedte van de brandingszone. Deze veranderingen worden tegengegaan door het uitvoeren van zandsuppleties. Door een versnelde zeespiegelstijging zal er een toename van het aantal zandsuppleties plaatsvinden. Bij een zandsuppletie op het strand of de vooroever sterft alle aanwezige bodemfauna. Het herstel van de diversiteit, de dichtheid en de biomassa duurt over het algemeen ongeveer 1-2 jaar en voor langlevende soorten (tweekleppigen, zeeklitzen) ongeveer 2-5 jaar (Adriaanse & Coosen, 1991; Essink 1997). Wanneer het aantal en de frequentie van zandsuppleties in de kustzone toenemen is het mogelijk dat de tot nu toe lokale effecten overgaan in effecten op populatieniveau (sommatie-effect). Een afname van de bodemfauna in de gehele kustzone zal een aanzienlijke invloed hebben op vogels en vissen die deze bodemfauna als hoofdvoedsel gebruiken.

Uit modelberekeningen blijkt dat zeespiegelstijging de biomassa en de productie van schelpdieren stimuleert, en ook de vestiging en groei van bodemdieren in het algemeen blijkt succesvoller te verlopen bij een hoger waterniveau (Brinkman *et al.*, 2001).

Door zeespiegelstijging neemt de sedimentatie van de wadplaten toe, zodat deze platen kunnen meegroeien. Bij een versnelde zeespiegelstijging zal de 'zandhonger' toenemen en zal er zand uit de kustzone naar de Waddenzee verplaatst worden. Hierdoor is het mogelijk dat er 'verzanding' van de Waddenzee optreedt. Het zandiger worden van de Waddenzee zou kunnen resulteren in het verdwijnen van soorten die een slikkige omgeving prefereren.

Bij een zeespiegelstijging van 1 meter kunnen de wadplaten niet meer meegroeien en zal er 'verdrinking' plaatsvinden. Hierdoor zal ook het areaal hogere wadplaten afnemen, samen met hun karakteristieke levensgemeenschap. De hoge wadplaten worden bewoond door slijkgarnalen (*Corophium* sp.) en wadslakjes (*Hydrobia ulvae*) en fungeren als een soort kinderkamer voor de jongste bodemstadia van het nonnetje (*Macoma baltica*) en de wadpier (*Arenicola arenaria*). Deze trekken tegen het bereiken van een volwassen grootte massaal naar de lagere platen, wat betekent dat verlies van geschikte hoge wadplaten negatieve gevolgen heeft voor de bevolking van de hoge en de lage platen (referenties in Oost *et al.* 1998).

Een landwaartse verschuiving van zoet-zout overgangen die wordt veroorzaakt door zeespiegelstijging zou van invloed kunnen zijn op de bodemfauna van estuaria, maar verwacht wordt dat dit effect heel gering zal zijn. Hetzelfde geldt voor een zeewaartse verschuiving van zoet-zout overgangen door een toename in de rivierafvoer in de winter, aangezien de biologische activiteit dan heel laag is. In het voorjaar zal een dergelijke verschuiving mogelijk meer invloed hebben. Door veranderingen in de rivierafvoer, toename in de winter en afname in de zomer, treden er veranderingen op in de verblijftijd van water in een estuarium, in de stratificatie en de saliniteit (Scavia *et al.* 2002). De invloed hiervan op bodemfauna is onduidelijk.

---

Een toename van de rivierafvoer heeft mogelijk ook een verhoogde afvoer van nutriënten en toxische stoffen tot gevolg. Een toename van nutriënten is van invloed op het fytoplankton en dus indirect, via het voedsel, ook op de bodemfauna. Toxische stoffen kunnen een negatief effect hebben op de populatiedynamica van gevoelige soorten.

### Vissen

Vissen in de kustwateren leven van zoöplankton, bodemfauna en kleinere vissoorten. Effecten van klimaatverandering op vissen zullen met name via de voedselketen werken, dus via de invloed op zoöplankton en bodemfauna.

Een ander belangrijk aspect is het feit dat groei, overleving en reproductie van vis efficiënt zijn binnen een vrij nauw temperatuurbereik (Brander 1995; Jobling 1996). Een verhoging van de temperatuur zou dus een migratie van vis naar gebieden met meer optimale temperatuur kunnen veroorzaken. O'Brien *et al.* (2000) hebben aangetoond dat een afname in de productie van jonge kabeljauw parallel loopt aan de opwarming van de Noordzee van de laatste 10 jaar in combinatie met overbevissing. Voor vissen in het Thames estuarium in Engeland is aangetoond dat de diversiteit toeneemt gedurende natte, warme winters (hoge NAO index), wat voornamelijk te verklaren is door de toename van zeldzame/ongewone soorten. De dichtheid van platvissen en noordelijke soorten (bijv. haring) is negatief gecorreleerd en de dichtheid van zuidelijke soorten (zoals baars en sprot) is positief gecorreleerd met de NAO index (Attrill & Power, 2002).

De invloed van zeespiegelstijging op vissen is moeilijk in te schatten omdat de effecten verschillend en tegenstrijdig kunnen zijn. Mogelijk verandert het lichtklimaat in de kustzone wanneer de erosie toeneemt, wat zou kunnen resulteren in een afname van de primaire productie. Ook in de Waddenzee zou de primaire productie kunnen veranderen door stijging van de zeespiegel, deze neemt bijvoorbeeld toe als er verzanding optreedt omdat het lichtklimaat dan verbetert. Zeespiegelstijging zou dus, afhankelijk van het gebied, een positieve of negatieve indirecte invloed kunnen hebben op het voedselaanbod van de vispopulaties in zoute kustwateren.

Diadrome vissen, vissen die tussen zoet en zout water migreren, vinden de ingang van de rivier door middel van stroming en saliniteit. Een landwaartse verschuiving van de zoet-zout overgang zou dit kunnen bemoeilijken en op die manier van invloed kunnen zijn op de migratie. Zeespiegelstijging en een verhoogde rivierafvoer zouden ook een verandering van de huidige kustverdedigingswerken, gemalen en spuisluisen tot gevolg kunnen hebben. Ook dit bemoeilijkt de toegang tot de rivieren voor diadrome vissen (van Ierland 2001).

Veranderingen in de rivierafvoer kunnen van invloed zijn op vissen door veranderingen in de saliniteit, de afvoer van nutriënten en daarmee in het voedselaanbod via fytoplankton. Een verhoogde afvoer van toxische stoffen kan van invloed zijn op de weerstand van vissen. Bij een hogere afvoer kan de kustrivier, het langs de Hollandse kust noordwaarts stromende kustwater met lage saliniteit, breder worden. Dit kan gevolgen hebben voor de productie. Het drijfvermogen van eieren en larven is namelijk afhankelijk van de saliniteit, hierdoor wordt bepaald in welke waterlaag en met welke stroming vervoer plaats vindt en dus waar ze terecht komen en met welke snelheid.

Synchroniteit tussen predator en prooi is heel belangrijk. De *match-mismatch* hypothese stelt dat de groei en overleving van kabeljauw larven afhankelijk zijn van synchrone productie met het belangrijkste voedsel: zoöplankton (Stenseth *et al.*, 2002). Een *mismatch* kan ontstaan wanneer de fytoplankton en daarmee de zoöplankton piek verschuift onder invloed van een toename in de troebelheid door een veranderd windveld. Stromingen van de

---

Atlantische Oceaan en de Noordzee zijn belangrijk voor het transport van larven en nutriënten en de migratie van vissen. Het is echter onduidelijk of er veranderingen zullen plaatsvinden in het windveld of de stromingen, dus het effect van klimaatverandering op synchroniteit is moeilijk voorspelbaar.

### Vogels

Voor vogels geldt hetzelfde als voor vissen: verandering van het klimaat zal met name invloed hebben op de voedselbeschikbaarheid. Bovengenoemde veranderingen in plankton, bodemdieren en vis kunnen positieve en negatieve effecten hebben op vogels die de Nederlandse kustwateren gebruiken als broedgebied, foerageergebied en/of rustgebied.

Een verhoging van de temperatuur zou veranderingen in de timing van de vogeltrek of het broedseizoen kunnen veroorzaken, waardoor een *mismatch* kan ontstaan met hoge pieken in het voedselaanbod. Overleving en groei zijn vaak afhankelijk van deze pieken, het missen van zo'n piek kan dus van invloed zijn op de populatie.

Toename van erosie leidt tot een toename van het aantal zandsuppleties in de kustzone. Zandsuppleties veroorzaken sterfte van bodemfauna en wanneer deze sterfte zodanig groot wordt dat er sprake is van een effect op populatieniveau zal dat een groot effect hebben op de vogels die leven van bodemfauna.

Bij een zeespiegelstijging van meer dan 40-60 cm per eeuw zal het areaal intergetijdeplaten afnemen doordat de sedimentatie deze stijging niet kan bijhouden. Hierdoor zal het aantal steltlopers dat op deze platen foerageert afnemen, doordat de hoeveelheid bodemfauna afneemt en de foerageertijd korter wordt (Louters en Gerritsen 1994; Brinkman *et al.*, 2001). Een vergelijkbaar voorbeeld is het verdwijnen van 33 % van het areaal aan intergetijdengebied door de aanleg van de Oosterscheldewerken tussen 1982 en 1987, dat leidde tot een achteruitgang van de aantallen wadvogels in dezelfde orde van grootte (Schekkerman *et al.* 1994). Door een versnelde zeespiegelstijging zal ook het kwelder areaal afnemen, wat van invloed kan zijn op de voedselbeschikbaarheid van bijvoorbeeld de brandgans waardoor de sterfte toeneemt of ze in de lente niet genoeg kunnen bijvetten wat leidt tot een reproductie afname (Brinkman *et al.*, 2001).

.....  
**Foto 3**

Brandganzen op de kwelder.



---

### **Zeezoogdieren**

In de Waddenzee voorkomende zoogdieren zijn de Gewone zeehond, de Grijze zeehond en de Bruinvis. In de kustzone van de Noordzee worden regelmatig Bruinvissen, Tuimelaars, Witsnuitdolfijnen en Witflankdolfijnen waargenomen (de Jong *et al.* 1999).

Bovenstaande effecten van klimaatverandering op plankton, bodemfauna en vissen zullen hoogst waarschijnlijk ook doorwerken op zeezoogdieren, aangezien zij aan de top van de voedselketen staan. Wanneer vissoorten die een belangrijk deel uitmaken van het voedsel van zoogdieren wegtrekken naar andere gebieden onder invloed van de verhoging van de temperatuur, is het mogelijk dat deze zoogdieren ook wegtrekken uit de gebieden waar ze nu leven. Naast invloed via de voedselketen kan klimaatverandering ook op een andere manier van invloed zijn. Een verhoging van de temperatuur kan een verandering in de biologische eigenschappen van zoogdierpopulaties veroorzaken, waardoor ze vatbaarder zijn voor ziektes (Harvell *et al.* 1999). De epidemie onder zeehonden in de jaren '80 in de Waddenzee is gestimuleerd door een stijgende temperatuur, die ervoor zorgde dat er hogere dichtheden zeehonden op het land waren. Hierdoor werd de overdracht van de ziekte vergemakkelijkt (Lavigne en Schmitz 1990). Erosie van de kust door zeespiegelstijging zou van invloed kunnen zijn op de zandbanken en -platen, waardoor de rust- en zooggebieden voor zeehonden afnemen of korter beschikbaar zijn (van Ierland *et al.* 2001).

---

## 5 Ecologische scenario's

---

### 'Worst case scenario':

In 2100 is de temperatuur van de lucht, de kustbodern en de kustwateren gemiddeld 6°C hoger dan in 1990. Bacteriële afbraakprocessen en de respiratie van plant en dier zijn daardoor toegenomen. De samenstelling van zowel flora als fauna is verschoven ten gunste van zuidelijkere soorten. De primaire productie is niet toegenomen, want licht en nutriënten zijn de bepalende factoren. Alhoewel de reproductie en biomassa van sommige dieren is afgenomen, neemt de totale diversiteit van schelpdieren en vissen toe, met name door 'nieuwe' soorten. Doordat er sneller organisch materiaal wordt afgebroken en omdat hiervoor zuurstof wordt verbruikt zal in bodems met veel organisch sediment (estuaria en Waddenzee) de zuurstofloosheid toenemen. Dit heeft effect op de nutriëntenhuishouding, er wordt minder fosfaat vastgehouden in de bodern en de dichtheid van bodemdieren zal afnemen.

De zeespiegel is met 1 meter gestegen waardoor er een continue en sterke erosie van de kust plaatsvindt. Er is habitatverlies voor kwelderplanten en kustvogels. De toename van kustsuppleties leidt tot een afname van schelpdierpopulaties in de gehele kuststrook. Suppleties en de afslag van kwelders leiden tot een verhoogde troebelheid in de kustwateren. De primaire productie van het fytoplankton en het fyto bentos in de kustzone is door de verhoogde troebelheid verminderd, hetgeen negatieve consequenties heeft op alle hogere trofische niveaus: zoöplankton, bodemdieren, vissen, en uiteindelijk zeezoogdieren.

Een verhoging van de nutriëntenvrachten door hogere rivierafvoeren leidt tot een verhoging van de primaire productie van het fytoplankton. Een toename van stratificatie in combinatie met een soortverschuiving naar giftige flagellaten kan dit gunstige effect teniet doen. Een toename van toxische stoffen door uitspoeling leidt ook tot negatieve gevolgen op zoöplankton, bodemfauna, vissen en zeezoogdieren.

Een belangrijk indirect effect wordt veroorzaakt door 'mismatch'. Het treedt op doordat de groei van een predator afhankelijk is van de synchrone ontwikkeling van zijn prooi. Verschuivingen in de tijd van de fytoplanktongroei en -kwaliteit leidt er toe dat de groei van zoöplankton vermindert. Dit heeft weer tot gevolg dat populaties van zoöplankton afhankelijke soorten zoals jonge vis zich minder goed ontwikkelen. Een te vroege ontwikkeling van kweldervegetaties heeft een negatief effect op ganzen die deze gebieden gebruiken om te foerageren.

Een ander indirect effect ontstaat door een combinatie van veranderingen in abiotische factoren in combinatie met een algehele verzwakking van de gezondheid. Zeezoogdieren worden vaker getroffen door virusepidemieën. Een vroeg voorbeeld uit 2002 is de sterfte van 20.000 zeehonden in Noordwest Europa, waarvan 2000 in Nederlandse wateren door het zogenaamde 'phocine distemper virus'. Het risico op dit soort epidemieën is in een warmer en natter klimaat toegenomen om twee redenen. Ten eerste neemt het transport van virusdeeltjes naar zee toe bij een hogere rivierafvoer. Ten tweede zijn door het veranderde klimaat de zeedieren niet meer in een optimale conditie en daardoor vatbaarder voor ziekten. Het probleem is dat

---

virussen die op land een gastheer hebben over kunnen gaan op een verwante gastheer in water, bijvoorbeeld een zeehond. Het probleem wordt versterkt door menselijke activiteiten zoals verslechtering van habitats, vervuiling en het wereldwijde transport van zee-organismen via bijvoorbeeld ballastwater.

**'No case scenario':**

Indien het lage klimaatscenario werkelijkheid wordt in 2100 (hoofdstuk 2): een temperatuurstijging van 1 tot 2 °C, een zeespiegelrijzing van 0,1 meter en minder sterke toename van de hoeveelheid neerslag (<12%), dan zijn de effecten op de abiotiek, en vervolgens op de ecologie waarschijnlijk zo klein dat deze niet meer te onderscheiden zijn van natuurlijke populatiefluctuaties, veranderingen in menselijk gebruik, en kortdurende klimaatschommelingen t.g.v. bijvoorbeeld de NAO.



---

## 6 Conclusies en aanbevelingen

---

Het onderzoek op het gebied van klimaatverandering krijgt mondiaal en ook in Nederland veel aandacht. Op het gebied van de klimatologische aspecten is redelijk goed in kaart gebracht welke veranderingen er kunnen optreden in de toekomst, alhoewel er in veel gevallen nog onzekerheden bestaan. Over de effecten van deze klimatologische veranderingen op de fysica, de chemie en de ecologie is vrij veel literatuur voorhanden, maar ook daarvoor geldt dat de onzekerheden over causale verbanden en gedane voorspellingen nog groot zijn. In een aantal gevallen zijn er relaties aangetoond tussen veranderingen in het klimaat die in het verleden hebben plaats gevonden en veranderingen in soortendiversiteit, dichtheid of biomassa van bepaalde organismegroepen of soorten. Deze relaties worden gebruikt om voorspellingen te doen over de effecten van klimaatverandering op de ecologie. In veel gevallen worden er voorspellingen gedaan op basis van veronderstellingen en ecologisch inzicht, zonder dat er sprake is van bewezen causale verbanden.

De aspecten van klimaatverandering lijken voor een groot aantal organismegroepen van belang te zijn, op verschillende manieren. Sommige aspecten hebben een positieve invloed op de ene groep en een negatieve invloed op een andere. Zelfs binnen een groep kan de invloed verschillend zijn, sommige soorten ondervinden wel een effect, andere soorten niet. Dit maakt het moeilijk om de ecologische effecten van klimaatverandering op een overzichtelijke manier in kaart te brengen.

Belangrijk is ook de interactie tussen verschillende groepen, zoals bijvoorbeeld predator-prooi relaties. Door een verschuiving van de groeiperiode van een bepaalde groep of soort kan er een *mismatch* ontstaan met de groeiperiode van een andere groep of soort, waardoor het voedselaanbod voor de predatoren niet op het juiste moment optimaal is.

De ingezette klimaatveranderingen kunnen niet gestopt worden, maar misschien kunnen de effecten ervan tot een minimum beperkt worden als er rekening gehouden wordt met de menselijke activiteiten die de effecten van klimaatverandering versterken (gaswinning, landbouw, visserij).

De ecologische gevolgen van klimaatverandering zijn zeer moeilijk te voorspellen vanwege de vele onzekerheden en interacties. Het is dus van belang om een beter beeld te krijgen van deze onzekerheden en op welke manier het beleid hierop kan inspelen. Een veerkrachtig beleid zou de effecten kunnen beperken, zowel de effecten op het ecologisch functioneren als de effecten op de menselijke gebruiksfuncties die daarmee samenhangen.

De volgende aanbevelingen worden gedaan:

### **Benadering**

In deze verkenning is geen rekening gehouden met het vermogen van organismen zich aan te passen aan veranderingen. De effecten van klimaatverandering zijn beschreven vanuit het uitgangspunt dat de omstandigheden in 2100 plotseling veranderen. Klimaatverandering is echter een proces waarbij de veranderingen geleidelijk optreden, waaraan individuen (fysiologisch) en populaties (genetisch) zich zouden kunnen aanpassen. Het

---

verdient aanbeveling om de effecten van klimaatverandering op de ecologie vanuit deze benadering te onderzoeken.

### **Basisgegevens**

- Onderhoud bestaande monitoringreeksen en breid deze eventueel uit, zowel in ruimte (samenwerking Duitsland, België, Frankrijk) als in tijd (verzamel historische data, gebruik de Continuous Plankton Recorder).
- Meet de respons van ecologisch belangrijke soorten op een temperatuurverhoging in het laboratorium. Voor veel soorten zijn de directe effecten van een temperatuurverhoging onbekend.
- Bestudeer de effecten van een temperatuurverhoging op nutriëntencycli en chemische verontreinigingen in de waterbodem.
- Bestudeer de fysiologische en genetische mogelijkheden tot aanpassing.

### **Ecosysteem interacties**

- Doe experimenteel onderzoek in kunstmatige ecosystemen om de respons van complexe verbanden te meten (mismatch hypothesen, tegenstrijdigheden van effecten).
- Onderzoek of het effect van veranderingen in de NAO gerelateerd is aan verschuivingen van ecologisch belangrijke soorten of groepen.
- Probeer via modellen de effecten van klimaatverandering te kwantificeren.
- Gebruik gegevens van mariene systemen waar de omstandigheden vergelijkbaar zijn met de in Nederland verwachte omstandigheden.

### **Beleid**

- Breng sociaal-economische veranderingen in de 21<sup>e</sup> eeuw in kaart om een beter beeld te krijgen van de interacties tussen effecten van klimaatverandering en menselijk handelen (mestreductie, gebruik bestrijdingsmiddelen, landinrichting, kustverdediging, waterbergingscapaciteit).
- Breng in kaart welke menselijke gebruiksfuncties (bijvoorbeeld visserij) het grootste risico lopen beïnvloed te worden. Combineer dat met de gevolgen voor ecologie en economie en prioriteer aan de hand daarvan de inspanning die geleverd moet worden op het gebied van onderzoek ten behoeve van het ontwikkelen van veerkrachtig beleid.
- Versterk de samenwerking: met instituten binnen (RIZA) en buiten RWS (bijvoorbeeld in een nieuw NOP programma) en in Europees verband.
- Ontwikkel referenties (bijvoorbeeld voor KRW) die robuust genoeg zijn om veranderingen door klimaateffecten op te vangen.

---

# Referenties

---

**Adriaanse, L.A., Coosen, J. (1991)**

Beach and dune nourishment and environmental aspects. *Coastal Engineering* **16**: 129-146.

**Attrill, M.J. & Power, M. (2002)**

Climatic influence on a marine fish assemblage. *Nature* **417**: 275-278.

**Beaugrand, G., Reid, P.C., Ibañez, F., Lindley, J.A., Edwards, M. (2002)**

Reorganization of north Atlantic marine copepod biodiversity and climate, *Science* **296**: 1692-1694.

**Beukema, J.J. (1990)**

Expected effects of changes in winter temperatures on benthic animals living in soft sediments in coastal North Sea areas. In: Beukema, J.J., Wolff, W.J., Brouns, W.J. (eds.) Expected effects of climate change on marine coastal ecosystems. Developments in Hydrobiology 57, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 83-92.

**Beukema, J.J. (1992)**

Expected changes in the Wadden sea benthos in a warmer world: Lessons from periods with mild winters. *Neth. J. Sea Res.* **30**: 73-79.

**Brander, K.M. (1995)**

The effects of temperature on growth of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.). *ICES J. Mar. Sci* **52** : 1-10.

**Breeman, A. (1990)**

Expected effects of changing seawater temperatures on the geographic distribution of seaweed species. In: Beukema, J.J., Wolff, W.J., Brouns, W.J. (eds.) Expected effects of climate change on marine coastal ecosystems. Developments in Hydrobiology 57, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 69-76.

**Brinkman, A.G. (1995)**

Integration of effects of climate changes on estuarine ecosystem communities. IBN-DLO NRP report 410 100 078.

**Brinkman, A.G., Ens, B.J., Kersting, K., Baptist, M., Vonk, M., Drent, J., Janssen-Stelder, B.M., Tol, M.W.M. van der (2001)**

Modelling the impact of climate change on the Wadden Sea ecosystems. Dutch National Research programme on Global Air Pollution and Climate change, Report no: 410 200 066.

**Brussaard, C. P. D., Thyraug, R., Marie, D., Bratbak, G. (1999)**

Flow cytometric analyses of viral infection in two marine phytoplankton species, *Micromonas pusilla* (Prasinophyceae) and *Phaeocystis pouchetii* (Prymnesiophyceae) *J. Phycol.* **35**: 941-948.

---

**Cazenave, A., Dominh, K., Gennero, M.C and Ferret, B. (1998)**  
Global mean sea level changes observed by Topex-Poseidon and ERS-1.  
*Physical Chemical Earth*, **23**, 1069-75.

**Dijkema, K.S. (1997)**  
Impact prognosis for salt marshes from subsidence by gas extraction in the Wadden Sea. *J. Coast. Res.* **13**: 1294-1304.

**Essink, K. (1997)**  
Risk Analysis Of Coastal Nourishment Techniques. Final Evaluation Report. National Institute of Coastal and Marine Management. Report Nr. RIKZ-97.031.

**Gray, A.J., Mogg, R.J. (2001)**  
Climate impacts on pioneer saltmarsh plants. *Clim. Res.* **18**: 5-112.

**Haas, H. de, van Weering, T.C.E., de Stigter, H. (2002)**  
Organic carbon in shelf seas: sinks or sources, processes and products. *Cont. Shelf Res.* **22**: 691-717.

**Harvell, C.D., Kim, K., Burkholder, J.M., Colwell, R.R., Epstein, P.R., Grimes, D.J., Hofmann, E.E., Lipp, E.K., Osterhaus, A.D.M.E., Overstreet, R.M., Porter, J.W., Smith, G.W., Vasta, G.R. (1999)**  
Emerging diseases – climate links and anthropogenic factors. *Science* **285**: 1505-1509.

**Ierland, E.C. van, Groot, R.S. de, Kuikman, P.J., Martens, P., Amelung, B., Daan, N., Huynen, M., Kramer, K., Szöny, J., Veraart, J.A., Verhagen, A., Vliet, A. van, Walsum, P.E.V. van, Westein, E. (2001)**  
Integrated assessment of vulnerability to climate change and adaption options in the Netherlands. Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change, Report no: 410 200 088.

**IPCC (2001)**  
A report of working group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. 83 pp.

**Jong, F. de, Bakker, J., Berkel, C. van, Dahl, K., Dankers, N., Gätje, C., Marencic, H., Potel, P. (1999)**  
Waddenzee Quality Status Rapport . Rapport RIKZ/2000.008.

**Jobling, M. (1996)**  
Temperature and Growth: Modulation of growth rate via temperature change. In: *Global warming: Implications for marine and freshwater fish* (eds. C.M. Wood and D.G. MacDonald), p. 225-253. Cambridge University Press, Cambridge, Maryland

**Kok, M.T.J., Heij, G.J., Verhagen, A., Rovers, C.A. (2001)**  
Klimaatverandering, een aanhoudende zorg. Eindrapport 2e fase Nationaal Onderzoekprogramma Mondiale Luchtverontreiniging en Klimaatverandering (NOP II) Programma Bureau NOP, Bilthoven.

---

**KNMI (1999)**

De toestand van het klimaat in Nederland 1999. G.P. Können (red.) De Bilt. 64 pp.

**KNMI (2001)**

Weer en water in de 21e eeuw. Een samenvatting van het derde IPCC klimaatrapport voor het Nederlandse waterbeheer. J.J. Beersma, B.J.J.M. van den Hurk & G.P. Können (samenstelling). De Bilt, 8pp.

**Lavigne, D.M., Schmitz, O.J. (1990)**

Global warming and increasing population density: a prescription for seal plagues. *Marine Pollution Bulletin* 21: 280-284.

**Louters, T. Gerritsen, F. (1994):**

Het mysterie van de wadden. Hoe een getijdesysteem inspeelt op de zeespiegelstijging. Rapport RIKZ-94.040.

**Mooij, W.M., Hülsmann, S., Lammens, E.H.R.R., Bodelier, P.L.E., Boers, P.C.M., Coops, H., Dionsio Pires, M.L., Gons, H.J., Ibelings, B.W., Nolet, B.A., Noordhuis, R., Portielje, R., Molen, D.T. van der, Berg, M.S. van den, Wolfstein, K. (in concept)**

Assessing the impact of climate change on shallow lakes: linking management objectives and external factors with theory and data.

**O'Brien, C.M., Fox, C.J., Planque, B., Casey, J. (2000)**

Climate variability and North Sea cod. *Nature* 404: 142.

**Oost, A.P., Ens, B.J., Brinkman, A.G., Dijkema, K.S., Eysink, W.D., Beukema, J.J., Gussinklo, H.J., Verboom, B.M.J., Verburgh, J.J. (1998)**

Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Assen, 372 pp.

**Pagee, H. van (2000)**

Invloed van klimaatverandering op zout-zoet overgangen en kustwateren. Verslag workshop WL Delft.

**Peperzak, L. (2003)**

Climate change and harmful algal blooms in the North Sea. *Oecologica Acta* 24: 139-144.

**Rozema, J., Lenssen, G.M., Broekman, R.A., Arp, W.P. (1990)**

Effects of atmospheric carbon dioxide enrichment on salt-marsh plants. In: Beukema, J.J., Wolff, W.J., Brouns, W.J. (eds.) Expected effects of climate change on marine coastal ecosystems. *Developments in Hydrobiology* 57, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 49-54.

**Ronde, J.G. de (1990)**

Wassend Water; gevolgen van het broeikas-effect voor de waterstaat. DGW Nota GWAO 90.015.

---

**Scavia, D., Field, J.C., Boesch, D.F., Buddemeier, R.W., Burkett, V., Cayan, D.R., Fogarty, M., Harwell, M.A., Howarth, R.W., Mason, C., Reed, D.J., Royer, T.C., Sallenger, A.H., Titus, J.G. (2002)**

Climate change impacts on U.S. coastal and marine ecosystems. *Estuaries* **25**: 149-164.

**Schekkerman, H., Meininger, P.L., Meire, P.L. (1994)**

Changes in the waterbird populations of the Oosterschelde, SW Netherlands, as a result of large scale engineering works. Netherlands Institute of Ecology, Centre for Estuarine and Coastal Ecology, no. 708.

**Stenseth, N.C., Mysterud, A., Ottersen, G., Hurrell, J.W., Chan, K., Lima, M. (2002):**

Ecological effects of climate fluctuations. *Science* **297**: 1292-1296.

**VOFF (1997)**

Jaarboek natuur '97, KNNV Uitgeverij Utrecht.

**Vogel, S.**

Life in moving fluids. Princeton University Press, Princeton, 1996.

**WASA Group (1998)**

Changing waves and storms in the northeast Atlantic. Bulletin American Meteorological Society, **79**, 741-760.

**Zwerver, S., Kok, M.T.J. (1999)**

Klimaatonderzoek, Eindrapport 1e fase Nationaal Onderzoekprogramma Mondiale Luchtverontreiniging en Klimaatverandering (NOP I) RIVM-NRP, Bilthoven.

# Bijlage 1

Direct effect van abiotische verandering t.g.v. klimaatverandering in 2100 op de ecologische soortgroepen

	Virussen	Bacteriën	Fytoplankton	Fytobenthos	Zoöplankton	Planten	Bodemdieren	Vissen	Vogels	Zoogdieren
<b>Temperatuurstijging (+6°C):</b>										
stijging luchttemperatuur	nvt	nvt	nvt	-	nvt	+	=	nvt	=	-
stijging watertemperatuur	=	+	+ en -	=	+ en -	+	+ en -	+ en -	=	.
<b>Zeespiegelrijzing (+1 meter):</b>										
erosie kustzone	=	=	-	-	=	-	-	-	-	-
toename suppleties	=	=	-	-	=	-	-	-	-	-
kwelderafslag	=	+	-	-	=	-	=	-	-	=
verzanding Waddenzee	=	-	+	+	=	=	+ en -	.	+	+
verdrinking intergetijdgebieden	nvt	nvt	nvt	+	nvt	=	+ en -	=	-	-
Landwaartse verschuiving zoet/zout	=	=	=	=	=	=	=	.	=	=
toename zoute kwel	nvt	nvt	nvt	nvt	nvt	+ en -	nvt	nvt	nvt	nvt
<b>Toename neerslag (+12%):</b>										
verhoogde winter rivierafvoer	+	=	+	=	=	=	=	.	=	=
verlaagde zomer rivierafvoer	-	=	-	-	=	=	=	.	=	=
verhoogde piekafvoer zomer	+	=	+	+	=	=	=	.	=	=
verlaagde saliniteit	=	+	=	=	=	=	+ en -	+ en -	=	=
zeewaartse verschuiving zoet/zout	=	=	=	=	=	=	=	.	=	=
verhoogde afvoer nutriënten	=	=	+	+	=	+	=	=	=	=
verhoogde afvoer toxische stoffen	=	-	=	=	-	=	-	-	-	-
Toename atmosferische N-depositie	=	=	+	=	=	.	=	=	=	=
<b>Toename CO<sub>2</sub> (+ 219%)</b>										
	=	=	+ en -	.	=	+ en -	=	=	=	=

- +
  - 
  - + en -
  - =
  - .
  - nvt
- + Toename van diversiteit en dichtheid  
 - Afname van diversiteit en/of dichtheid  
 + en - Zowel toename als afname van diversiteit en/of dichtheid  
 = Geen effect  
 . Niet bekend  
 nvt Niet van toepassing

---

## Bijlage 2

---

---

Naam	Instituut	Expertise
G.P. Können	KNMI De Bilt	Klimatoloog
A.P. Oost	RIKZ Haren	Morfoloog
J.P.M. Mulder	RIKZ Den Haag	Morfoloog
J. Dronkers	IMAU Utrecht	Oceanograaf
G.T.M. van Eck	RIKZ Middelburg	Chemicus
J. Middelburg	NIOO-CEME Yerseke	Chemicus
R.E. Grift	RIVO IJmuiden	Visserij bioloog
A. M. Breeman	RUG Groningen	Marien ecooloog (Wieren)
G. M. Janssen	RIKZ Haren	Marien ecooloog

---