



KLIMAATVERANDERING

Samenvatting van het vijfde IPCC-assessment en een vertaling naar Nederland

Planbureau voor de Leefomgeving | Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut



Klimaatverandering

Klimaatverandering

Samenvatting van het
vijfde IPCC-assessment en een
vertaling naar Nederland

Klimaatverandering. Samenvatting van het vijfde IPCC-assessment en een vertaling naar Nederland

PBL (Planbureau voor de Leefomgeving)

KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut)

Den Haag / De Bilt, 2015

ISBN: 978-94-91506-89-5

PBL-publicatienummer: 1405

Eindverantwoordelijkheid

PBL (Planbureau voor de Leefomgeving)

KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut)

Contact

Bram Bregman (KNMI, bram.bregman@knmi.nl),

Willem Ligtoet (PBL, willem.ligtoet@pbl.nl)

Auteurs

Willem Ligtoet & Bram Bregman (redactie)

Rob van Dorland (KNMI), Wilfried ten Brinke (Blueland), Rolf de Vos (Ecofys),

Arthur Petersen (University College London), Hans Visser (PBL)

Supervisie

Pieter Boot (PBL), Bram Bregman (KNMI)

Redactie figuren

Beeldredactie PBL

Fotoverantwoording

Omslagfoto: Nationale Beeldbank / RWJ Publishing; pagina 22: NASA/SDO en de science teams van AIA, EVE en HMI; pagina 70: Hollandse Hoogte / Michiel Wijnbergh Fotografie

Eindredactie en productie

Simone Langeweg, Tekst- en Communicatieadvies (tekstredactie) en

Uitgeverij PBL (productie)

Opmaak

Textcetera, Den Haag

Drukwerk

Xerox/OBT, Den Haag

U kunt de publicatie downloaden via de websites www.knmi.nl en www.pbl.nl.

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van

bronvermelding: KNMI & PBL (2015), *Klimaatverandering. Samenvatting van het vijfde IPCC-assessment en een vertaling naar Nederland*, Den Haag / De Bilt: PBL / KNMI.

Inhoud

Voorwoord 8

Verantwoording 10

1 IPCC-Werkgroep I: Klimaatverandering, de natuurwetenschappelijke basis 12

- 1.1 Welke veranderingen zijn waargenomen? 13
- 1.2 Hoe groot is de bijdrage van de mens? 22
- 1.3 Wat kunnen we nog verwachten? 26
- 1.4 Hoe gaat het klimaat in Nederland veranderen? 33

2 IPCC-Werkgroep II: Effecten van klimaatverandering en mogelijkheden voor adaptatie 42

- 2.1 Wat verstaat het IPCC onder risico's en adaptatie? 44
- 2.2 Welke veranderingen zijn wereldwijd waargenomen? 46
- 2.3 Wat kunnen we wereldwijd verwachten? 51
- 2.4 Hoe kunnen landen zich aanpassen aan de gevolgen van klimaatverandering? 60
- 2.5 Consequenties en adaptatiemogelijkheden voor Nederland 66

3 IPCC-Werkgroep III: Beperken klimaatverandering door reductie broeikasgasemissies 82

- 3.1 Beperken van de menselijke invloed op het klimaat 84
- 3.2 De trend in broeikasgassen: groei 84
- 3.3 Emissiepaden in de toekomst 89
- 3.4 Wat betekenen de emissiepaden per sector? 97
- 3.5 Hoe ziet succesvol klimaatbeleid eruit? 107
- 3.6 Wat kan er in Nederland? 112

4	Syntheserapport van het IPCC: kernpunten	122
4.1	Inleiding	123
4.2	Vermijden van gevaarlijke menselijke beïnvloeding van het klimaatsysteem	124
4.3	Klimaatverandering heeft effecten op de lange termijn	126
4.4	Voorwaarden en belemmeringen voor adaptatie- en mitigatiemaatregelen	127
4.5	Beleidsbenaderingen voor adaptatie en mitigatie, technologie en financiering	128
4.6	Wisselwerking met duurzame ontwikkeling	131
4.7	Nederland: de Klimaatagenda 2013	132
	Literatuur	134

Voorwoord

Nobelprijswinnaar Albert Einstein was ervan overtuigd dat politiek moeilijker is dan (natuur)wetenschap. *Politics is more difficult than physics*, zei hij ooit. Is wetenschap inderdaad minder ingewikkeld dan politiek? Als je de recente internationale klimaatonderhandelingen in Lima bekijkt, dan zou je dat haast wel denken. En dat terwijl de urgentie en noodzaak om door te pakken groter dan ooit is.

Toch blijf ik ondanks de moeizame onderhandelingen in Lima optimistisch over de kansen op een nieuw klimaatakkoord in Parijs eind 2015. De signalen van de internationale klimaatbijeenkomsten in zowel New York als Lima en eerdere klimaatafspraken tussen landen als de Verenigde Staten en China tonen aan dat landen willen bewegen. En dat ze dat samen willen doen met bedrijven en steden. Het is nu zaak dat we die signalen omzetten in daden. Daden die zijn gebaseerd op de wetenschappelijke feiten en analyses die door het IPCC verzameld, beoordeeld en met elkaar in verband worden gebracht.

Het is de klimaatwetenschap die politici, beleidsmakers en de samenleving vaste grond onder de voeten kan geven voor het nemen van goede en effectieve besluiten. Dat is essentieel voor zo'n complex vraagstuk als klimaatverandering.

Het IPCC bouwt bruggen tussen wetenschap en beleid. En daar ligt juist de kracht van de IPCC-rapporten. Zij bieden ons een volledig, betrouwbaar en actueel beeld van alle beschikbare wetenschappelijke literatuur op het gebied van klimaatverandering. Het IPCC laat duidelijk de gevolgen van verschillende handelingsperspectieven zien. En trekt daar conclusies uit die verder gaan dan de afzonderlijke wetenschappelijke artikelen. Daarmee vormt dit rapport het kennisfundament voor de internationale klimaatonderhandelingen die moeten leiden tot een nieuw klimaatakkoord eind 2015 in Parijs. De rol van de politiek is een andere dan die van de wetenschap. Politiek moet gebaseerd zijn op waarden en idealen. Daarvoor zijn feiten en controleerbare inzichten onontbeerlijk. Als we blind zijn voor wetenschappelijke inzichten, hollen we van incident naar incident en rennen we van spandoek naar spandoek. Dat moeten we voorkomen, want daar zijn de vraagstukken te complex en de gekozen oplossingen te belangrijk en ingrijpend voor.

Dit rapport helpt ons lezers klimaatverandering tastbaar te maken voor de Nederlandse situatie. Het geeft een kristalhelder overzicht van de gevolgen voor ons land. En vormt daarmee een onmisbare pijler voor het vinden van zowel de antwoorden als het grijpen van (economische) kansen bij de aanpak van klimaatverandering. Dat geldt voor de overheid, maar zeker ook voor het bedrijfsleven en maatschappelijke organisaties. Zo gebruiken we deze kennis voor het maken van onderlinge afspraken zoals eerder in het Energieakkoord of bij het ontwikkelen van de Nationale Adaptatie Strategie. Ik dank de auteurs en het KNMI en PBL voor deze Nederlandse doorvertaling. Het is aan ons – overheden, bedrijven en individuele burgers – op basis van deze kennis, feiten en analyses in actie te komen en werk te maken van het klimaat.

Wilma Mansveld
Staatssecretaris van Infrastructuur en Milieu

Verantwoording

In 2013 en 2014 heeft het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) vier rapporten gepubliceerd over klimaatverandering (figuur 1). Het eerste rapport, van IPCC-Werkgroep I, is uitgebracht in september 2013. Het gaat over het fysieke klimaatsysteem en legt de wetenschappelijke basis voor de inzichten in de historische en mogelijke toekomstige klimaatveranderingen. Het tweede rapport, van Werkgroep II van het IPCC en gepubliceerd in maart 2014, gaat over de effecten van klimaatverandering die al worden waargenomen, over de mogelijke toekomstige gevolgen van klimaatverandering en over de mogelijkheden voor aanpassingen daaraan ('adaptatie'). Het derde rapport, van Werkgroep III en gepubliceerd in april 2014, gaat over de mogelijkheden om klimaatverandering te beperken door de uitstoot aan broeikasgassen te verminderen. Het vierde en laatste rapport werd eind oktober 2014 goedgekeurd en bevat de synthese van de drie voorgaande rapporten. Het besteedt aandacht aan de risico's van 'gevaarlijke klimaatveranderingen', de mogelijkheid dat op mondiale en regionale schaal verschillende onomkeerbare effecten optreden, de mogelijke beleidsbenaderingen voor adaptatie en mitigatie, de voorwaarden en belemmeringen voor het doorvoeren van beleidsmaatregelen en de wisselwerking met duurzame ontwikkeling.

De vier rapporten zijn opgesteld door 235 auteurs en 900 reviewers. De diverse commentaarrondes leverden bijna 40.000 commentaren op. De in 2013 en 2014 gepubliceerde rapporten beslaan in totaal een kleine 5.000 pagina's. Het was derhalve niet mogelijk om in deze samenvatting van dertig tot veertig pagina's per rapport en tien pagina's voor de synthese aan alle aspecten evenveel aandacht te besteden. We hebben dan ook duidelijke keuzes moeten maken in de te presenteren informatie en de ondersteunende figuren.

De opbouw van deze samenvatting en vertaling naar de Nederlandse situatie volgt die van het IPCC-rapport. In hoofdstuk 1 vatten we het rapport van IPCC-Werkgroep I samen. We laten zien hoe het klimaatsysteem werkt, hoe de mens via de uitstoot van broeikasgassen het klimaat verandert en welke klimaatscenario's voor de toekomst worden geschetst. Om de mondiale klimaatverandering te vertalen naar Nederland geven we de belangrijkste karakteristieken van de KNMI'14-klimaatscenario's.

Hoofdstuk 2 gaat over het rapport van IPCC-Werkgroep II, over de effecten en de risico's van klimaatverandering en de mogelijkheden tot aanpassing daaraan. We geven een kort overzicht van de klimateffecten in Nederland en de wijze waarop Nederland zich daaraan aanpast via het Deltaprogramma en de komende Nationale Adaptatie Strategie.

In hoofdstuk 3 schetsen we op basis van het rapport van IPCC-Werkgroep III de mondiale trends ten aanzien van de broeikasgassen, en hoe deze trends kunnen worden beïnvloed door de broeikasgassen terug te dringen ('emissiereductie'). Ook duiden we de emissie-

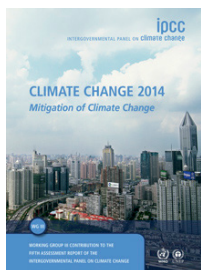
Figuur 1
De vier IPCC AR5-rapporten



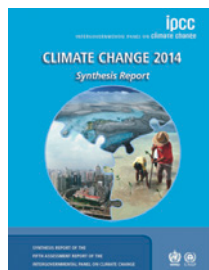
WG I
 Klimaatverandering,
 de natuurwetenschappelijke basis
www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/



WG II
 Klimaatverandering,
 gevolgen, adaptatie
 en kwetsbaarheid
www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/



WG III
 Klimaatverandering,
 emissiereductie van
 broeikasgassen
www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/



Syntheserapport
www.ipcc.ch/report/ar5/syr/

Bron: IPCC 2014

paden per sector en de betekenis voor het Nederlandse beleid, waarbij we de bevindingen onder andere leggen naast die van de Nationale Energieverkenning 2014. In hoofdstuk 4, de samenvatting van het IPCC-Syntheserapport, richten we ons op een aantal belangrijke overstijgende thema's die in dit rapport aan de orde komen: risico's die samenhangen met onomkeerbare omslagen op mondiale en regionale schaal, beleidsbenaderingen voor mitigatie en adaptatie en de aansluiting op duurzame ontwikkeling.

We danken het IPCC voor het beschikbaar stellen van de figuren en de ruimte die we hebben gekregen om deze te vertalen en op onderdelen te bewerken en aan te passen. Verder zijn we prof. dr. J. Kwadijk (Universiteit Twente), prof. dr. W. Turkenburg (Copernicus Institute of Sustainable Development, Utrecht Universiteit), prof. dr. P. Vellinga (Wageningen Universiteit), dr. L. Bouwer (Deltares) en prof. dr. D. van Vuuren (Universiteit Utrecht/PBL) bijzonder erkentelijk voor hun wetenschappelijke review en commentaren op de conceptteksten van onderdelen van deze samenvatting van het vijfde IPCC-assessment en de vertaling daarvan naar Nederland. Ook zijn we dank verschuldigd aan het ministerie van Infrastructuur en Milieu, de staf van de Deltacommissaris en het ministerie van Economische Zaken voor hun commentaren. Het KNMI en het PBL zijn, als opstellers van het voorliggende rapport, echter geheel verantwoordelijk voor de tekst en de inhoud van de figuren.

IPCC-Werkgroep I

Klimaatverandering, de natuurwetenschappelijke basis

Samenvatting

Het klimaat warmt op en veel van de sinds de jaren vijftig waargenomen veranderingen in het klimaatsysteem zijn in de afgelopen honderden tot duizenden jaren niet eerder voorgekomen. De concentratie van broeikasgassen is toegenomen, de atmosfeer en de oceaan zijn opgewarmd, de hoeveelheid sneeuw en ijs is afgenomen en de zeespiegel is gestegen. Nederland en omliggende landen zijn tweemaal zo snel opgewarmd als gemiddeld op aarde en ook is het hier meer gaan regenen. Zowel mondiaal als voor Nederland was het jaar 2014 record warm.

Sinds 1998 is de wereldgemiddelde temperatuurstijging veel kleiner dan in de decennia ervoor. Deze trendbreuk wordt ook wel 'pauze' genoemd. Volgens het vijfde assessment-rapport van het IPCC deden zich in deze periode enkele natuurlijke invloeden op het klimaat voor die het opwarmende effect door de toename van broeikasgassen voor het grootste deel hebben gecompenseerd. Omdat deze natuurlijke invloeden tijdelijk zijn, is het onwaarschijnlijk dat de opwarming ook op langere termijn langzamer zal blijven verlopen.

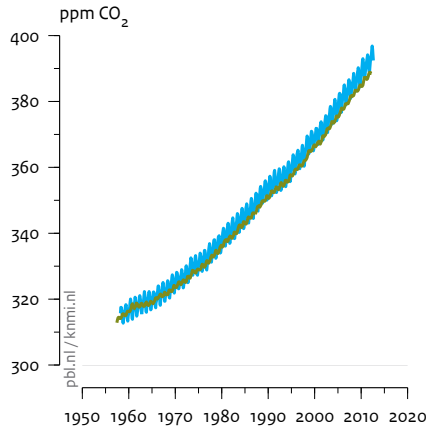
Het is uiterst waarschijnlijk dat de mens de belangrijkste oorzaak is van de sinds het midden van de twintigste eeuw waargenomen opwarming. Dat andere factoren dan de mens verantwoordelijk zijn voor de opwarming, vindt het IPCC in zijn vijfde rapport nog minder waarschijnlijk dan in het rapport uit 2007.

De aanwezigheid van meer broeikasgassen leidt tot meer opwarming en tot veranderingen in alle delen van het klimaatsysteem. Om de klimaatverandering te beperken, is dan ook een forse vermindering nodig van de mondiale uitstoot van broeikasgassen. De aard en de mate van de klimaatverandering vertonen regionale verschillen.

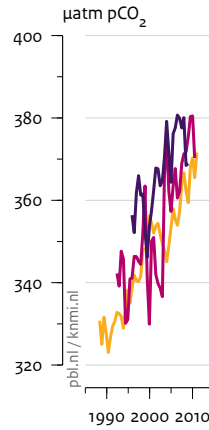
Figuur 1.1

Waargenomen indicatoren van veranderende koolstofcyclus

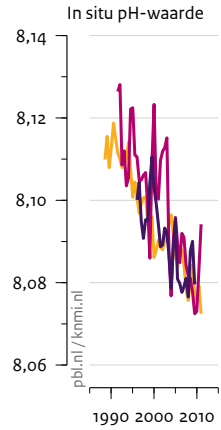
Kooldioxideconcentratie in atmosfeer



Partiële druk van opgelost kooldioxide in oppervlakte-water oceaan



Zuurgraad in oppervlakte-water oceaan



- Mauna Loa (19°32'N, 155°34'W)
- Zuidpool (89°59'S, 24°48'W)

- Atlantische Oceaan (29°10'N, 15°30'W)
- Atlantische Oceaan (31°40'N, 64°10'W)
- Grote Oceaan (22°45'N, 158°00'W)

Bron: IPCC WGI 2013

Verschillende metingen van CO₂: (links) de kooldioxideconcentratie in de atmosfeer sinds 1958, (midden) de hoeveelheid opgeloste kooldioxide aan het oceaanoppervlak, en (rechts) de zuurgraad van het zeewater.

Met de KNMI-klimaatscenario's – die op basis van het IPCC-rapport zijn gemaakt – ontstaat het volgende beeld van de toekomstige klimaatverandering in Nederland: Nederland krijgt de komende eeuw te maken met gemiddeld hogere temperaturen, veranderende neerslagpatronen en een stijgende zeespiegel. De kans op hittegolven in de zomer neemt toe en neerslagextremen zullen vaker voorkomen.

1.1 Welke veranderingen zijn waargenomen?

Het klimaat warmt op en veel van de sinds de jaren vijftig waargenomen veranderingen in het klimaatstelsel zijn de afgelopen honderden tot duizenden jaren niet eerder voorgekomen. De concentratie van broeikasgassen is toegenomen, de atmosfeer en de oceaan zijn opgewarmd, de hoeveelheid sneeuw en ijs is afgenomen en de zeespiegel is gestegen. Nederland en omliggende landen zijn tweemaal zo snel opgewarmd als gemiddeld op aarde en het is hier meer gaan regenen. Voor Nederland was 2014 het warmste jaar ooit sinds de metingen begonnen in 1706.

Broeikasgassen

De concentraties in de atmosfeer van kooldioxide (CO₂), methaan en lachgas zijn toegenomen tot waarden die in ten minste de afgelopen 800.000 jaar niet eerder zijn voorgekomen. De CO₂-concentratie is sinds het pre-industriële tijdperk toegenomen met 40 procent, vooral door de verbranding van fossiele brandstoffen, de productie van cement en door veranderingen in het landgebruik. De oceaan heeft ongeveer 30 procent van de door de mens uitgestoten CO₂ geabsorbeerd, wat verzuring van de oceaan als gevolg heeft (figuur 1.1).

Temperatuur

In de afgelopen 130 jaar is het mondiaal gemiddeld 0,9°C warmer geworden (figuur 1.2). De jaren tachtig en negentig en 2000-2009 werden steeds warmer: deze drie decennia waren warmer dan alle voorgaande decennia sinds 1850. De opwarming van de aarde gaat niet in een constant tempo, maar is aan schommelingen onderhevig. Na een versnelling aan het eind van de vorige eeuw verliep de opwarming de afgelopen vijftien jaar langzamer. Zo'n tempowisseling in het waargenomen temperatuurverloop is niet uniek en kan goed worden verklaard met natuurlijke fluctuaties (zie kader 1.1). Het jaar 2014 is mondiaal uitgekomen op de hoogste waarde sinds 1850 (als onzekerheden worden meegenomen, eindigt 2014 ex aequo met de jaren 2005 en 2010).

Op het noordelijk halfrond was de periode 1983-2012 waarschijnlijk (meer dan 66 procent kans) de warmste periode van dertig jaar in de afgelopen 1.400 jaar. Wel zijn op continentale schaal gedurende de Middeleeuwen (950-1250) uitschieters gevonden waarin de temperatuur over een tijdvak van tientallen jaren boven het niveau lag van het eind van de twintigste eeuw. De koelende trend die 5.000 jaar geleden is ingezet doordat de hellingshoek van de aardas (periodiek) veranderde en die nog duizenden jaren had moeten voortduren, is door de snelle opwarming in de twintigste eeuw tenietgedaan.

In Nederland nam de gemiddelde temperatuur tussen 1906 en 2013 met 2,0°C toe. Tussen 1951 en 2013 was deze toename het grootst, namelijk 1,6°C. Sinds 1951 is de opwarming in Nederland en omliggende landen ongeveer twee keer zo sterk als de mondiale temperatuurstijging. Dit kan voor een belangrijk deel worden verklaard doordat de wind in de winters vaker uit het westen kwam. De zomers waren extra warm doordat de zonnestraling toenam, mede doordat er minder luchtverontreiniging was.

Het jaar 2014 was het warmste jaar in Nederland sinds de metingen in 1706 begonnen. Hierbij is de temperatuurreeks samengesteld uit kortere reeksen van vijf meetstations (Delft, Zwanenburg, Haarlem, Utrecht en De Bilt). De jaargemiddelde temperatuur in 2014 lag rond de 11,7°C. Hoewel recordtemperaturen samenvallen met toevalligheden in de meteorologische situatie, neemt de kans op extreme temperaturen toe door de opwarming van de aarde. De top 10 warmste jaren zijn gemeten in de afgelopen 16 jaar. In 2014 was er een toevallige, overwegend zuidelijke windrichting in het voor- en najaar, die de temperatuur nog hoger deed uitkomen.

Neerslag en vochtigheid

Sinds 1901 is de gemiddelde neerslag boven land op de gematigde breedten van het noordelijk halfrond toegenomen (figuur 1.3). Waarschijnlijk heeft de mens bijgedragen aan deze toename sinds 1950. Mondiaal is de hoeveelheid waterdamp in de lucht sinds de jaren zeventig toegenomen, doordat warmere lucht meer vocht kan bevatten.

Tussen 1910 en 2013 nam de jaarlijkse neerslag in Nederland met 26 procent toe. Het grootste deel van deze toename komt voor rekening van de periode na 1951. Alle seizoenen behalve de zomer zijn natter geworden. Sinds 1951 nam in Nederland het aantal dagen per jaar met ten minste 10 millimeter neerslag in de winter of ten minste 20 millimeter neerslag in de zomer toe. Gemiddeld overschrijdt de neerslag deze drempelwaarden overal in Nederland enkele keren per jaar. In de kustgebieden was de toename van deze gematigde extremen het grootst. Het totale aantal dagen met meer dan 0,1 millimeter neerslag, zogeheten 'natte dagen' of 'regendagen', veranderde niet.

De aanwezigheid van meer waterdamp heeft een nog groter effect op zware buien. Uit waarnemingen blijkt dat bij de meest extreme buien per graad opwarming de hoeveelheid neerslag per uur toeneemt met ongeveer 12 procent.

Wind

In de jaren 1950-1990 is op de gematigde breedten van het noordelijk halfrond de sterkte van de westenwinden toegenomen. Deze toename is grotendeels tenietgedaan door recente afnamen. De stormbanen, waarlangs stormen zich ontwikkelen en voortbewegen, zijn sinds de jaren zeventig naar het noorden verschoven. De jaar-tot-jaarvariaties zijn echter groot.

Op basis van luchtdrukmetingen is geconstateerd dat er aan het begin en aan het einde van de twintigste eeuw meer stormen boven het Noordzeegebied waren. Halverwege de eeuw en in recente jaren is het aantal stormen afgenomen. Boven land zien we sinds de jaren zestig een gestage afname van de windsnelheid en het aantal stormen. Dit lijkt voornamelijk vooral een gevolg van de toenemende bebouwing in Nederland. Hoe meer bebouwing, hoe ruwer het landoppervlak en hoe meer de wind wordt afgeremd. Langs de kust daalt de gemeten windsnelheid sinds de jaren zestig niet.

Oceaan

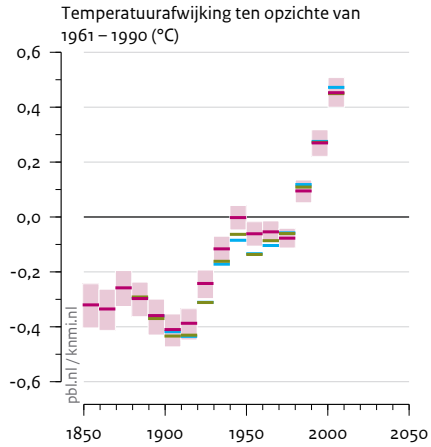
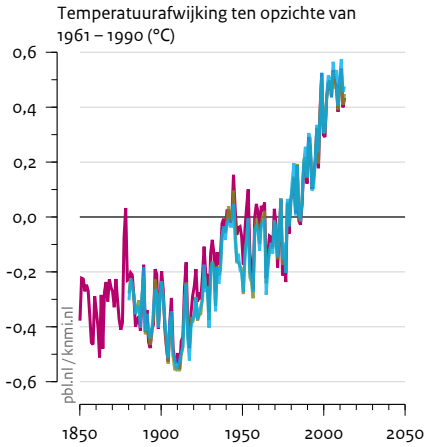
De oceaan heeft meer dan 90 procent opgeslagen van de extra warmte die het klimaatstelsel tussen 1971 en 2010 in totaal heeft opgenomen. In deze periode is het bovenste deel van de oceaan (0-700 meter) opgewarmd (figuur 1.4). Ongeveer 30 procent van de extra opgenomen warmte is gaan zitten in de diepere oceaan, tussen 700 en 2.000 meter. Hoeveel warmte zich heeft opgehoopt onder de 2.000 meter, is niet met zekerheid te zeggen omdat er te weinig metingen beschikbaar zijn.

Figuur 1.2

Waargenomen mondiaal gemiddelde gecombineerde land- en zeetemperaturen

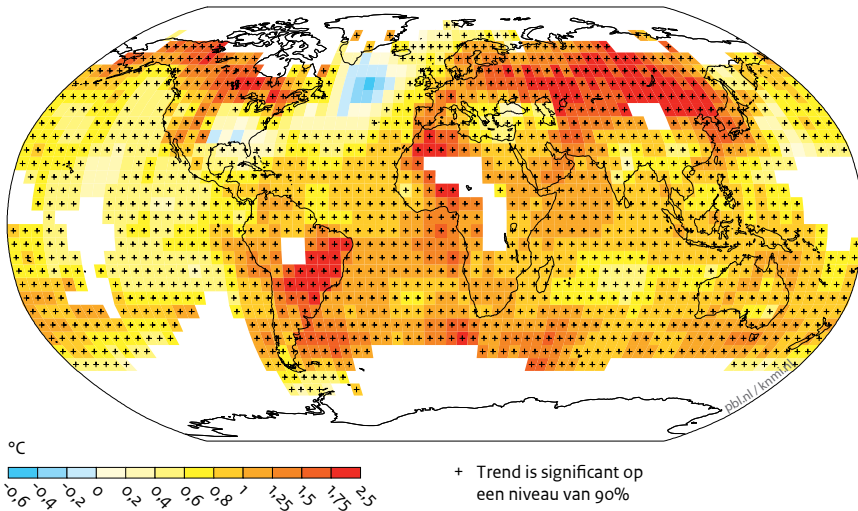
Jaargemiddelde

Tienjarig gemiddelde



- Datasets
- HadCRUT4
 - MLOST
 - GISS
- Schatting van onzekerheid
- HadCRUT4

Waargenomen temperatuurverandering, 1901 - 2012



Bron: IPCC WGI 2013

Ijs

In de afgelopen twee decennia zijn de ijskappen van Groenland en Antarctica kleiner geworden. Bovendien zijn de gletsjers wereldwijd verder gekrompen, en zijn in de zomer het oppervlak van zeeijs in het Noordpoolgebied en in de lente het oppervlak van sneeuw op het noordelijk halfrond verder afgenomen (figuur 1.4).

Zeespiegel

Het tempo van de zeespiegelstijging is sinds het midden van de negentiende eeuw hoger dan gemiddeld in de afgelopen 2.000 jaar. Mondiaal is de zeespiegel tussen 1901 en 2010 gestegen met 17 tot 21 centimeter (figuur 1.4). Het gemiddelde tempo van de zeespiegelstijging over die periode bedroeg 1,5 tot 1,9 millimeter per jaar. De zeespiegel stijgt de laatste jaren sneller: satellietmetingen laten tussen 1993 en 2010 een wereldgemiddelde zeespiegelstijging zien van 2,8 tot 3,6 millimeter per jaar. Deze periode is relatief kort. Omdat er ook natuurlijke schommelingen in het zeeniveau optreden, is niet met zekerheid vast te stellen of hier sprake is van een aanhoudende versnelling.

De zeespiegel aan de Nederlandse kust stijgt sinds 1900 met een tempo van ongeveer 2 millimeter per jaar. Voor de Noordzee is geen duidelijke versnelling zichtbaar in het tempo van stijging, zoals die wel zichtbaar is in het wereldgemiddelde. Dit verschil wordt veroorzaakt door de grote variaties van jaar tot jaar, die samenhangen met variaties in wind.

1.1 Is de opwarming van de aarde gestopt?

Sinds 1998 is de wereldgemiddelde temperatuurstijging veel kleiner dan in de decennia ervoor. Deze trendbreuk wordt ook wel pauze genoemd. Het is echter niet zo dat de opwarming is gestopt. Uit metingen blijkt dat dergelijke periodes zich vaker hebben voorgedaan. Volgens het vijfde assessment-rapport van het IPCC deden zich in deze periode enkele natuurlijke invloeden op het klimaat voor die het opwarmende effect door de toename van broeikasgassen voor het grootste deel hebben gecompenseerd. Omdat deze natuurlijke invloeden tijdelijk zijn, is het onwaarschijnlijk dat de opwarming ook op langere termijn langzamer zal blijven verlopen.

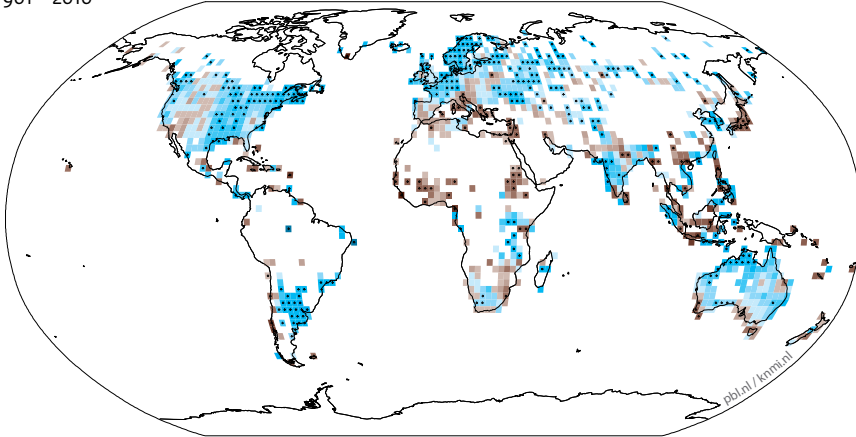
De temperatuurtrend over het tijdvak 1998-2012 is ongeveer één derde van de trend over het tijdvak 1979-2012 (figuur 1.2). Wel is de onzekerheid in de trend groter naarmate het tijdvak korter is. Bij een korte periode heeft de keuze van het

- ◀ Boven: verandering van de waargenomen mondiaal gemiddelde gecombineerde land- en zeewatertemperatuur tussen 1850 en 2012 volgens drie datasets. Linker paneel: jaargemiddelde waarden. Rechter paneel: gemiddelde waarden over tien jaar, inclusief een schatting van de onzekerheid voor de eerste dataset. Het gemiddelde voor de periode 1961-1990 is gekozen als nulpunt. Onder: kaart van de waargenomen veranderingen in oppervlakte-temperatuur in de periode 1901-2012. De trends zijn berekend waar voldoende data beschikbaar zijn om een betrouwbare schatting (+) te kunnen maken. In de gekleurde gebieden zonder + zijn de trends onzeker. Gebieden waarvoor sinds 1901 onvoldoende metingen beschikbaar zijn, zijn wit.

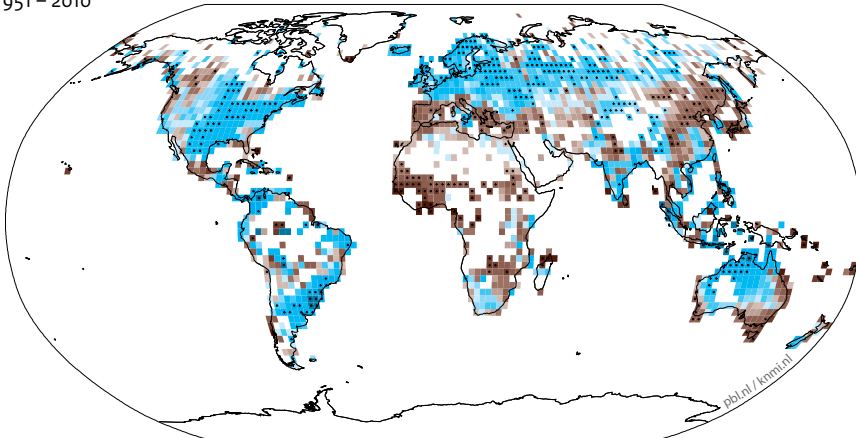
Figuur 1.3

Waargenomen veranderingen in de jaarlijkse neerslag boven land

1901 – 2010



1951 – 2010



mm/jaar per decennium



-100 -50 -25 -10 -5 -2.5 0 2.5 5 10 25 50 100

+ Trend is significant op een niveau van 90%

Bron: IPCC WGI 2013

Kaarten van de waargenomen veranderingen in de jaarlijkse neerslag in aantal millimeter per jaar per decennium in de periodes 1901-2010 en 1951-2010 (bij het berekenen van de trends zijn dezelfde criteria gebruikt als bij figuur 1.2).

begin- en eindpunt van de reeks een grote invloed. Beginnen met een warm jaar, zoals 1998, geeft een heel ander resultaat dan beginnen met een koud jaar, zoals 1996; dit effect wordt sterker naarmate het tijdvak korter is.

Wat betreft de opgetreden stagnatie in de temperatuurstijging zijn wetenschappelijk gezien twee vragen interessant: (1) hoe verhouden de natuurlijke en menselijke invloeden op de mondiaal gemiddelde temperatuur zich tot elkaar?, en (2) in hoeverre zijn klimaatmodellen in staat om stagnaties en versnellingen in de trend te reproduceren?

Natuurlijke factoren versus menselijke invloed

Bij de natuurlijke invloeden onderscheiden we toevallige fluctuaties (interne variabiliteit) en natuurlijke verstoringen van de energiehuishouding (stralingsforcering). Een typische interne variabiliteit op een tijdschaal van enkele jaren is El Niño – Southern Oscillation (ENSO), een fenomeen waarbij de zeewatertemperatuur in een groot gebied van de Grote Oceaan ten westen van Peru abnormaal hoog is en de luchtcirculatie rond de evenaar tussen Indonesië en het Amerikaanse continent beïnvloedt. El Niño doet zich onregelmatig voor, maar gemiddeld eens in de drie à zeven jaar.

Tijdens een El Niño is de wereldgemiddelde temperatuur van de atmosfeer hoger, terwijl die van het oceaانwater lager is. Met andere woorden, er wordt meer energie naar de ruimte uitgezonden en minder energie opgeslagen in de oceanen. De tegenfase van El Niño, La Niña, tempert juist de gemiddelde temperatuur van de atmosfeer. In 1998 was er bijvoorbeeld een sterke El Niño, waardoor dit jaar de boeken in ging als een warmterecord in de reeks van instrumentele metingen. Natuurlijke verstoringen op de energiehuishouding zijn bijvoorbeeld veranderingen in zonneactiviteit en in de hoeveelheid aërosolen (stofdeeltjes) door vulkaanuitbarstingen.

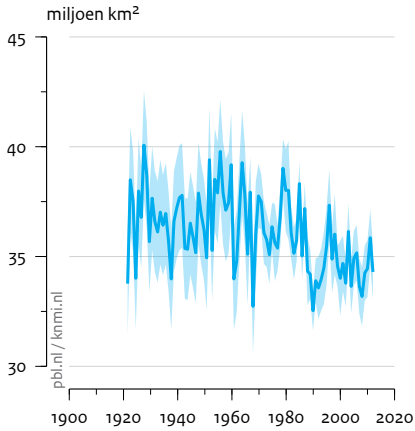
Op grond van een groot aantal studies concludeert het IPCC dat de waargenomen pauze grofweg voor de helft kan worden toegeschreven aan koeling door toevallige natuurlijke fluctuaties (interne variabiliteit). Dit betreft met name een veelvuldig optreden van La Niña's in het laatste decennium. Hierbij is energie vooral opgeslagen in de oceaan, hetgeen consistent is met de oceaanmetingen, en is deze minder uitgezonden naar het heelal.

Voor de andere helft is de tempering in de temperatuurstijging veroorzaakt doordat de zon sinds het laatste maximum van de zonneactiviteit in 2001 uitzonderlijk rustig was, waarschijnlijk in combinatie met een hogere hoeveelheid aërosolen door veel kleine vulkaanuitbarstingen. Mogelijk heeft ook een hogere concentratie aërosolen door menselijke activiteiten in China en India, zoals met satellieten gemeten, de temperatuurstijging door de toename van broeikasgassen helpen maskeren.

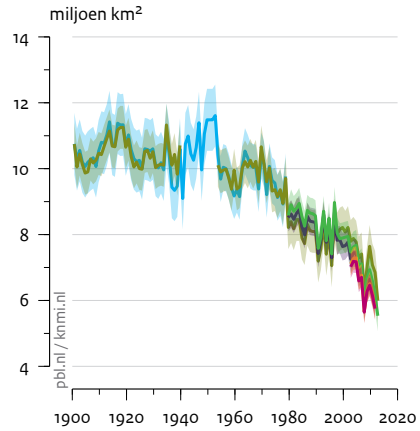
Figuur 1.4

Waargenomen indicatoren van opwarmend klimaat

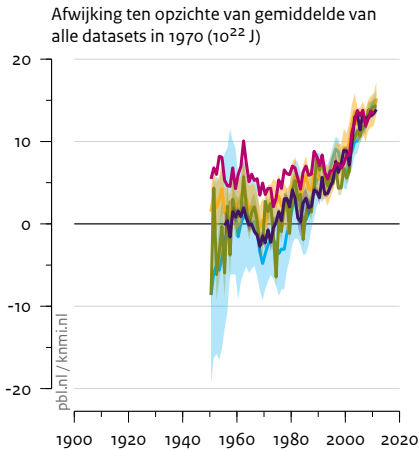
Sneeuwoppervlakte op noordelijk halfrond
in maart – april (lente)



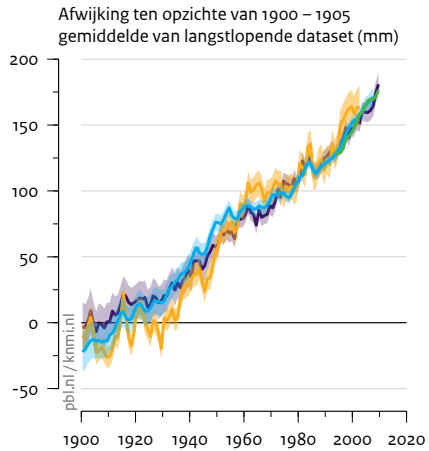
Zeeijsoppervlakte in Noordpoolgebied in juli –
augustus – september (zomer)



Verandering in gemiddelde hoeveelheid warmte
mondiaal in bovenste laag van oceaan



Verandering van gemiddelde zeespiegel
mondiaal



Datasets

- Gemiddelde
- Schatting van onzekerheid

Bron: IPCC WGI 2013

Het reproduceren van stagnaties en versnellingen door klimaatmodellen

Het IPCC stelt dat de klimaatmodellen de waargenomen patronen van de jaarlijks gemiddelde oppervlaktetemperaturen sinds het midden van de vorige eeuw goed reproduceren. Deze patronen zijn de snelle opwarming in de tweede helft van de twintigste eeuw en de tijdelijke afkoeling na sterke vulkaanuitbarstingen. De meeste modellen simuleren echter niet de waargenomen tempering in de opwarming gedurende het tijdvak van de pauze.

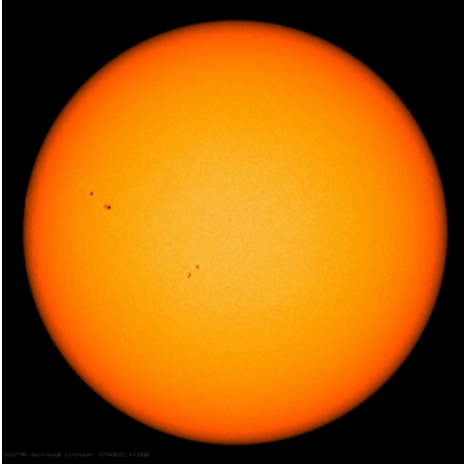
Volgens het IPCC is het verschil tussen modellen en waarnemingen over de periode 1998-2012 voor grofweg de helft het gevolg van toevallige fluctuaties (interne variabiliteit). Daarnaast is er een discrepantie tussen de daadwerkelijk opgetreden forceringen en de forcering die in de modellen is gebruikt, zoals variaties in zonneactiviteit en in de hoeveelheid aërosolen door vulkaanuitbarstingen. Ten slotte zijn mogelijk systematische tekortkomingen van modellen deels de oorzaak van de discrepantie.

Maar wanneer klimaatmodellen worden vergeleken met de gemeten temperatuurtrends van alle mogelijke 15-jaarperiodes sinds 1900, laten de modellen evenveel over- als onderschatting zien. Gemiddeld genomen komen modellen dus goed overeen met de metingen. De afwijkingen kunnen worden verklaard door het onvoorspelbare karakter van natuurlijke factoren en de onzekerheid in de terugkoppeling in het klimaatsysteem (Marotzke & Forster 2015).

Onvoorspelbaar karakter van natuurlijke factoren

Het is bekend dat waargenomen trends gedurende jaren tot decennia kunnen worden gedomineerd door onvoorspelbare natuurlijke fluctuaties. Ook klimaatmodellen laten episoden zien van stagnatie of juist versnellingen in de temperatuurontwikkeling. Door het onvoorspelbare karakter van de interne variabiliteit valt de timing in de modelsimulaties niet samen met de werkelijk opgetreden variaties. Anders gezegd: de natuurkundige processen die in de klimaatmodellen zijn ingebouwd, genereren een interne variabiliteit die vergelijkbaar is met de waargenomen variabiliteit. Door een groot aantal simulaties (met dezelfde forceringen) te maken ontstaat een band van mogelijke ontwikkelingen in de tijd. De natuurlijke realisatie valt binnen deze bandbreedte. Daarnaast zijn ook de natuurlijke forceringen zoals zonneactiviteit en vulkaanuitbarstingen onvoorspelbaar.

- ◀ *Verscheidene waargenomen indicatoren van een veranderend mondiaal klimaat: (linksboven) de gemiddelde sneeuwoppervlakte op het noordelijk halfrond in maart-april, (rechtsboven) de gemiddelde zeeijsoppervlakte in het Noordpoolgebied in juli-augustus-september, (linksonder) verandering in de mondiaal gemiddelde hoeveelheid warmte in de bovenste laag van de oceaan, ten opzichte van het gemiddelde van alle datasets voor 1970, (rechtsonder) mondiaal gemiddelde zeespiegel, afwijking ten opzichte van het gemiddelde voor 1900-1905 van de langstlopende dataset. Alle tijdreeksen (gekleurde lijnen corresponderen met verschillende datasets) tonen jaarlijkse waarden, en waar beschikbaar zijn de onzekerheden aangegeven met gekleurde banden.*



Een uitzonderlijk rustige zon – een recente fluctuatie die ontbreekt in de modellen – heeft bijgedragen aan de huidige tempering van de opwarming van de aarde. Het is onwaarschijnlijk dat de opwarming ook op langere termijn langzamer zal verlopen.

Natuurlijke invloeden achteraf verdisconteren in de waarnemingen

Hoewel onvoorspelbaar is wanneer een aantal natuurlijke invloeden zal optreden, kunnen de effecten

hervan op de wereldgemiddelde temperatuur wel achteraf worden bepaald. Zo kennen we grofweg de effecten van veranderingen in zonneactiviteit, van de hoeveelheid aerosolen afkomstig van vulkanen, en van El Niño's/La Niña's op de jaarlijks gemiddelde temperatuur. Dan blijkt dat zonder deze natuurlijke invloeden de temperatuur in de laatste veertien jaar geen afvlakking meer zou hebben vertoond. De trend van temperatuurstijging sinds 1979 zou dan vrij constant zijn geweest: in de orde van $0,17^{\circ}\text{C}$ per decennium voor de reeksen die zijn gebaseerd op temperatuurmetingen aan het oppervlak en iets lager, en rond de $0,15^{\circ}\text{C}$ per decennium voor de meest gebruikte satellietreeksen. Dergelijke temperatuurtrends stroken met de inzichten over de opwarming door stijgende concentraties broeikasgassen.

1.2 Hoe groot is de bijdrage van de mens?

Het is uiterst waarschijnlijk dat de mens de belangrijkste oorzaak is van de waargenomen opwarming sinds het midden van de twintigste eeuw. Dat andere factoren dan de mens verantwoordelijk zijn voor de opwarming vindt de IPCC in het vijfde assessment-rapport nog minder waarschijnlijk dan in het rapport uit 2007.

Dit concludeert het IPCC op basis van onderzoek met waarnemingen en met modellen van de verandering in de temperatuur, terugkoppelingen in het klimaat en veranderingen in het energiebudget van de aarde. Het gaat hierbij om de in- en uitgaande energie in de vorm van (infrarode en zonne)straling en om de warmteopslag in het klimaatsysteem.

De menselijke invloed uit zich vooral in twee ontwikkelingen: de opwarmende werking door de toename van broeikasgassen, die redelijk nauwkeurig bekend is, en de koelende werking van aerosolen, die veel onzekerder is. Zeker is dat de opwarming door broeikasgassen sterker is dan de koelende werking door aerosolen.

Door de toename van de concentratie van broeikasgassen raakt de aarde de energie die zij ontvangt van de zon, minder gemakkelijk kwijt. Het aardoppervlak wordt daardoor warmer, totdat er een nieuw evenwicht is ontstaan tussen inkomende zonnearmte en uitgaande infrarode straling. Hogere concentraties van broeikasgassen gaan daarom gepaard met hogere temperaturen van het aardoppervlak. Omdat het vele tientallen jaren kost om een nieuw evenwicht te bereiken, loopt de opwarming van de aarde achter bij de toename van de concentratie van broeikasgassen. Zo'n verandering in de energiebalans van het klimaatstelsel heet stralingsforcering (zie kader 1.2). Van alle door de mens uitgestoten broeikasgassen levert de stijging van het CO₂-gehalte in de atmosfeer de grootste bijdrage aan de stralingsforcering.

Een toename van aerosolen veroorzaakt in het algemeen meer terugkaatsing van de zonnestraling. Dit *directe effect* van aerosolen leidt tot een verhoogde afgifte van energie naar het heelal. Meer aerosolen in de atmosfeer veranderen ook de wolkeigenschappen: dit zijn de *indirecte effecten* van aerosolen. Beide effecten werken koelend, maar in welke mate is onzeker.

De invloed van natuurlijke factoren op de energiebalans, zoals variaties in zonneactiviteit en vulkaanuitbarstingen, is op een tijdschaal van tientallen jaren klein ten opzichte van de menselijke invloed. Op kortere tijdschalen kunnen natuurlijke factoren de energiebalans wel beïnvloeden. Zo is de zon sinds 2001 beduidend rustiger geworden. Dit kenmerkt zich in kleinere aantallen zonnevlekken. Omdat een inactieve zon minder energie uitstraalt, heeft dit een licht afkoelende werking veroorzaakt. Vulkaanuitbarstingen brengen aerosolen in de atmosfeer. Wanneer de uitbarstingen krachtig genoeg zijn en wanneer de vulkanen zich in de tropen bevinden, worden aerosolen hoog de atmosfeer in geblazen en verspreiden ze zich over de gehele wereld. Dit heeft meer reflectie van zonlicht tot gevolg en werkt dus koelend. De laatste zeer krachtige uitbarsting was die van de Pinatubo in 1991.

Naast de factoren die rechtstreeks inwerken op de energiebalans (stralingsforcering), zijn er tal van toevallige natuurlijke fluctuaties van de wereldgemiddelde temperatuur. Deze variaties zijn het gevolg van de chaotische wisselwerking tussen atmosfeer, land, ijs en oceanen. Dit heet de interne variabiliteit. Het is bekend dat temperatuurtrends die het gevolg zijn van een toenemende stralingsforcering, zoals bij de stijgende concentraties broeikasgassen, gedurende jaren tot decennia kunnen worden gedomineerd door toevallige natuurlijke fluctuaties (zie kader 'Is de opwarming van de aarde gestopt?'). Op de lange termijn speelt de interne variabiliteit een relatief kleine rol in de wereldgemiddelde temperatuur.

Voor een beperkt gebied, bijvoorbeeld ter grootte van Nederland, zijn de natuurlijke variaties veel groter dan voor de aarde als geheel. Immers, bij de aarde als geheel worden de lokale (van nature aanwezige) schommelingen uitgemiddeld. Zo gaat een langere periode met relatief veel westenwind gepaard met zachtere winters in Nederland, omdat het zeewater minder snel afkoelt dan het continent ten oosten van Nederland.

Menselijke invloed in de opwarming

Uit onderzoek is gebleken dat de invloed van de mens is terug te vinden in de waargenomen opwarming van de atmosfeer en de oceaan (figuur 1.5), in veranderingen in de mondiale waterkringloop, in de afname van sneeuw en ijs, in de mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging, en in veranderingen in sommige klimaatextremen. De duidelijkheid over de menselijke invloed is toegenomen sinds het verschijnen van het vorige IPCC-rapport in 2007. Het is uiterst waarschijnlijk (meer dan 95 procent kans) dat de invloed van de mens de belangrijkste oorzaak is van de waargenomen opwarming sinds het midden van de twintigste eeuw.

Sinds het IPCC-rapport uit 2007 zijn de klimaatmodellen verbeterd. Deze modellen reproduceren de waargenomen patronen in de oppervlaktetemperatuur en de trends daarin gedurende vele decennia, inclusief de snellere opwarming sinds het midden van de twintigste eeuw en de afkoeling direct na grote vulkaanuitbarstingen.

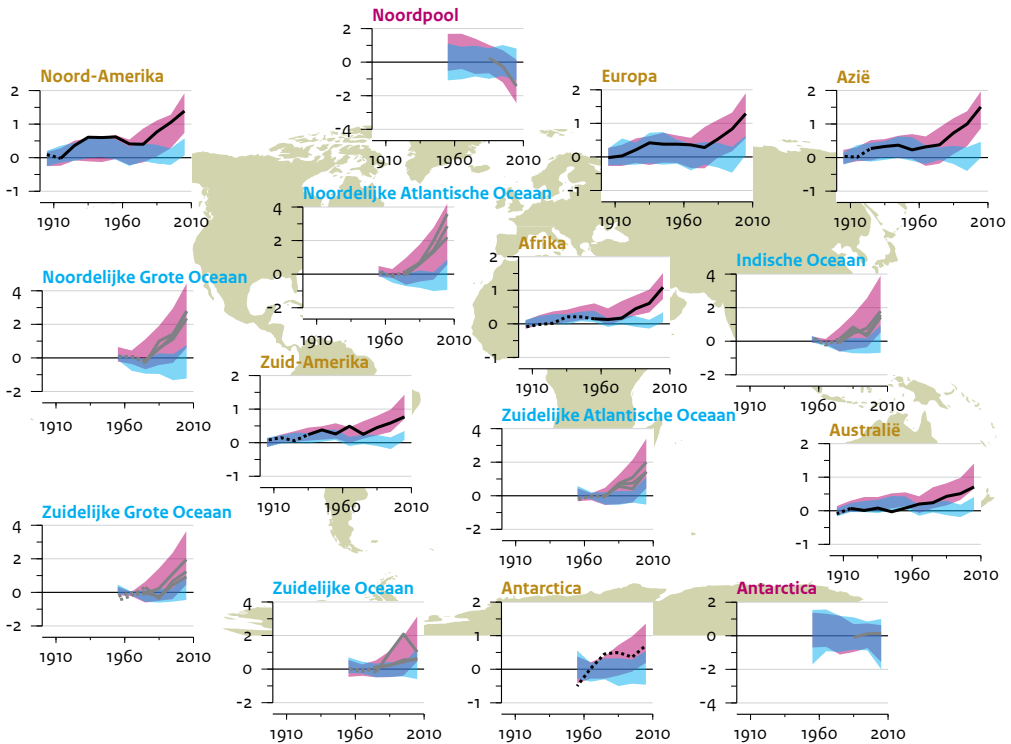
1.2 Stralingsforcering

De sterkte van de oorzaken van veranderingen in de energiebalans wordt gekwantificeerd als stralingsforcering (*Effective Radiative Forcing*, ERF) in eenheden van watt per vierkante meter (W/m^2). De toename in de concentraties broeikasgassen door menselijke activiteiten leidt tot een toename van de stralingsforcering, omdat hierdoor minder infrarode straling de aardatmosfeer verlaat. Over het tijdvak 1998-2011 wordt deze toename geschat op 0,5 watt per vierkante meter.

De totale stralingsforcering sinds het begin van de Industriële Revolutie rond 1750 is berekend op 1,1 à 3,3 watt per vierkante meter, met een beste schatting van 2,3 watt per vierkante meter (figuur 1.6). Een positieve stralingsforcering leidt tot een netto-opname van energie door het klimaatsysteem, zoals ook is gemeten. De grote bandbreedte wordt voornamelijk veroorzaakt door de onzekerheid in het effect van aerosolen. De stijging van de zonneactiviteit sinds 1750 geeft een stralingsforcering van 0-0,10 watt per vierkante meter en is dus aanzienlijk kleiner dan de menselijke invloed.

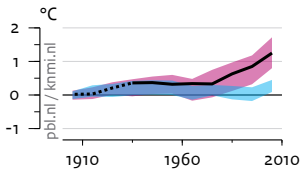
Vergelijking van waargenomen en gemodelleerde klimaatverandering voor drie grootschalige indicatoren in de atmosfeer, de cryosfeer en de oceaan. Mondiaal gemiddelde veranderingen zijn ook weergegeven. Alle tijdreeksen zijn gemiddelden, weergegeven voor het midden van de periode van tien jaar. Modelresultaten zijn weergegeven als gemiddelden over tien jaar van de klimaatmodellen, waarbij de gekleurde band het 5-95 procent betrouwbaarheidsinterval weergeeft. De blauwe lijn geeft de gemodelleerde klimaatverandering door natuurlijke oorzaken weer, de roze lijn die door natuurlijke plus menselijke oorzaken. Afwijkingen in de oppervlaktetemperatuur zijn weergegeven ten opzichte van het gemiddelde over het tijdvak 1880-1919, in de warmteopname van oceanen ten opzichte van 1960-1980 en in zeeijs ten opzichte van 1979-1999.

Figuur 1.5
Vergelijking van waargenomen en gemodelleerde klimaatverandering

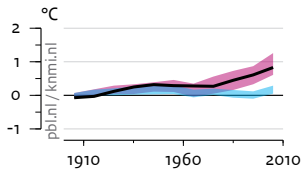


Mondiaal gemiddelde temperatuur en warmte

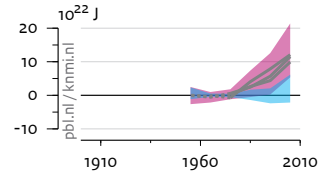
Temperatuurverandering van landoppervlakte



Temperatuurverandering van land- en oceaanooppervlakte



Opgenomen warmte in oceanen



Beschikbaarheid van metingen van temperatuur (gemiddelde over periode van 10 jaar)
 — In meer dan 50% van beschouwde gebieden
 In minder dan 50% van beschouwde gebieden

Beschikbaarheid van metingen van zeeijs en warmte-opname door oceaan (gemiddelde over periode van 10 jaar)
 — Goed Redelijk

Bruin Temperatuurverandering boven land nabij aardoppervlakte (°C)
Violet Zeeijsoppervlakte in poolgebieden (miljoen km²)
Blauw Opname van warmte voor bovenste deel van oceaan (10²² J)

Schatting van onzekerheid (gemiddelde van klimaatmodellen)
 [Light Blue Box] Klimaatverandering door natuurlijke oorzaken
 [Pink Box] Klimaatverandering door natuurlijke en menselijke oorzaken

Bron: IPCC WGI 2013

1.3 Wat kunnen we nog verwachten?

De aanwezigheid van meer broeikasgassen leidt tot meer opwarming en tot veranderingen in alle delen van het klimaatstelsel. Om de klimaatverandering te beperken, is dan ook een forse vermindering nodig van de mondiale uitstoot van broeikasgassen. De aard en de mate van de klimaatverandering vertonen regionale verschillen.

Voor de mate van klimaatverandering in de komende eeuw (en daarna) is niet alleen de sterkte van de klimaatgevoeligheid van belang (zie kader 1.3), maar ook de verwachte uitstoot van broeikasgassen, aerosolen en veranderingen in het landgebruik. Het IPCC maakt gebruik van vier emissiescenario's, die beleidsopties bevatten voor het terugdringen van broeikasgassen: van helemaal geen beleid (hoge emissiepaden, RCP8.5) tot ambitieus beleid (lage emissiepaden, RCP2.6).

Luchttemperatuur

Door de grote warmtecapaciteit van de oceanen duurt het enkele decennia tot eeuwen voordat de temperatuurstijging door toegenomen concentraties broeikasgassen volledig is doorgewerkt. Het IPCC schat dat rond 2025 de wereldgemiddelde temperatuur 0,3 tot 0,7°C hoger is dan aan het einde van de twintigste eeuw. Ten opzichte van het gemiddelde over het tijdvak 1850-1900 is dit een stijging met 0,9 tot 1,3°C. Deze verwachting is nagenoeg onafhankelijk van de emissiepaden, aangezien deze pas na langere tijd verschillen vertonen. Bovendien wordt een aanzienlijk deel van de opwarming bepaald door de al geëmitteerde broeikasgassen.

In het hoogste emissiescenario (business-as-usual) blijft de uitstoot onverminderd stijgen. Hierdoor is het aan het eind van deze eeuw op aarde tussen de 3,2 en 5,4°C warmer ten opzichte van de periode 1850-1900 (figuur 1.7). In het laagste scenario (zeer sterke emissiereductie) stabiliseert de CO₂-uitstoot in de komende tien jaar door ambitieus beleid, om vervolgens drastisch af te nemen door mondiale maatregelen. In dit scenario is de aarde aan het einde van deze eeuw 0,9 tot 2,3°C warmer. Voor alle scenario's geldt dat, door variabiliteit, op tijdschalen van jaren tot decennia de opwarming fluctuaties zal blijven vertonen en van gebied tot gebied zal verschillen.

Extreme temperaturen

Door de verwachte toename van de gemiddelde temperaturen zullen vaker extreem hoge temperaturen optreden. Zowel de duur als de frequentie van hittegolven zal toenemen. Hoewel de kans op extreme koudeperiodes in de winter blijft bestaan, zullen het aantal en de duur ervan afnemen.

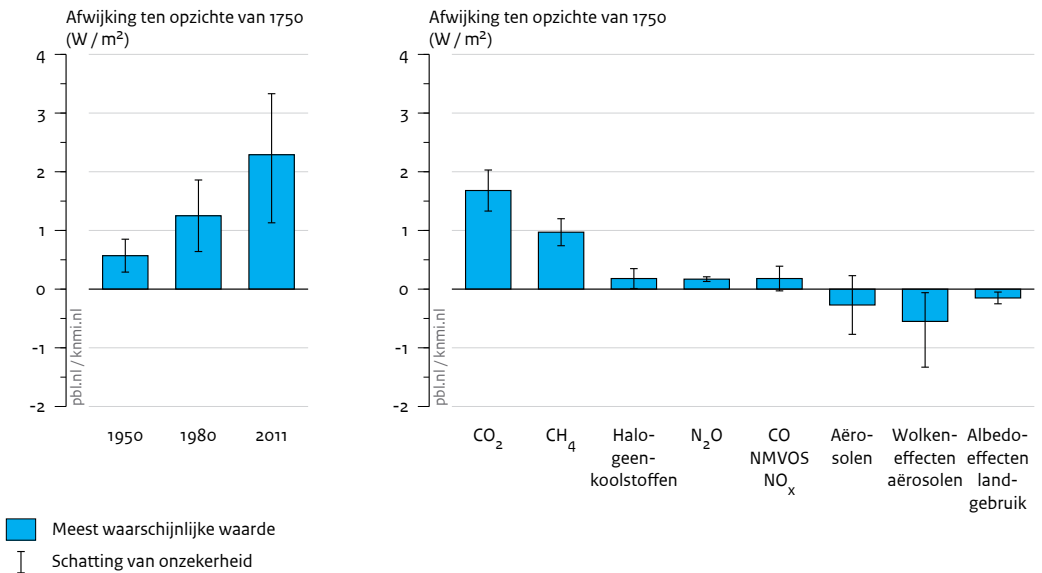
Neerslag

De opwarming van de aarde veroorzaakt mondiale veranderingen in de waterkringloop, maar deze veranderingen verschillen van gebied tot gebied. Natte gebieden worden

Figuur 1.6
Mondiaal gemiddelde stralingsforcering door menselijke activiteiten

Totaal

Bijdrage van belangrijkste factoren, 2011



Bron: IPCC WGI 2013

Links: de mondiaal gemiddelde stralingsforcering in 1950, 1980 en 2011 ten opzichte van 1750 voor de totale menselijke invloed. Rechts: stralingsforcering over de periode 1750-2011 uitgesplitst naar componenten van de menselijke invloed. Onzekerheden zijn weergegeven door middel van 90%-betrouwbaarheidsintervallen.

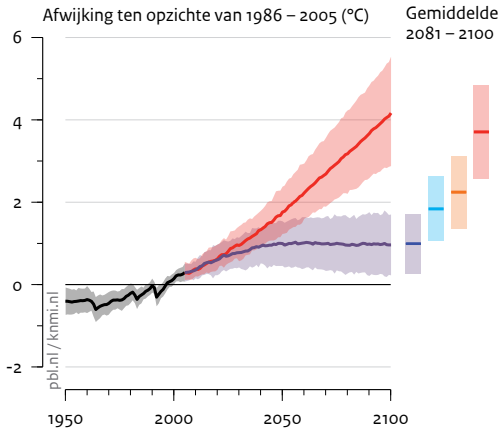
natter, droge worden droger, en het verschil tussen natte en droge seizoenen zal toenemen, hoewel er regionale uitzonderingen kunnen optreden (figuur 1.8).

Oceaan

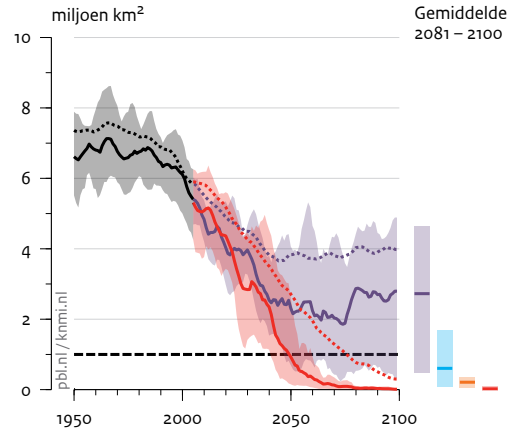
De oceaan zal in de eenentwintigste eeuw mondiaal verder opwarmen. Er zal transport van warmte plaatsvinden van het oppervlak naar de diepe oceaan en dit zal de stromingen in de oceaan beïnvloeden. Door de voortgaande opname van CO_2 zal de zuurgraad van de oceaan verder toenemen (figuur 1.8). Klimaatmodellen laten in de komende decennia afhankelijk van het scenario een afzwakking zien van de warme Golfstroom, maar het is onduidelijk hoe sterk dit effect zal zijn. Een afzwakking heeft tot gevolg dat het klimaat in Noordwest-Europa minder snel opwarmt. Er zijn echter geen tekenen dat we hier te maken krijgen met een kouder klimaat.

Figuur 1.7
Klimaatmodellsimulaties voor verleden en toekomst

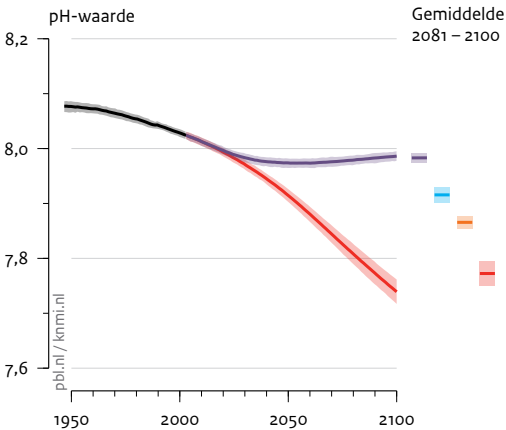
Verandering in mondiaal gemiddelde oppervlaktetemperatuur



Zeeijsoppervlakte op noordelijk halfrond in september



Zuurgraad van oppervlaktewater van oceanen mondiaal



Gemiddelde waarde voor deel van modellen dat waargenomen klimatologische waarde en de 1979 - 2012 trend in Polaire IJszee het beste weergeeft

- Historie
- Hoog emissiepad (RCP 8.5)
- Middel emissiepad (RCP 6.0)
- Middellaag emissiepad (RCP 4.5)
- Laag emissiepad (RCP 2.6)
- Schatting van onzekerheid
- In grafiek met zeeijsoppervlakte
- Gemiddelde waarde van alle modellen
- Bijna-ijsvrije omstandigheden

Bron: IPCC WGI 2013

Linksboven: klimaatmodellsimulaties van tijdreeksen van 1950 tot 2100 van de verandering in de mondiaal gemiddelde oppervlaktetemperatuur, ten opzichte van 1986-2005. Rechtsboven: het zeeijsoppervlak op het noordelijk halfrond in september. Onder: de mondiaal gemiddelde zuurgraad (pH) van het oppervlaktewater. Tijdreeksen van projecties en een maat voor de onzekerheid (gekleurde band) zijn weergegeven voor de verschillende emissiescenario's. De gemiddelde waarde en onzekerheid voor de periode 2081-2100 zijn met verticale kolommen weergegeven voor alle scenario's. Voor zeeijsoppervlak is het gemiddelde van alle modellen weergegeven met een gestippelde lijn. De gestreepte lijn correspondeert met bijna-ijsvrije omstandigheden in september.

Ijs

Door de stijging van de mondiaal gemiddelde temperatuur zullen het oppervlak en de dikte van het zeeijs in het Noordpoolgebied verder afnemen. Bij een business-as-usual-scenario wordt verwacht dat vóór het midden van deze eeuw de Arctische Oceaan in september vrijwel ijsvrij zal zijn (figuur 1.8). Op het noordelijk halfrond zal de sneeuwbedekking in de lente verder afnemen. Het totale volume van gletsjers in de wereld zal verder slinken.

Zeespiegel

In de eenentwintigste eeuw zal de mondiaal gemiddelde zeespiegel verder stijgen (figuur 1.9). In alle onderzochte scenario's zal het tempo van de zeespiegelstijging zeer waarschijnlijk hoger zijn dan het tempo dat in de periode 1971-2010 is waargenomen. Deze versnelling heeft te maken met de toename in de opwarming van de oceaan en de toename van massaverlies door gletsjers en ijskappen.

Tegen het eind van de eenentwintigste eeuw wordt een stijging verwacht van 26 tot 82 centimeter, afhankelijk van emissiescenario en klimaatgevoeligheid. De bovengrens is 20 centimeter hoger dan het IPCC in zijn vorige rapport inschatte, omdat de kennis over ijskappen sterk is verbeterd. De huidige zeespiegelstijging van ongeveer 3 millimeter per jaar is goed te verklaren op basis van de uitzetting van het zeewater, het smelten van de gletsjers, het afkalven van de ijskappen en de veranderingen in grondwater, irrigatie en dammen.

Koolstofcyclus

Veranderingen in de koolstofcyclus door de klimaatverandering zullen de toename van CO₂ in de atmosfeer vergroten. Naarmate de oceaan meer koolstof opneemt, zal deze verder verzuren.

Stabilisatie, langetermijneffecten en onomkeerbaarheid

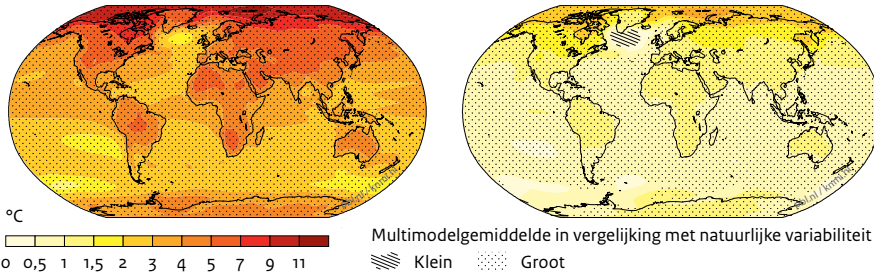
De mondiaal gemiddelde opwarming van het aardoppervlak wordt tegen het einde van de eenentwintigste eeuw en daarna vooral bepaald door de totale uitstoot van CO₂ (figuur 1.10). Daarnaast is ook opwarming te verwachten door andere broeikasgassen, zoals methaan, en door eventuele reductie van de hoeveelheid aerosol in de atmosfeer. De meeste aspecten van de klimaatverandering zullen nog eeuwenlang doorwerken, ook nadat de uitstoot van CO₂ is gestopt. De klimaatverandering door de uitstoot van kooldioxide in het verleden, nu en in de toekomst zal de komende eeuwen ingrijpende effecten hebben op een groot aantal maatschappelijke systemen, zoals de watervoorziening, de landbouw en het wonen en werken in gebieden die beneden of vlak boven de zeespiegel liggen.

Figuur 1.8
Verandering klimaatsysteem onder twee scenario's

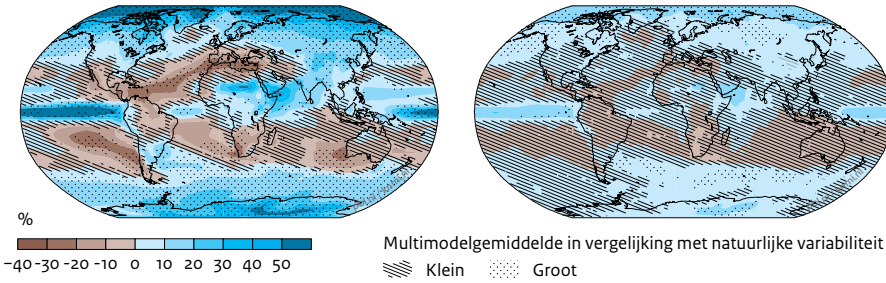
Hoog emissiepad (RCP 8.5)

Laag emissiepad (RCP 2.6)

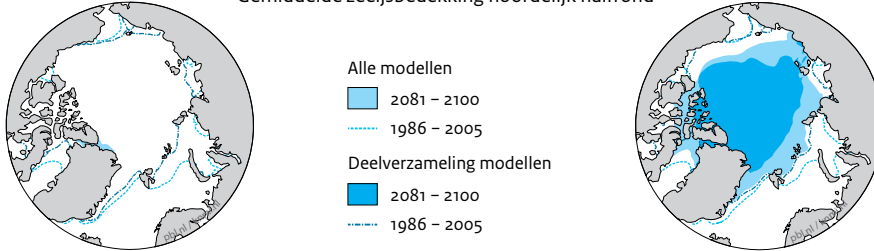
Gemiddelde oppervlaktetemperatuur (1986 – 2005 tot 2081 – 2100)



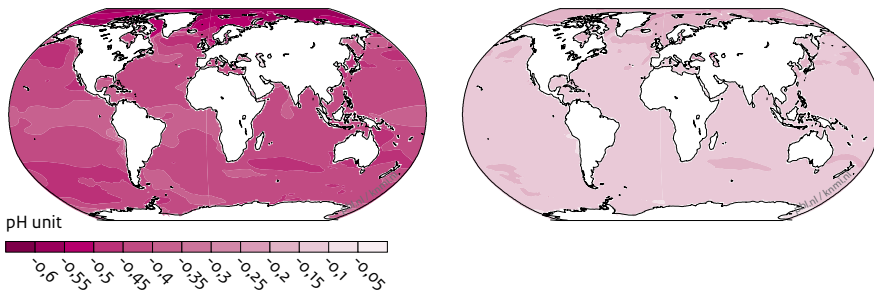
Gemiddelde neerslag (1986 – 2005 tot 2081 – 2100)



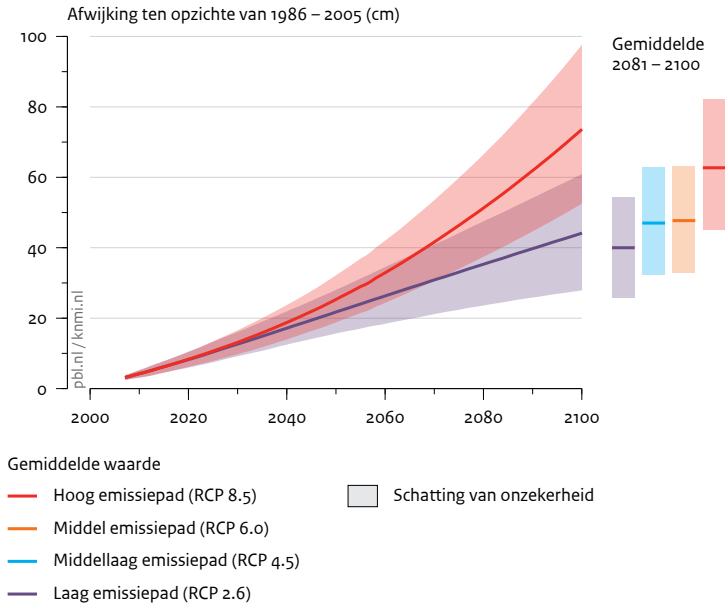
Gemiddelde zeeijsbedekking noordelijk halfrond



Zuurgraad oppervlaktewater oceaan (1986 – 2005 tot 2081 – 2100)



Figuur 1.9
Mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging



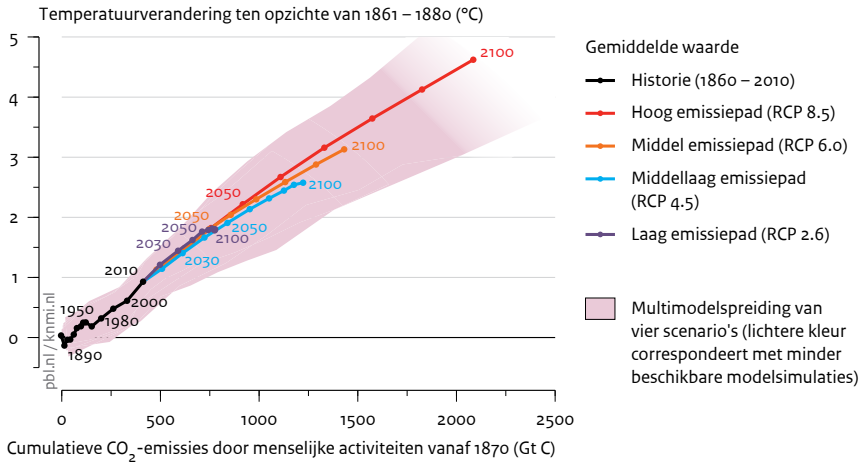
Bron: IPCC WGI 2013

Projecties van de mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging in de eenentwintigste eeuw, ten opzichte van 1986-2005, bepaald uit een combinatie van klimaat- en zeespiegelmodellen, voor het hoge emissiepad RCP 8,5 en het lage emissiepad RCP 2.6. De 17 tot 83 procent bandbreedte is weergegeven met een gekleurde band. De mediane waarden en onzekerheidsmarges voor alle emissiescenario's voor de periode 2081-2100 zijn rechts in de figuur weergegeven.

- Kaarten van klimaatmodelresultaten voor een hoog emissiepad RCP 8,5, respectievelijk laag emissiepad RCP 2,6 in de periode 2081-2100 voor (boven) de verandering in de jaargemiddelde oppervlaktetemperatuur, (midden-boven) de procentuele verandering in de jaargemiddelde neerslag, (midden-onder) het zeeisoppervlak op het noordelijk halfrond in september, (onder) de verandering in de pH aan het zeeoppervlak. De veranderingen in de mondiale kaarten zijn weergegeven ten opzichte van de periode 1986-2005. In de kaart van het noordelijk halfrond (midden-onder) geven de lijnen het gemodelleerde gemiddelde voor 1986-2005 weer; de gevulde oppervlakken gelden voor het einde van de eeuw. Lichtblauw staat voor het gemiddelde van alle modellen, donkerblauw voor het gemiddelde van de modellen die de waargenomen klimatologische waarde en de trend voor de periode 1979-2012 in de Noordelijke IJszee het beste weergegeven.

Figuur 1.10

Verandering van mondiaal gemiddelde temperatuur als functie van totale uitstoot van kooldioxide door menselijke activiteit



Bron: IPCC WGI 2013

Geprojecteerde toename in de mondiaal gemiddelde temperatuur als functie van de totale uitstoot van kooldioxide door de mens. Resultaten voor een groep van klimaat-koolstofcyclusmodellen zijn weergegeven voor vier emissiescenario's met gekleurde lijnen en met punten voor een aantal tienjaargemiddelden. De gegeven waarden zijn ten opzichte van de periode 1861-1880. Hoewel ook andere broeikasgassen – zoals methaan – bijdragen aan de opwarming, geven de emissiescenario's aan dat kooldioxide dominant is.

1.3 Klimaatgevoeligheid

De klimaatgevoeligheid is een belangrijke maat voor de uiteindelijke mondiale temperatuurstijging. Deze maat is gedefinieerd als de verandering van de wereldgemiddelde temperatuur door een verdubbeling van de CO₂-concentratie (wat neerkomt op een stralingsforcering van ongeveer 3,7 watt per vierkante meter). Het maakt voor de wereldgemiddelde temperatuurverandering overigens niet uit wat de oorzaak van de stralingsforcering is. Zou de forcing van 3,7 watt per vierkante meter het gevolg zijn van een verandering van de energieafgifte van de zon, dan brengt deze een nagenoeg gelijke temperatuurstijging teweeg. De sterkte van de klimaatgevoeligheid is afhankelijk van de terugkoppelingen (feedbacks) in het klimaatsysteem. Temperatuurafhankelijke processen kunnen de mondiale temperatuurstijging door stralingsprocessen versterken of verzwakken. Vooral de hydrologische kringlopen zijn sterk afhankelijk van de temperatuur. Zo neemt de hoeveelheid waterdamp toe als het warmer wordt. Waterdamp is een sterk broeikasgas en versterkt dus het initiële effect van een verhoging

van het CO₂-gehalte. Ook neemt in een warmere wereld de ijsbedekking af, en daarmee het reflecterend vermogen van de aarde. Dit impliceert een positieve terugkoppeling. Het is echter niet goed bekend wat de respons van wolken is bij toenemende temperaturen. Klimaatmodellen laten voor wolken een spreiding zien van een neutrale tot een positieve terugkoppeling.

Volgens het laatste IPCC-rapport ligt de klimaatgevoeligheid waarschijnlijk tussen 1,5 en 4,5°C. Dit bereik is sterker onderbouwd dan in het rapport uit 2007. De spreiding geeft aan dat er onzekerheid is over de precieze invloed van de broeikasgassen op de wereldgemiddelde temperatuur, omdat niet zeker is hoe sterk de terugkoppelingen in het klimaatsysteem zijn.

Klimaatgevoeligheid wordt bepaald met behulp van verschillende technieken en bronnen op basis van instrumentele metingen, satellietgegevens, temperatuur van de oceanen, vulkaanuitbarstingen, klimaatveranderingen in het verleden en klimaatmodellen. Bij alle technieken hebben we te maken met specifieke onzekerheden (bijvoorbeeld meetonauwkeurigheid). Het waarschijnlijke bereik van de klimaatgevoeligheid is waar de bandbreedtes van de verschillende methoden overlappen. Nieuwe meetgegevens en nieuw onderzoek sinds het vorige IPCC-rapport waren aanleiding om de ondergrens van de waarschijnlijke bandbreedte van de klimaatgevoeligheid te verlagen van 2,0 naar 1,5°C. Vooral studies die gebruikmaken van temperatuurmetingen van de atmosfeer en de oceaan in de laatste decennia in combinatie met schattingen van de stralingsforcering, laten een lagere klimaatgevoeligheid zien, namelijk van rond de 2°C. Het IPCC plaatst hierbij de kanttekening dat er grote onzekerheid is over de warmteopname door de oceanen en dat toevallige fluctuaties (interne variabiliteit) – zeker op tijdschalen van jaren tot decennia – het moeilijker kunnen maken om de klimaatgevoeligheid te bepalen. Een andere beperkende factor is de onzekerheid in de stralingsforcering door aërosolen. Hierdoor is de klimaatgevoeligheid ook met deze methode (nog) niet nauwkeuriger te bepalen dan de genoemde bandbreedte van 1,5 tot 4,5°C.

1.4 Hoe gaat het klimaat in Nederland veranderen?

Met de KNMI-klimaatscenario's – die op basis van het IPCC-rapport zijn gemaakt – ontstaat het volgende beeld van de toekomstige klimaatverandering in Nederland: Nederland krijgt de komende eeuw te maken met gemiddeld hogere temperaturen, veranderende neerslagpatronen en een stijgende zeespiegel. De kans op hittegolven in de zomer neemt toe en neerslagextremen zullen vaker voorkomen.

Het KNMI heeft vier scenario's ontwikkeld om de toekomstige klimaatverandering in Nederland te bepalen. Elk scenario is aangeduid met een tweelettercombinatie en een kleur, en geeft een samenhangend beeld van de veranderingen voor twaalf klimaatvariabelen, waaronder temperatuur, neerslag, zeespiegel en wind. Deze veranderingen gelden voor het klimaat rond 2050 en 2085 ten opzichte van het klimaat in de periode

1981-2010, een referentieperiode die in kaart is gebracht in de KNMI-klimaatatlas. Hiernaast is een extra scenario ontwikkeld voor 2030, om te kunnen voorzien in meer informatie over de nabije toekomst.

De scenario's beschrijven, volgens de nieuwste inzichten, de hoekpunten van waarschijnlijke veranderingen in het gemiddelde klimaat en in de extremen. Het zijn vier combinaties van twee mogelijke waarden voor de mondiale temperatuurstijging ('gematigd' en 'warm') en twee mogelijke veranderingen van het luchtstromingspatroon ('lage waarde' en 'hoge waarde') (figuur 1.11).

Voor 2030 – iets meer dan vijftien jaar vanaf nu – is de opwarming van de aarde volgens de verschillende uitstootscenario's nog bijna gelijk. Daarom kan worden volstaan met slechts één scenario. De spreiding in de berekeningen voor 2030 is vooral het gevolg van modelonzekerheid en natuurlijke variaties.

De klimaatscenario's zijn bedoeld als instrument om de gevolgen van de klimaatverandering te berekenen en mogelijkheden en strategieën te ontwikkelen voor adaptatie. Ze stellen gebruikers in staat de klimaatverandering te betrekken bij de besluitvorming over een veilig en duurzaam Nederland in de toekomst.

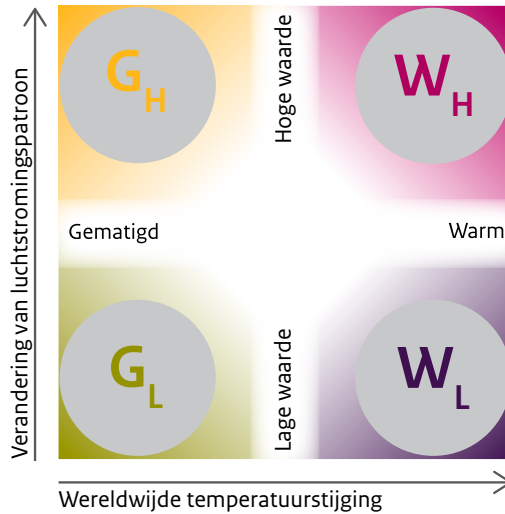
Het KNMI baseert de klimaatscenario's op de recente berekeningen met de mondiale klimaatmodellen voor het IPCC, aangevuld met berekeningen met het klimaatmodel voor Europa van het KNMI. De klimaatscenario's tonen niet alleen de door de mens veroorzaakte klimaatverandering, maar ook de natuurlijke variaties van het klimaat. Natuurlijke variaties zijn bijvoorbeeld de dagelijkse variaties in de temperatuur of het spontaan voorkomen van een periode van langdurige hitte in de zomer. Zulke natuurlijke variaties verklaren waarom niet ieder jaar warmer is dan het jaar ervoor, ook al warmt het klimaat op.

Hoe langer de periode waarvoor een gemiddelde wordt berekend, hoe kleiner de invloed van natuurlijke variaties op dit gemiddelde is. Toch zijn zelfs gemiddelden over dertig jaar – de termijn waarop het klimaat is gedefinieerd – erdoor beïnvloed. Vooral voor neerslag en wind zijn natuurlijke variaties in de gemiddelden over dertig jaar aanzienlijk vergeleken met de veranderingen in de gemiddelden over dertig jaar volgens de klimaatscenario's.

Mondiale temperatuur als scenariokenmerk

De mondiale temperatuurstijging is het eerste kenmerk waarmee de scenario's worden onderscheiden. In de G-scenario's (G = Gematigd) is de mondiale temperatuurstijging 1°C in 2050 en 1,5°C in 2085 (ten opzichte van 1981-2010); in de W-scenario's (W = Warm) is de stijging 2°C in 2050 en 3,5°C in 2085 (ten opzichte van 1981-2010). Binnen deze waarden voor de toekomstige opwarming valt ruwweg 80 procent van de modelberekeningen.

Figuur 1.11
KNMI'14-klimaatscenario's



Bron: KNMI 2014

Omdat de modelberekeningen lopen tot 2100, is de uiterste tijdshorizon voor de KNMI'14-scenario's de periode van dertig jaar rond 2085. Het jaar 2050 is gekozen als eerste tijdshorizon, omdat het ook de eerste tijdshorizon in de KNMI'06-klimaatscenario's was.

Luchtstroming in Nederland als scenariokenmerk

Naast de mondiale temperatuurstijging is ook de verandering van het luchtstromingspatroon van invloed op de klimaatverandering in Nederland. Verandering van het luchtstromingspatroon is daarom gekozen als het tweede kenmerk om de scenario's te onderscheiden. In de lage of L-scenario's (G_L en W_L) is de invloed van deze verandering klein, in de hoge of H-scenario's (G_H en W_H) is de invloed groot.

In de H-scenario's waait het in de winter vaker uit het westen. Ten opzichte van de L-scenario's betekent dit een zachter en natter weertype. In de H-scenario's hebben hogedrukgebieden in de zomer een grotere invloed op het weer. Vergeleken met de L-scenario's zorgen ze voor meer oostenwinden, die in Nederland warmer en droger weer met zich brengen.

Temperatuur

Volgens alle vier de KNMI'14-scenario's zal de temperatuur in Nederland stijgen, jaargemiddeld met 1,0 tot 2,3°C in 2050. Rond 2050 is de gemiddelde toename het grootst in de winter en het kleinst in de lente. In de G_H - en W_H -scenario's is de opwarming in Nederland groter dan het wereldgemiddelde, maar in geen enkel scenario is de opwarming in Nederland twee keer zo groot als het wereldgemiddelde, zoals in de afgelopen decennia het geval was. Natuurlijke variaties kunnen ervoor zorgen dat de trend iets hoger of iets lager uitvalt dan verwacht.

Bovenop deze langetermijnveranderingen en -variaties komen de variaties in de temperatuur van jaar op jaar. Temperatuurverschillen tussen winters onderling nemen iets af doordat de kans op koude winters afneemt. Temperatuurverschillen tussen zomers nemen iets toe doordat de temperatuur in warme zomers het sterkst toeneemt. De maximumtemperatuur stijgt iets minder dan de minimumtemperatuur. Het temperatuurverschil tussen dag en nacht neemt daardoor iets af.

Extremen in temperatuur

Net als in de KNMI'o6-scenario's, is voor de koudste winterdagen en de warmste zomerdagen de opwarming groter dan de seizoensgemiddelde waarde (figuur 1.12). Voor zachte winterdagen en koele zomerdagen is de opwarming echter relatief klein.

Voor de winter betekent dit een aanzienlijke afname in het aantal vorstdagen, dagen met een minimumtemperatuur onder nul. Het aantal ijsdagen, met een maximumtemperatuur onder nul, neemt nog sterker af. In het warmste scenario, W_H , neemt het aantal ijsdagen per winter af van acht in het huidige klimaat tot ongeveer één rond 2050. In het minst warme scenario, G_L , komen nog vier ijsdagen per winter voor.

De zomer krijgt meer tropische nachten, met een minimumtemperatuur van 20°C of hoger, en meer zomerse dagen, met een maximumtemperatuur van 25°C of hoger. Dagelijkse temperatuurrecords zijn nog steeds mogelijk bij alle scenario's, maar wel minder waarschijnlijk voor de koude extremen in de winter dan voor de warme extremen in de zomer.

Neerslag

In alle scenario's neemt de neerslag in alle seizoenen toe, met uitzondering van de zomer. Of de gemiddelde neerslag in de zomer toe- of afneemt is in de modelberekeningen niet eenduidig, en dit is zichtbaar in de scenario's. De resultaten verschillen over hoe het luchtstromingspatroon boven Europa verandert, in welke mate de bodem uitdroogt en wat dit betekent voor de bewolking en de neerslag. Twee scenario's (G_L en W_L) berekenen een kleine toename van de gemiddelde neerslag in de zomer, terwijl de twee andere (G_H en W_H) een aanzienlijke afname laten zien. De afname vindt vooral plaats in zomers die al droog zijn. Dit leidt tot een grotere variatie tussen zomers. De jaarsommen van de neerslag nemen, afhankelijk van het scenario, toe met 2,5 tot 5,5 procent.

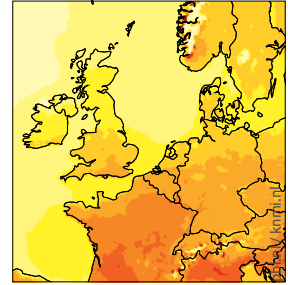
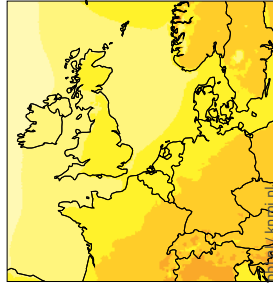
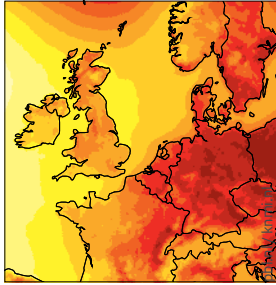
Figuur 1.12

Opwarming bij het W_H -scenario voor 2050 ten opzichte van 1981 – 2010

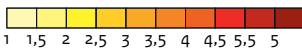
Koudste winterdagen

Jaargemiddelde

Warmste zomerdagen



Opwarming (°C)



Bron: KNMI 2014

Opwarming voor de koudste winterdagen (links) en warmste zomerdagen (rechts) vergeleken met de jaargemiddelde opwarming (midden) bij het W_H -scenario voor 2050 ten opzichte van 1981-2010.

Neerslagextremen

Extreme neerslagintensiteiten nemen in alle scenario's het hele jaar door toe, zelfs in de G_H - en W_H -scenario's, waarin de zomerneerslag afneemt. Dit komt doordat bij een opwarmend klimaat de hoeveelheid waterdamp in de lucht toeneemt.

Neerslagextremen kunnen ontstaan door twee meteorologische verschijnselen, namelijk de passage van fronten die samenhangen met depressies, en buien als gevolg van sterke verticale bewegingen in de atmosfeer. Fronten komen vooral voor in de winter en buien in de zomer, maar vaak treden ze ook tegelijk op. De klimaatmodellen bootsen de fronten goed na. Dat geldt niet voor de kleinschalige buien, die in de zomer neerslagpieken veroorzaken. Deze buien zijn nauwelijks afhankelijk van de verandering van het luchtstromingspatroon, maar vooral van lokale processen. Veranderingen in neerslagextremen in de zomer die samenhangen met buien, zijn daardoor extra onzeker. Daarom wordt bij elk scenario in de zomer zowel een lage als een hoge waarde gegeven. In de scenario's met een droger wordende zomer, G_H en W_H , kan de kans op gematigde extremen, zoals zomerdagen met ten minste 20 millimeter neerslag, zowel toe- als afnemen. Maar de kans op zware extremen neemt bij elk scenario toe, zij het met een grote onzekerheidsband.

Zeespiegel

In de berekening van de zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust (figuur 1.13) is met veel factoren rekening gehouden, waaronder het uitzetten van de oceanen door

opwarming en de veranderingen in het zoutgehalte, en het massaverlies door gletsjers en de ijskappen op Groenland en Antarctica. Ook het zogeheten zelfgravitatie-effect is meegewogen. Dit effect houdt in dat, door de veranderingen in het zwaartekrachtsveld, smeltwater van de ijskappen niet gelijkmatig over de oceanen wordt verdeeld. Bodemdaling, bijvoorbeeld door het inklinken van veen, is niet in de scenario's verwerkt, omdat deze langs de Nederlandse kust sterk varieert en nauwkeurige schattingen voor de toekomst niet voorhanden zijn.

Voor de zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust is de mondiale temperatuurontwikkeling van belang. Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen de L- en H-scenario's, omdat de verandering van het luchtstromingspatroon boven Europa geen dominante invloed heeft op de zeespiegelstijging op de lange termijn. In elk scenario ligt het tempo van zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust rond 2050 en 2085 hoger dan het sinds 1900 waargenomen tempo. Rond 2085 wordt, afhankelijk van de mondiale opwarming, een zeespiegelstijging verwacht tussen de 25 en 80 centimeter.

Wind en storm

Volgens het IPCC zal het aantal stormdepressies op de gematigde breedten hooguit enkele procenten veranderen. Ook bestaat er grote onzekerheid over de mate waarin stormbanen en -depressies boven Europa veranderen.

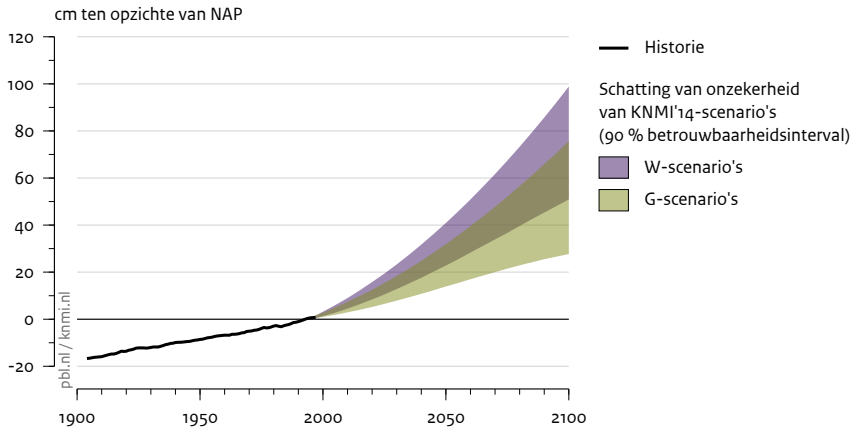
De door de mens veroorzaakte veranderingen van de windsnelheid zijn klein in de KNMI'14-scenario's. Dat gold ook voor de KNMI'06-scenario's. Veranderingen van de gemiddelde windsnelheid door het jaar heen en tijdens stormen in de winter vallen binnen de natuurlijke variabiliteit. In de G_L - en W_L -scenario's is sprake van een kleine afname; in de G_H - en W_H -scenario's liggen de veranderingen dicht bij nul. In de G_H - en W_H -scenario's komen omstandigheden met weinig wind in de zomer vaker voor.

Veranderingen in windrichting

Naast de sterkte is ook de richting van de wind van belang. Zo ontstaan de hoogste waterstanden langs de Nederlandse kust als een noordenwind het Noordzeewater opstuwt. De scenario's laten zien dat de frequentie van sterke noordenwinden in de toekomst niet veel verandert.

Windrichtingen tussen zuid en west, die in het huidige klimaat overheersen, komen in de winter vaker voor bij de G_H - en W_H -scenario's en minder vaak bij de G_L - en W_L -scenario's. Dit stemt overeen met het verschil in de verandering van het luchtstromingspatroon dat de L- en H-scenario's van elkaar onderscheidt. In de zomer nemen windrichtingen tussen zuid en west in alle scenario's af, maar dit gebeurt het meest in de H-scenario's.

Figuur 1.13
Zeespiegel aan Nederlandse kust



Bron: KNMI 2014

Zeespiegel aan de Nederlandse kust zoals waargenomen en volgens de KNMI'14-scenario's. Waarnemingen zijn weergegeven in zwart (gladgestreken curves, omdat zeespiegelstijging een langzaam proces is met een regelmatige stijging), projecties in groen staan voor de G-scenario's en in paars voor de W-scenario's.

Hagel en onweer

In Nederland zullen hagel en onweer in de toekomst heviger worden. Meer waterdamp leidt tot meer condensatiewarmte, waardoor de sterkte van verticale bewegingen in de wolken toeneemt en het vaker onweert en hagelt, met grotere hagelstenen. Per graad opwarming neemt het aantal bliksemslagen bij onweer toe met ongeveer 10 tot 15 procent.

De grootste verandering zit in de W_L - en W_H -scenario's. In 2050 komt extreme hagel in deze scenario's ten minste twee keer zo vaak voor als in de referentieperiode 1981-2010. Deze semi-kwantitatieve schatting is gebaseerd op modelberekeningen en op het verband tussen waterdamp en de verticale windsnelheid.

Droogte

Sinds 1951 komt droogte iets vaker voor in Nederland. Deze trend zet in de toekomst waarschijnlijk door. Indicatoren voor droogte, zoals het neerslagtekort gedurende het groeiseizoen (van 1 april tot en met 30 september), nemen in de G_H - en W_H -scenario's meer toe dan in de G_L - en W_L -scenario's. Dit stemt overeen met de veranderingen in neerslag en verdamping die ten grondslag liggen aan de droogteberekeningen.

1.4 Regionale verschillen in temperatuur en neerslag

De verwachte opwarming in Nederland vertoont regionale verschillen. Deze zijn het grootst voor de extremen in het W_H-scenario. Op de warmste zomerdagen neemt de temperatuur in het zuidoosten van Nederland ongeveer 1°C meer toe dan in het noordwesten (zie figuur 1.12). Regionale temperatuurverschillen tussen kust en binnenland nemen hierdoor toe. Op koude winterdagen is de opwarming in het oosten groter dan in de kustgebieden, waardoor de bestaande regionale verschillen juist afnemen.

Binnen Nederland zullen de verschillen in veranderingen in de neerslag slechts klein zijn. Er zijn wel enkele aanwijzingen dat de kustgebieden en het binnenland in hoeveelheid neerslag gaan verschillen. Zo'n verschil zien we ook in de waarnemingen. Bij een klein aantal modelberekeningen neemt de neerslag in de kustgebieden 5 tot 10 procent meer toe dan in het binnenland. In de meeste modelberekeningen treedt dit zogeheten kusteffect echter niet of nauwelijks op. Het kusteffect hangt sterk af van de wisselwerking tussen de verandering van het luchtstromingspatroon, het temperatuurcontrast tussen land en zee en de stijging van de temperatuur. Het totale effect is zo onzeker dat het niet is meegenomen in de KNMI'14-klimaatscenario's.

IPCC-Werkgroep II

Effecten van klimaatverandering en mogelijkheden voor adaptatie

Samenvatting

De gevolgen van klimaatverandering zijn wereldwijd waarneembaar. Enerzijds zijn deze veranderingen geleidelijk, zoals temperatuurstijging, zeespiegelstijging, stijging van de broeikasgasconcentraties en verzuring van de oceanen, anderzijds zijn ze meer abrupt, door veranderingen in de frequentie en intensiteit van weersextremen, zoals neerslag, droogte en hittegolven. Op het land en in de oceanen verschuiven de verspreidingsgebieden van soorten. Wereldwijd is, mede door klimaatverandering, een vijfde van het koraal afgestorven. Gletsjers nemen in omvang af en het smelten van sneeuw en ijs, evenals veranderingen in de hoeveelheid neerslag en de verdeling daarvan over het jaar beïnvloeden op veel plaatsen de beschikbare hoeveelheid en kwaliteit van zoet water.

De landbouwsector en de voedselproductie ondervinden zowel negatieve als positieve gevolgen van klimaatverandering. De negatieve gevolgen manifesteren zich vooral in de zuidelijke regio's, de positieve gevolgen vooral in gebieden op de hogere breedtegraden. In gebieden waar de droogte toeneemt, zoals in delen van de Verenigde Staten en Zuid-Europa, treden niet alleen oogstverliezen vaker op maar ook omvangrijke bosbranden. Wereldwijd bezien lijken de gevolgen voor de gezondheid van de mens nog beperkt. Maar mede door de intensivering van internationale transporten kunnen de verspreidingspatronen van ziektedragers en plaagorganismen veranderen.

Toename klimaatrisico's, met grote regionale verschillen

De gevolgen van klimaatverandering vertonen grote regionale verschillen in aard en ernst. In gematigde zones, waartoe ook Nederland behoort, vallen de effecten en opgaven vooralsnog mee. Wel kunnen een toename van de zeespiegelstijging, een intensivering van neerslagpieken en een toenemende kans op droge periodes de bestaande watergerelateerde risico's vergroten. In de tropische zones, in Zuid-Europa,

in delen van de Verenigde Staten en in China daarentegen, vormt de aanpassing aan de toenemende hitte en droogte nu al een grote opgave. In de laaggelegen kustgebieden, vooral in Azië, zal het overstromingsrisico voor mensen en hun bezittingen verder toenemen. Dit komt niet alleen door de nog verwachte bevolkingsgroei, de toenemende welvaart en een trek van de bevolking naar de grote steden, maar ook door de zeespiegelstijging en een toename van neerslag.

In tropische gebieden, vooral in Afrika, zal de voedselvoorziening verder onder druk komen te staan. Mondiaal kunnen bij een gematigde temperatuurstijging de landbouwopbrengsten de komende decennia toenemen als er adequate adaptatiemaatregelen worden ingezet. Stijgt de temperatuur wereldwijd echter met zo'n 4°C of meer ten opzichte van het einde van de vorige eeuw en blijft de vraag naar voedsel toenemen, dan komt de mondiale voedselveiligheid ernstig in gevaar.

Klimaatverandering vormt een extra bedreiging voor planten- en diersoorten, naast de verstoring, overexploitatie en vervuiling van habitats, het daar binnendringen van nieuwe soorten en de intensivering van het landgebruik. Als het klimaat snel verandert, zullen veel soorten zich niet snel genoeg kunnen verplaatsen naar andere gebieden met een voor hen gunstig klimaat. Met maatregelen zoals het beperken en tegengaan van de versnippering van leefgebieden, het handhaven van de genetische diversiteit en het door de mens verplaatsen van soorten kunnen de risico's voor de ecosystemen worden verminderd. Er zijn echter geen maatregelen om de effecten van het opwarmen en verzuren van de oceanen tegen te gaan, met negatieve gevolgen voor biodiversiteit, koraalriffen en de visserijsector.

Nederland: toename neerslag en rivierafvoeren, maar ook droogte in de zomer

Ook Nederland is gevoelig voor de effecten van klimaatverandering. Nederland is dichtbevolkt, het grondgebruik is intensief en een groot deel van het landoppervlak kan worden getroffen door overstromingen. Waarschijnlijk nemen in Nederland de hoge rivierafvoeren toe, en worden de lage afvoeren nog lager. De combinatie van vaker voorkomende hoge rivierafvoeren en een stijgende zeespiegel vergroot de uitdaging om het rivierwater veilig naar zee af te voeren. Minder zoet water in de zomer betekent onder meer dat er minder water beschikbaar komt voor de landbouw, dat de waterkwaliteit achteruitgaat en dat verzilting in de kustzones toeneemt. Verder zullen er bij elektriciteitscentrales koelwaterproblemen ontstaan wanneer lage rivierafvoeren samenvallen met hoge watertemperaturen in de zomer.

Een toename in de frequentie en intensiteit van piek- en onweersbuien leidt tot een grotere wateroverlast in het stedelijk en landelijk gebied, en zelfs tot een tijdelijke en lokale uitval van energie- of transportnetwerken. Ook verschuift, zelfs in een klein land als Nederland, het verspreidingsgebied van planten en dieren, en worden hier steeds meer nieuwe zuidelijke soorten aangetroffen. Grote onzekerheden zijn er rond de veranderende risico's in relatie tot het voorkomen van planten- en dierziektes.

Klimaatverandering heeft voor Nederland ook positieve gevolgen: de sterfte van mensen als gevolg van winters weer neemt af. Ook daalt het energieverbruik in de winter. Bovendien bieden de stijgende temperatuur en een langer groeiseizoen mogelijk kansen voor nieuwe landbouwgewassen en ontstaat er een toeristisch aantrekkelijker klimaat.

Adaptatie aan klimaatverandering vraagt maatwerk

De aard en ernst van klimaateffecten zijn sterk geografisch bepaald en er zijn veel verschillende typen maatregelen mogelijk om de kwetsbaarheid voor klimaatverandering te verminderen. Het ontwikkelen van een effectieve adaptatiestrategie is dan ook maatwerk. In een adaptatiestrategie kunnen verschillende typen maatregelen worden ingezet: (1) maatregelen die preventief werken en de effecten van klimaatverandering voorkómen, (2) maatregelen die de gevolgen van klimaatverandering beperken, en (3) maatregelen die het herstel bevorderen als er negatieve effecten zijn opgetreden. Welke maatregelen het beste werken, zal van regio tot regio verschillen en hangt ook af van de sectoren die het betreft. Maatregelen om de waterveiligheid te vergroten (zoals het versterken van dijken, waterrobuust bouwen en het invoeren van waarschuwingssystemen) zijn bijvoorbeeld totaal anders dan die om de gezondheidsrisico's te beperken of maatregelen voor een klimaatbestendige energie-, transport- of landbouwsector.

In toenemende mate worden, naast de nationale overheden, de lokale overheden en de private sector gezien als partijen die cruciaal zijn bij het realiseren van klimaatadaptatie. Sinds het vorige IPCC-rapport (2007) zijn deze partijen actiever geworden als het erom gaat strategieën voor adaptatie te ontwikkelen. Dit geldt voor steden en regionale overheden maar ook voor het internationaal opererende bedrijfsleven. Nationale overheden kunnen hierbij sturen en faciliteren, bijvoorbeeld met beleidskaders en wetgeving, informatievoorziening, financiële ondersteuning van onderzoeks- en innovatieprogramma's en aandacht voor specifiek kwetsbare groepen.

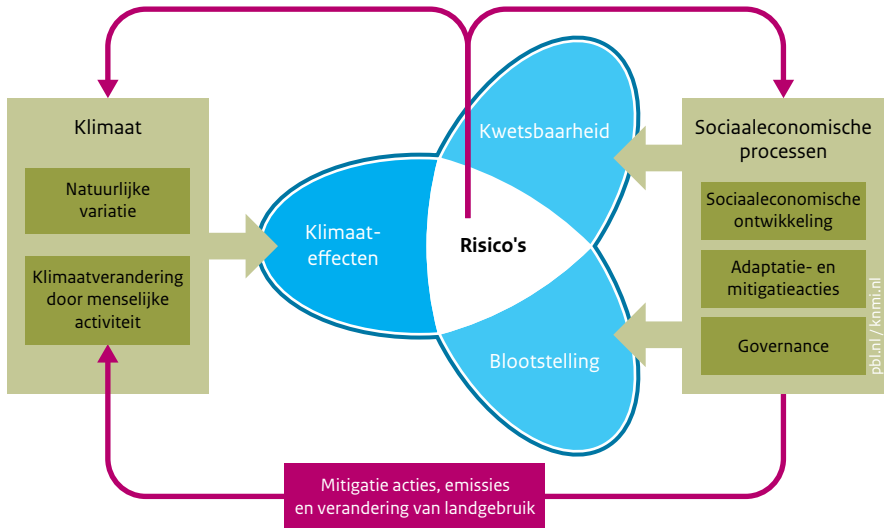
Adaptatie aan klimaatverandering krijgt in Nederland expliciete aandacht. In het Delta-programma worden watergerelateerde klimaatrisico's meegenomen en voor 2016 heeft het kabinet een Nationale Adaptatiestrategie aangekondigd. In deze strategie zullen ook de klimaatrisico's op andere beleidsterreinen dan water worden geadresseerd. Zowel in het Deltaprogramma als in de Nationale Adaptatiestrategie wordt een nauwe samenwerking nagestreefd tussen het Rijk, provincies, gemeenten, waterschappen, sectoren en private partijen.

2.1 Wat verstaat het IPCC onder risico's en adaptatie?

Het risico van klimaateffecten wordt bepaald door de combinatie van de kans op en de intensiteit van deze effecten, de blootstelling van mens, dier en plant hieraan en de kwetsbaarheid van een samenleving voor de schadelijke gevolgen van klimaatverandering. Klimaatadaptatie is het proces van aanpassing aan het actuele of verwachte klimaat en zijn effecten, opdat de (kansen op) schadelijke gevolgen door klimaateffecten kunnen worden beperkt of voorkomen, en de voordelen van het veranderende klimaat kunnen worden benut.

Klimaatverandering leidt tot een geleidelijke verandering van klimaatvariabelen, zoals de jaargemiddelde temperatuur, en tot een verandering van de kans op en de intensiteit van extremen, zoals hittegolven en zware buien. Deze veranderingen leiden op hun beurt weer tot veranderingen in de kans op en de intensiteit van weersafhankelijke

Figuur 2.1
Factoren die van invloed zijn op de risico's als gevolg van klimaatverandering



Bron: IPCC WGII 2014

Het risico van klimaat-effecten is de combinatie van de verandering in de kans daarop en de intensiteit daarvan door klimaatverandering, de blootstelling hieraan ("in welke mate kan de maatschappij worden getroffen?") en de kwetsbaarheid van een samenleving voor de schadelijke gevolgen daarvan ("hoe goed kan de maatschappij ermee omgaan?"). Niet alleen klimaat-effecten maar ook sociaaleconomische processen en het gevoerde beleid beïnvloeden dus de aard en omvang van de risico's.

extreme gebeurtenissen, zoals overstromingen en natuurbranden. Al deze mogelijke negatieve klimaat-effecten kunnen woongebieden treffen en waardevolle natuurgebieden. Hoe groter het gebied dat met bepaalde klimaat-effecten te maken kan krijgen, of hoe hoger de bevolkingsdichtheid van dat gebied, hoe groter ook de mate waarin het aan deze effecten wordt blootgesteld.

Een grote mate van blootstelling aan een klimaat-effect hoeft echter geen grote gevolgen te hebben. Zo zal de overstroming van een gebied waar mensen op terpen of in drijvende huizen wonen, geen schade of slachtoffers tot gevolg hebben. In welke mate een klimaat-effect daadwerkelijk tot schade of slachtoffers leidt, hangt af van hoe kwetsbaar de samenleving is voor deze klimaat-effecten. Het risico van klimaat-effecten wordt bepaald door de combinatie van de kans op en de intensiteit van deze effecten, de blootstelling van mens, dier, plant en infrastructuur hieraan en de kwetsbaarheid van een samenleving voor schadelijke gevolgen van klimaatverandering (figuur 2.1).

Veranderen voor een bepaalde bevolkingsgroep de risico's die gepaard gaan met de klimaat-effecten, dan hoeft dit niet automatisch te wijzen op (een gevolg van) klimaatverandering. De blootstelling aan en/of kwetsbaarheid voor een klimaat-effect kan ook

veranderen door sociaaleconomische ontwikkelingen binnen die bevolkingsgroep. Als bijvoorbeeld het aantal mensen toeneemt in een gebied, of als de welvaart toeneemt, of als de bevolkingssamenstelling verandert, verandert ook de ernst van de effecten van weersextremen, nog zonder dat het klimaat verandert. Vaak zullen beide ontwikkelingen tezamen, dus zowel klimaatverandering als sociaaleconomische processen, de drijvende krachten zijn achter de toename (of afname) van de klimaatrisico's in de tijd. Klimaatadaptatie is het proces van aanpassing aan het actuele of verwachte klimaat en zijn effecten, opdat de (kansen op) schadelijke gevolgen door klimaateffecten kunnen worden beperkt of voorkómen, en de voordelen van het veranderende klimaat kunnen worden benut.

2.2 Welke veranderingen zijn wereldwijd waargenomen?

De gevolgen van klimaatverandering zijn wereldwijd waarneembaar. Wel vertonen deze gevolgen grote regionale verschillen in aard en ernst. Zo neemt in de laaggelegen kustgebieden het overstromingsrisico voor mensen en hun bezittingen verder toe. Op het land en in de oceanen verschuiven de verspreidingsgebieden van soorten en hun activiteitenpatronen over het jaar. De landbouwsector en de voedselproductie ondervinden zowel negatieve als positieve gevolgen van klimaatverandering. Ook kan klimaatverandering gepaard gaan met directe en indirecte gezondheidseffecten.

Overstromingsrisico

Wereldwijd is het risico van natuurrampen, zoals overstromingen en aardverschuivingen, in de afgelopen tientallen jaren sterk toegenomen. In 2012 bracht het IPCC daarom een rapport uit over de relatie tussen klimaatverandering en rampenbestrijding (kader 2.1). De natuurrampen die de meeste schade veroorzaken en de meeste slachtoffers eisen, zijn overstromingen. Vooral rivieroverstromingen als gevolg van extreme neerslag komen vaak voor en lijken steeds meer schade te veroorzaken en steeds meer mensen te treffen, ook in Europa. Niet alleen de gevolgschade van overstromingen, ook de frequentie van overstromingsrampen, vooral langs rivieren, is toegenomen, zowel in Europa als wereldwijd. In hoeverre klimaatverandering hier al aan heeft bijgedragen, is onduidelijk. Wel is er bewijs dat het risico in de afgelopen jaren vooral is toegenomen door de grotere mate waarin mensen en kapitaal worden blootgesteld aan en kwetsbaar zijn voor overstromingen: meer mensen zijn in laaggelegen gebieden gaan wonen (kader 2.1).

Over de hele wereld bezien bedraagt het laaggelegen gebied langs de kusten dat vanuit zee kan overstromen, 'slechts' 2 procent van het landoppervlak. In deze kustgebieden echter woont 10 procent van de wereldbevolking en 15 procent van de stedelijke bevolking. Hier bevindt zich bovendien 65 procent van de grootste wereldsteden, met een bevolking per stad van minstens 5 miljoen inwoners en veel geïnvesteerd vermogen. Het aantal mensen dat bij een zeeniveau dat eens in de honderd jaar voorkomt wordt bedreigd door overstromingen, is tussen 1970 en 2010 toegenomen met 95 procent. Dit komt door de sterke bevolkingsgroei en de trek van mensen van het platteland naar de

steden. In 2010 was naar schatting 13.000 miljard dollar aan kapitaal blootgesteld aan deze eens in de honderd jaar voorkomende zeestand. Van de tien steden met de grootste hoeveelheid kapitaal in laaggelegen gebieden liggen er vier in de Verenigde Staten (Miami, New York, New Orleans en Virginia Beach), vier in Azië (Osaka-Kobe, Tokyo, Nagoya en Guangzhou) en twee in Europa (Amsterdam en Rotterdam).

Droogte en zoetwatervoorziening

Sinds de jaren vijftig van de vorige eeuw heeft een aantal regio's in de wereld te maken met langere droogteperiodes. Van een wereldwijde trend is echter (nog) geen sprake. In Europa nemen de afvoeren in de winter toe doordat dan neerslag vaker als regen valt en minder als sneeuw. In de zomer nemen de afvoeren juist af. Deze verschuivingen over het jaar worden ook in veel andere delen van de wereld waargenomen. In welke

2.1 Special Report IPCC 'Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation'

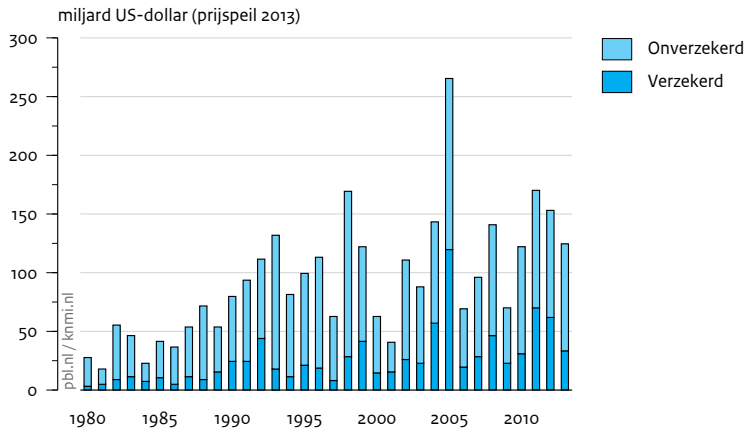
In 2012 bracht het IPCC een rapport uit waarin twee beleidsvelden bij elkaar werden gebracht: rampenbestrijding en crisisbeheersing aan de ene kant, en klimaatverandering en klimaatadaptatie aan de andere. Klimaatverandering kan immers worden gezien als een van de factoren die bijdragen aan het optreden van rampen. Omgekeerd kunnen investeringen in rampenbestrijding en crisisbeheersing worden beschouwd als een strategie voor klimaatadaptatie. Deze twee beleidsvelden zijn los van elkaar ontstaan en ook los van elkaar georganiseerd: de rampenbestrijding binnen de United Nations International Strategy for Disaster Reduction – UNISDR – en de klimaatadaptatie binnen de United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC.

De integratie van de twee beleidsvelden spreekt echter niet voor zich. Dit komt door verschillen in:

- hun organisatie: deze is bottom-up bij rampenbestrijding en crisisbeheersing, en top-down bij klimaatadaptatie;
- de verantwoordelijke overheden: bij rampenbestrijding en crisisbeheersing zijn dat de lokale overheden en organisaties, en bij klimaatadaptatie (veelal) het ministerie van milieu.

Het IPCC concludeert dat de langjarige toename van economische schade door weer- en klimaatgerelateerde rampen zeer waarschijnlijk het gevolg is van de toegenomen mate waarin mensen en kapitaal aan deze gebeurtenissen zijn blootgesteld. Zo wonen wereldwijd 800 miljoen mensen in overstromingsgevoelige gebieden, waarvan 70 miljoen mensen in gebieden die (vrijwel) jaarlijks overstromen. Vooral in ontwikkelingslanden in Azië is de situatie ernstig: in deze landen bevinden zich veertien van de twintig stedelijke agglomeraties wereldwijd die in 2070 naar verwachting het meest aan overstromingen zijn blootgesteld.

Figuur 2.2
Mondiale schade door weegerelateerde rampen



Bron: IPCC SREX 2012; Munich RE 2014

Wereldwijd neemt de schade door weersextremen toe. Slechts een deel van de mondiale schade door weegerelateerde rampen is verzekerd. Het patroon van mondiale schade door weersextremen is een resultante van veranderende sociaaleconomische factoren, zoals toenemende rijkdom in een aantal landen en een groeiende wereldbevolking, klimaatverandering en adaptatiebeleid (zie ook figuur 2.1).

Het IPCC laat in zijn rapport zien dat met maatregelen binnen beide beleidsvelden de blootstelling van gebieden aan en hun kwetsbaarheid voor weersextremen kunnen afnemen, terwijl tegelijkertijd de weerbaarheid kan toenemen ten aanzien van risico's die niet kunnen worden uitgebannen.

Figuur 2.2 geeft een indruk van de wereldwijde schade door weegerelateerde rampen sinds 1980. Het gaat hierbij om de totale schade per jaar door hittegolven, droogtes, stormen en overstromingen.

mate klimaatverandering al effect heeft op de grondwaterstanden, is niet te zeggen. Deze worden vooral beïnvloed door het landgebruik en door het onttrekken, of juist aanvullen, van water aan de grond.

Natuur en biodiversiteit

Door de veranderende klimatologische omstandigheden hebben planten- en diersoorten in veel delen van de wereld al geschiktere leefgebieden opgezocht. Ook kunnen hun seizoensgebonden activiteiten verschoven zijn binnen het jaar. Zo is voor 41 vogelsoorten op het noordelijk halfrond uit onderzoek gebleken dat zij in de afgelopen jaren hun eieren bijna vier dagen per decennium eerder zijn gaan leggen,

en voor zestien boomsoorten bleek hun bladgroei ruim drie dagen per decennium eerder te zijn gestart. Planten en dieren zullen zoveel mogelijk proberen mee te bewegen met de verschuivende klimaatzones. Zo is voor veel soorten een verplaatsing waargenomen richting de polen en de hogere gebieden in de bergen.

Zeer waarschijnlijk is sinds het begin van de industriële revolutie de primaire productie van alle ecosystemen op land wereldwijd toegenomen. Deze trend is mogelijk geen effect van klimaatverandering, maar deels te wijten aan de stijgende CO₂-gehalten in de atmosfeer. De relatie tussen hogere CO₂-gehalten en de primaire productie is onder meer onderzocht voor de bossen in Noordwest-Europa (kader 2.2).

Voor organismen in de zeeën zijn verzuring en opwarming van het zeewater de belangrijkste effecten van de stijging van het CO₂-gehalte in de atmosfeer en van klimaatverandering. Voor ecosystemen in de laaggelegen kustzones zijn de zeespiegelstijging en eventuele veranderingen in het windklimaat van belang met het oog op processen van erosie en aangroei van de kust.

2.2 Bosbouw

In de tweede helft van de vorige eeuw is de hoeveelheid bos in onder meer Noordwest-Europa uitgebreid. Zowel de groeisnelheid van bomen als de hoeveelheid koolstof die in bossen is opgeslagen, is toegenomen. Een combinatie van langere groeiseizoenen, hogere CO₂-gehalten in de atmosfeer, depositie van stikstof en bosbeheer ligt hieraan ten grondslag. Uit onderzoek is gebleken dat de groeisnelheid van bomen in de gematigde klimaatzones aan het eind van de vorige eeuw een piek heeft bereikt en daarna weer is afgenomen, vooral door meer droogte en meer hittegolven. Dat het areaal aan bos afneemt door periodes met droogte, is geconstateerd in Zuid-Europa, maar ook in de Alpen en in België. Een verdere afname van de groei van bossen wordt verwacht in het zuiden en oosten van Europa. Voor het noorden en het Atlantische deel van Europa wordt, in ieder geval voor de korte termijn (eerstkomende decennia), verwacht dat de toenemende CO₂-gehalten in de atmosfeer en de hogere temperaturen juist (weer) tot een toename van (de productiviteit van) bossen zullen leiden. Bossen zullen steeds meer te lijden hebben van bosbranden (vooral in Zuid-Europa, zie ook figuur 2.12), de verspreiding van ziekteplagen en mogelijk van stormen. Ook zal de soortensamenstelling van bossen veranderen door de invasie van soorten uit het zuiden en de migratie van soorten naar het noorden.

Verzuring van het zeewater ontstaat doordat CO₂ uit de atmosfeer in het water oplost. Hierdoor kan de groei van kalkskeletten van organismen worden geremd. De opwarming van het zeewater bedroeg in de periode 1970-2009 ongeveer 0,1°C per tien jaar in de bovenste 75 meter van de oceanen en 0,18°C per tien jaar langs meer dan 70 procent van de kustlijnen wereldwijd. Deze opwarming leidt onder meer tot de migratie van vissoorten naar hogere breedtegraden en, op een aantal plaatsen in de

wereld, tot een afname van de arealen zeegras en zeewier. Of er een relatie bestaat tussen klimaatverandering en de afname van het areaal aan schorren en mangroves, is niet duidelijk. Waarschijnlijk spelen andere factoren hierbij een belangrijker rol, zoals intensivering van het landgebruik en vervuiling. Dit laatste geldt ook voor kustgebieden die te maken hebben met erosie: de invloed van de verstedelijking, de economische ontwikkeling en de afname van sedimentaanvoer vanuit de rivieren door de aanleg van dammen is tot op heden aanzienlijk groter dan de invloed van klimaatverandering. Koraalriffen hebben wereldwijd te lijden van de opwarming en (mogelijk) de verzuring van het zeewater. Deze effecten van klimaatverandering komen boven op de al bestaande effecten van koraalwinning, visserij, intensivering van het landgebruik en watervervuiling. Volgens het IPCC is in de afgelopen dertig jaar wereldwijd *coral bleaching* opgetreden: koralen verbleken doordat de symbiose is aangetast tussen koralen en algen die hun kleuren bepalen. Deze *coral bleaching* is vrijwel zeker voor een groot deel te wijten aan de opwarming van het zeewater. Sinds 1980 heeft dit wereldwijd geleid tot een grote afname (met 20 procent) van het areaal aan koralen.

Voedselvoorziening

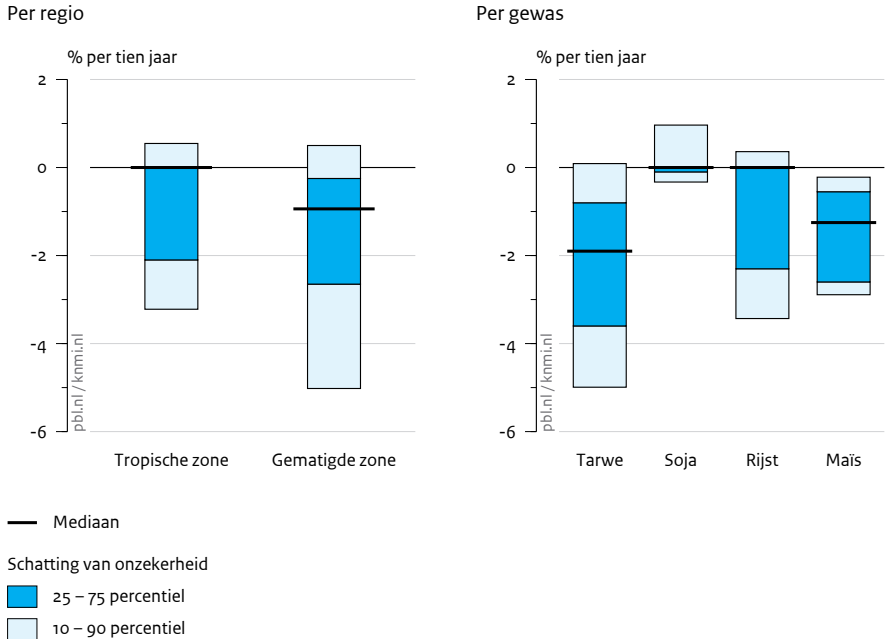
Indicaties dat klimaatverandering effect heeft op de voedselvoorziening zijn vooral zichtbaar voor landbouwgewassen en de visserij. Zo heeft klimaatverandering over de afgelopen vijftig jaar een meetbaar negatief effect gehad op de opbrengsten van tarwe en maïs (figuur 2.3). Effecten op de opbrengsten van rijst en sojabonen zijn nog klein. De opbrengsten hebben vooral te lijden van droogte en hittegolven. Zo waren tijdens de zomers van 2003 en 2010 de graanopbrengsten in Europa en Rusland 20 respectievelijk 30 procent lager dan in andere jaren. In Europa is de variabiliteit van de tarweopbrengsten in de afgelopen tientallen jaren vooral toegenomen in Zuid- en Centraal-Europa. In de meest noordelijke delen zijn de effecten van klimaatverandering op de tarweproductie nog niet waargenomen.

De opwarming van de oceanen leidt tot een verschuiving in het voorkomen van vissoorten: soorten van de gematigde streken migreren in de richting van de polen en soorten uit de warmere streken zoeken de gematigde streken steeds meer op. Ook algensoorten en dierlijk plankton zijn opgeschoven naar de polen. De afname van de kabeljauwstand in de Noordzee over de periode 1980-2000 was het resultaat van overbevissing in combinatie met veranderingen in de verspreiding van de kabeljauw door klimaatverandering.

Gezondheid

Klimaatverandering kan de gezondheid direct en indirect beïnvloeden. Mogelijke gezondheidseffecten zijn: hittestress, huidkanker, voedselvergiftiging, ziektes verspreid door teken en muggen, ziektes door toxische algen en door water- en luchtverontreiniging. Er is echter nog geen duidelijk bewijs dat klimaatverandering nu al wereldwijd effect heeft op de gezondheid. Alleen is er mogelijk een stijging van het aantal dodelijke slachtoffers door hitte, naast een afname van het aantal slachtoffers door koude.

Figuur 2.3
Effect van klimaatverandering op gewasopbrengst, 1960 – 2013



Bron: IPCC WGII 2014

Als gevolg van klimaatverandering zijn de gewasopbrengsten afgenomen, zowel in de tropische zone als in de gematigde zone (links). Dit geldt vooral voor tarwe en maïs; de effecten op soja zijn neutraal tot licht positief (rechts).

Toegang Arctisch gebied

In het Noordpoolgebied is de ijsbedekking in de zomer in de afgelopen jaren steeds verder afgenomen waardoor het aantal dagen met ijsvrije omstandigheden op belangrijke routes voor de scheepvaart is toegenomen. Het Arctische gebied heeft grote voorraden grondstoffen, olie en gas. De mogelijkheden om deze te winnen, zullen steeds gunstiger worden doordat het zee-ijs op de Noordpool vooral in de zomers afneemt.

2.3 Wat kunnen we wereldwijd verwachten?

Een toename van de zeespiegelstijging, een intensivering van neerslagpieken en een toenemende kans op droge periodes kunnen de bestaande risico's als gevolg van klimaatverandering vergroten. Zo zal het overstromingsrisico toenemen. In tropische gebieden, vooral in Afrika, zal de voedselvoorziening verder onder druk komen te staan. De oceanen zullen verder opwarmen en verzuren, met negatieve gevolgen voor biodiversiteit, koraalriffen en de visserijsector. Op veel

plekken in de wereld zal de vraag naar water voor irrigatie groter worden dan de hoeveelheid water die daarvoor beschikbaar is. Klimaatverandering vormt bovendien een extra bedreiging voor het voortbestaan van planten- en diersoorten.

Overstromingsrisico's

Naar verwachting zal het risico van overstromingen vanuit zee, rivieren en grote meren in de loop van deze eeuw verder doorzetten. De toename van extreme regenval in veel gebieden speelt hierbij een belangrijke rol.

Ten opzichte van de periode 1986-2005 zal de zeespiegel in de periode 2081-2100 wereldwijd naar verwachting met 26 tot 82 centimeter zijn gestegen. Deze bandbreedte geeft de onder- en bovengrens aan van de gangbare scenario's voor de uitstoot van broeikasgassen waarmee wereldwijd wordt gerekend. Als aanvulling op deze scenario's kan ook met meer of minder extreme scenario's worden gerekend. Volgens een meer extreem scenario zou de zeespiegel tot 2100 wereldwijd gemiddeld met 55 tot 115 centimeter kunnen stijgen. De verwachte zeespiegelstijging kan daarmee een forse extra investeringsopgave inhouden voor de komende eeuw om de bescherming van gebieden tegen overstromingen op een voldoende niveau te krijgen en te houden. De ontwikkeling van de overstromingsrisico's in kustzones en riviergebieden wordt verder in belangrijke mate bepaald door de bevolkingsgroei, de toename van de economische waarde en de bodemdaling die in gebieden optreedt door grondwaterwinning en inklinking van de bodem. Figuur 2.4 laat zien dat alleen al de bevolkingsgroei en de trek naar grote steden gelegen in kustgebieden zullen leiden tot een sterke toename van de risico's, gerelateerd aan het optreden van cyclonen en overstromingen. In deze figuur is aangenomen dat er in de periode tot aan het jaar 2030 geen significante veranderingen plaatsvinden in de frequentie en intensiteit van stormen en overstromingen, een aanname die overeenkomt met de uitkomsten van de klimaatmodellen voor die periode.

De bodem van het merendeel van de delta's in de wereld daalt sterk doordat er grondwater aan wordt onttrokken, de bodem inklinkt en de aanvoer van sediment naar de kustzone sterk is verminderd door de dammen die in de twintigste eeuw zijn aangelegd. De bodemdaling verloopt op dit moment aanzienlijk sneller dan de zeespiegelstijging. In de afgelopen honderd jaar daalde de bodem onder een aantal grote steden in Azië snel: het oosten van Tokyo daalde bijvoorbeeld 4,4 meter, Shanghai 2,6 meter en Bangkok 1,6 meter. In Europa is vooral de Podelta snel gedaald: ongeveer 3 meter in de afgelopen honderd jaar.

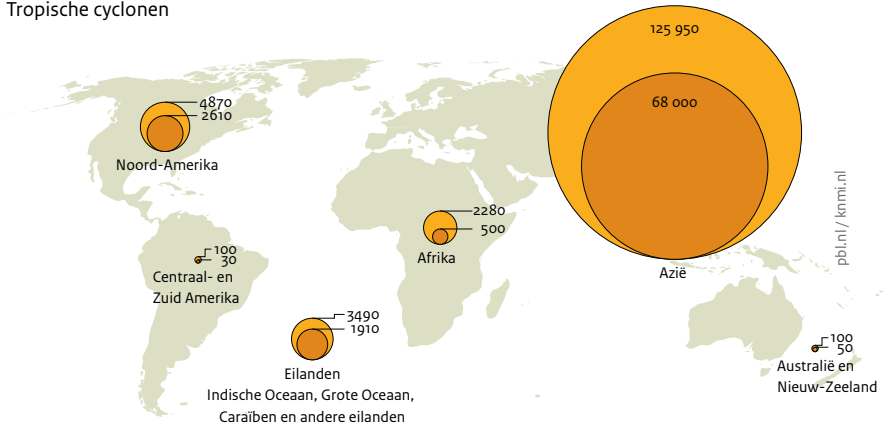
Door de toename van het kapitaal achter de waterkeringen zal, ook wanneer wordt uitgegaan van gelijkblijvende overstromingskansen, de jaarlijkse schadeverwachting in de 136 grootste kuststeden ter wereld in de periode tot 2050 naar verwachting negen maal zo hoog zijn als in 2005. Net als bij de bevolking nemen de economische schaderisico's vooral toe in Azië.

Als de Europese Unie zich niet zou aanpassen aan de verwachte zeespiegelstijging, zou het aantal mensen in EU-landen dat jaarlijks te maken krijgt met een kustoverstroming,

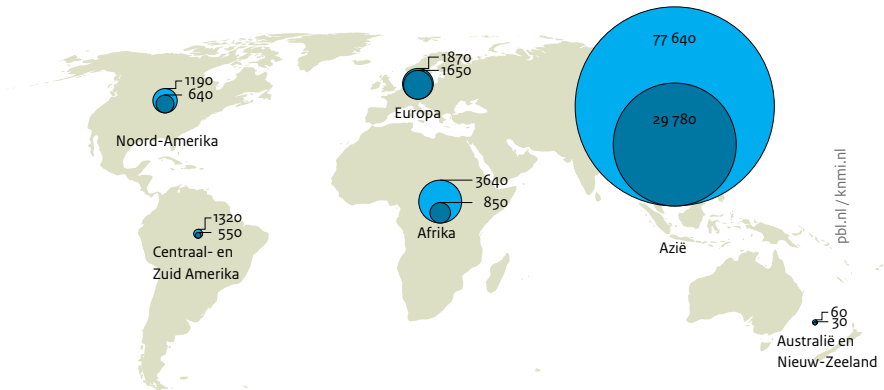
Figuur 2.4

Blootstelling van bevolking aan tropische cyclonen en overstromingen

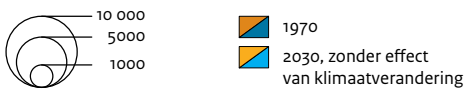
Tropische cyclonen



Overstromingen



Blootstelling (duizend mensen per jaar)



Bron: IPCC SREX 2012

Het aantal mensen dat in de verschillende werelddelen is blootgesteld aan tropische cyclonen (boven) en overstromingen (onder), neemt in de periode 1970- 2030 fors toe, vooral in Azië. Deze toename is primair het gevolg van bevolkingsgroei. Hoewel er een significante toename van de activiteit van cyclonen is gemeten in de Noord-Atlantische oceaan, is dit niet het geval voor tropische cyclonen. En tot 2030 is er weinig vertrouwen in een toename door klimaatverandering. Na 2030 wordt er wel een toename verwacht. De figuur laat zien dat de grootste veranderingen worden verwacht voor Azië (verdobbeling van effecten), Centraal- en Zuid-Amerika (verdrievoudiging van effecten) en Afrika (verviervoudiging van effecten).

tussen nu en 2080 toenemen met 0,8 tot 5,5 miljoen. De verwachte jaarlijkse schade voor de Europese Unie zou in die periode tot 17 miljard euro kunnen stijgen.

Wateroverlast in het stedelijk gebied

Naar verwachting neemt extreme regenval in 2100 toe met 10 tot 60 procent ten opzichte van de periode 1961-1990. Als gevolg hiervan nemen de kans op, en de volumes van, wateroverlast in het stedelijk gebied sterk toe (met een bovengrens van 400 procent). Dit komt onder meer door overstromingen vanuit het overbelaste rioolsysteem. De wateroverlast kan sterker toenemen dan de neerslagintensiteiten omdat juist de zwaarste buien de capaciteit van de stedelijke drainage overschrijden en een toename van de intensiteit van die buien vrijwel meteen tot wateroverlast leidt. In veel steden is de capaciteit van de drainage en riolering nu al vaak onvoldoende. Schades kunnen in de miljarden lopen, zoals blijkt uit de gevolgen van de intensieve neerslag waarmee de bevolking van Kopenhagen en het Verenigd Koninkrijk recent te maken hadden.

Droogte en zoetwatervoorziening

Voor de toekomst wordt een toename verwacht van de intensiteit van droogte in grote delen van de wereld, zoals het noordoosten van Brazilië, Midden-Amerika, het zuiden en midden van de Verenigde Staten en het zuiden van Afrika. Dit geldt ook voor het zuidelijke en het centrale deel van Europa.

Als de temperatuur wereldwijd stijgt met 1°C ten opzichte van die aan het eind van de vorige eeuw, zal voor ongeveer 8 procent van de wereldbevolking de zoetwatervoorziening sterk afnemen. Bij een stijging van 2 tot 3°C is dit 14 respectievelijk 17 procent, al is de spreiding in de resultaten van de verschillende rekenmodellen groot. Niet alleen zullen veel mensen te maken krijgen met een afname van de rivierafvoeren, ook zal op veel plaatsen in de wereld de verdeling van de rivierafvoer over het jaar veranderen. Doordat in de bergen minder sneeuw valt en deze sneeuw eerder smelt, zal de piek in de afvoer vanuit de bergen eerder optreden en dus in het voorjaar afnemen. Doordat in de winter meer neerslag valt in de vorm van regen, zullen de afvoeren in de winter toenemen. In de zomer nemen de afvoeren juist af.

In een aantal gebieden in de wereld, waaronder het noorden van Europa, zullen de rivierafvoeren op jaarbasis in eerste instantie toenemen. Doordat de gletsjers smelten, zullen de rivieren die (deels) door het smeltwater van deze gletsjers worden gevoed, jaargemiddeld meer water afvoeren. Nadat een maximum is bereikt, zal de jaargemiddelde afvoer weer gaan dalen. Voor Europa (Alpen, Noorwegen, IJsland) zal de piek van het smeltwater waarschijnlijk in de eerste helft van deze eeuw worden bereikt. Tegenover een afname van de waterbeschikbaarheid staat in veel delen van de wereld een toename van de watervraag. Vooral de vraag naar water voor irrigatie in de landbouw zal fors toenemen, tot meer dan 40 procent in de loop van deze eeuw voor Europa, de Verenigde Staten en delen van Azië. Wellicht zal het stijgende CO₂-gehalte van de atmosfeer ertoe leiden dat planten minder water verdampen en dus minder nodig hebben (doordat de huidmondjes van bladeren bij een hoger CO₂-gehalte minder ver open staan). Maar zelfs als wordt aangenomen dat dit effect heel groot is, zal de

vraag naar water voor irrigatie in een aantal gebieden, waaronder Zuid-Europa, deze eeuw nog steeds met meer dan 20 procent toenemen. Op veel plekken in de wereld zal de vraag naar water voor irrigatie groter worden dan de hoeveelheid water die daarvoor beschikbaar is.

Overigens heeft een reeks van factoren invloed op de watervraag. Denk aan: (1) de verwachte bevolkingsgroei, (2) meer welvaart, (3) een trend naar een eiwitrijker dieet, en (4) het verbouwen van steeds meer biofuels. De invloed van deze factoren is naar verwachting groter dan het effect van klimaatverandering (inclusief het CO₂-effect).

Natuur en biodiversiteit

Seizoensgebonden activiteiten van verschillende planten- en diersoorten zijn aan het verschuiven. Ook de migratie van soorten naar andere gebieden is al waargenomen. Beide trends zullen zich wereldwijd doorzetten. Zo zal de samenstelling van planten- en diergemeenschappen in de tweede helft van deze eeuw zeer waarschijnlijk gaan veranderen doordat in een bepaald gebied sommige soorten wegtrekken terwijl andere zich er juist vestigen. Ook de interactie tussen soorten zal verstoord raken doordat hun activiteiten niet gelijk in het jaar verschuiven. Denk aan de beschikbaarheid van voedsel versus de timing van de migratie en het broeden van vogels. Als gevolg van deze veranderingen zullen ecosystemen anders gaan functioneren. Volgens de huidige inzichten zal in de eerste helft van deze eeuw de invloed van directe menselijke ingrepen op ecosystemen, via het land- en watergebruik en de vervuiling, groter zijn dan de invloed van klimaatverandering, maar de onzekerheden zijn groot.

Veranderingen binnen ecosystemen kunnen doorwerken in de diensten die deze systemen leveren. Voorbeelden van ecosysteemdiensten die door klimaatverandering kunnen worden bedreigd, zijn: waterzuivering door wetlands, het vastleggen van CO₂ door bossen, kustbescherming door mangroves en koraalriffen, de beheersing van ziektes en plagen, en de recycling van nutriënten.

Planten en dieren zullen zoveel mogelijk proberen mee te bewegen met de verschuivende klimaatzones. Blijft de klimaatverandering beperkt, dan kunnen de meeste soorten tot het eind van deze eeuw de effecten daarvan waarschijnlijk wel volgen. Soorten die dat niet kunnen, zullen (sterk) in aantal afnemen. Is klimaatverandering echter sterk, dan zullen veel soorten de veranderingen niet kunnen bijbenen. Daar komt bij dat de migratie van soorten wordt belemmerd doordat hun habitat is versnipperd, dammen in rivieren en steden hen de weg versperren, en concurrerende soorten de 'nieuwe' geschikte gebieden al bezetten.

Het risico op uitsterving neemt voor veel land- en zoetwatersoorten toe. Niet alleen door klimaatverandering (en de daaraan verbonden gevolgen als droogte, stormen, natuurbranden en de uitbraak van ziektes), maar vooral door de combinatie met andere stressfactoren, zoals de verandering van habitat, overexploitatie, vervuiling en van elders binnendringende soorten.

Doordat het zeewater verder zal opwarmen en verzuren, komen koralen en organismen met kalkskeletten verder onder druk te staan. De migratie van soorten naar hogere breedtegraden zal zich verder voortzetten.

Voedselvoorziening

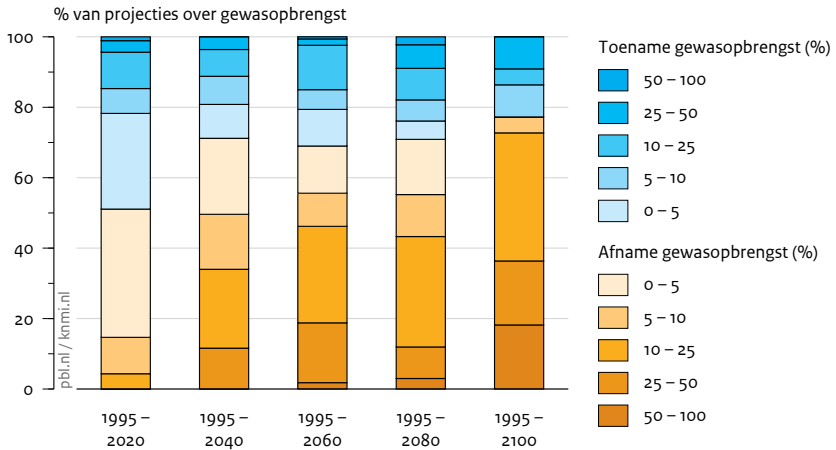
Naar verwachting zullen de opbrengsten van de belangrijkste gewassen in de loop van deze eeuw (verder) afnemen als gevolg van klimaatverandering. Dit gebeurt in zowel de tropen als de gematigde streken. Het effect zal in eerste instantie, bij een beperkte opwarming, nog gering zijn maar in de loop van deze eeuw verder toenemen. Verwachten ongeveer evenveel wetenschappelijke studies voor de eerstkomende jaren een toename dan wel een afname van de opbrengsten, in de loop van deze eeuw verschuift deze verhouding steeds meer in de richting van een afname van de opbrengsten (figuur 2.5). Blijven maatregelen gericht op het bestrijden van de klimaatrisico's uit, dan zullen de oogsten in de loop van deze eeuw wereldwijd afnemen met 15 tot 18 procent.

Ook in het zuiden van Europa zullen de graanopbrengsten waarschijnlijk verder afnemen. In West-Europa kan de toename van hittestress tijdens het bloeien van tarwe tot een aanmerkelijk verlies aan opbrengsten leiden. Voor het noorden van Europa is er sprake van een optelsom van negatieve en positieve effecten: de toename van de variabiliteit van het klimaat en het oprukken van insectenplagen en ziektes zijn risico's voor de graanoogsten. Maar klimaatverandering betekent ook dat een groter areaal aan voor het verbouwen van graan geschikte gebieden beschikbaar komt. Waarschijnlijk zal het netto-effect voor Noord-Europa een toename zijn van de opbrengst van de graanoogsten.

In de loop van deze eeuw zal klimaatverandering in de tropen naar verwachting meer negatieve gevolgen hebben voor de opbrengsten van de voor de voedselvoorziening belangrijkste gewassen dan in de gematigde streken. Niet alleen vanwege de effecten op de gewassen maar ook vanwege de beperkte financiële en organisatorische capaciteiten in die gebieden. Het ziet er in de komende tientallen jaren (vooralsnog) echter niet naar uit dat de opbrengsten van de belangrijkste gewassen voor de voedselvoorziening voor de wereld als geheel zullen afnemen. Die afname wordt pas verwacht in de tweede helft van deze eeuw. Het hogere CO₂-gehalte in de atmosfeer heeft immers ook een positief effect op de groei van gewassen. Zolang de opwarming nog beperkt is, compenseert dit positieve effect voor een deel het negatieve effect van de opwarming. Op de lange termijn zullen de effecten van de opwarming (droogte, hittestress) echter gaan overheersen.

Naast klimaatverandering hebben ook sociaaleconomische ontwikkelingen veel invloed op de ontwikkelingen binnen de land- en tuinbouwsector. Veranderingen in het beleid en economische ontwikkelingen zijn voor de landbouw relatief belangrijker dan klimaatverandering. Hoe beide aspecten zich tot 2050 ontwikkelen, is hoogst onzeker. De migratie van vissoorten in de wereldzeeën naar de polen zal er halverwege de eenentwintigste eeuw toe hebben geleid dat de soortenrijkdom in het zeewater van, onder meer, Noordwest-Europa is toegenomen en in het zeewater van de tropen is afgenomen. Op hogere breedtegraden kunnen de visvangsten dan met 30 tot 70 procent (ten opzichte van 2005) zijn toegenomen, terwijl deze in de tropen tot 40 procent zijn afgenomen (figuur 2.6). Toch kunnen de effecten voor de visserij ook voor Noordwest-Europa negatief zijn: doordat het lichaamsgewicht van

Figuur 2.5
Verdeling van projecties naar effect van klimaatverandering op gewasopbrengst



Bron: IPCC WGII 2014

De verdeling van de projecties voor het percentage gewasopbrengst laat voor de komende decennia een verschuiving zien van een toename van de opbrengsten (blauw) naar een afname (bruin). Hierbij zijn projecties samengenomen uit een groot aantal studies met verschillende toekomstscenario's, alsook studies met en zonder adaptatie, en studies voor tropische en gematigde zones (N=1090). Veranderingen in de gewasopbrengsten zijn relatief ten opzichte van 1990-2000, in de figuur weergegeven door het midden van dit interval.

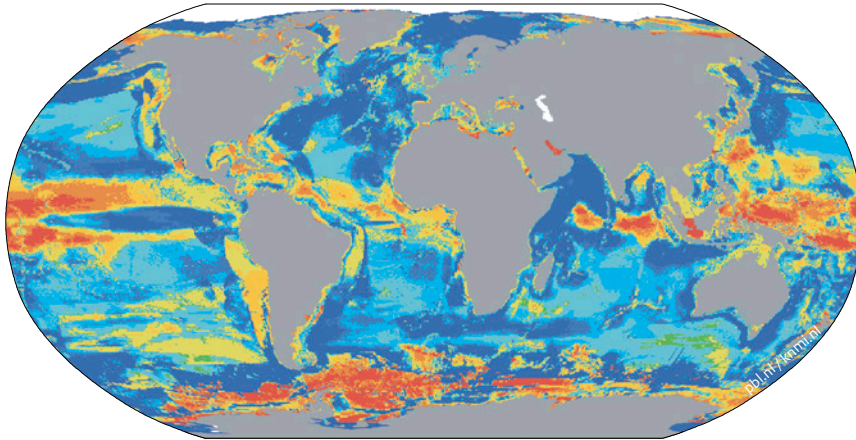
vissen (en zoöplankton, hun voedsel) naar verwachting afneemt, heeft klimaatverandering, in combinatie met intensieve visserij, gevolgen voor de duurzaamheid van deze sector.

Energievoorziening

Klimaatverandering heeft effect op zowel de vraag naar als het aanbod van energie (als mix van verschillende bronnen). De vraag naar energie wordt door klimaatverandering beïnvloed doordat er bijvoorbeeld minder energie nodig zal zijn om in de winter gebouwen te verwarmen en meer om in de zomer gebouwen te koelen. Veranderingen in de vraag naar energie worden echter voor een groot deel bepaald door andere factoren dan klimaatverandering, zoals economische ontwikkelingen, technologische innovaties en de geopolitieke situatie. Laatstgenoemde effecten zijn in de eerstkomende tientallen jaren zeer waarschijnlijk belangrijker dan klimaatverandering. Ook het aanbod aan energie, ofwel de mix van de verschillende bronnen waarmee elektriciteit wordt opgewekt, zal in de loop van deze eeuw veranderen. Wereldwijd (en in Europa) zal de hoeveelheid energie die met zonnepanelen wordt opgewekt, toenemen. Dat geldt ook voor windenergie, door de aanleg van nieuwe windmolenparken. Hoewel de potentiële hoeveelheid windenergie in Europa tot 2050 niet significant zal veranderen, zal die hoeveelheid na 2050 in het noordelijke, centrale en

Figuur 2.6

Verwachte verandering in de maximale visvangsten tussen 2001 – 2010 en 2051 – 2060 bij 2°C temperatuurstijging



Bron: IPCC WG II 2014

Als gevolg van klimaatverandering en temperatuurstijging van de oceanen nemen de visvangsten in de tropische zones en rond Antarctica naar verwachting af, en in de noordelijker streken toe.

Atlantische deel van Europa in het winterhalfjaar mogelijk toenemen en in het zomerhalfjaar afnemen. Alleen voor het grootste deel van Zuid-Europa wordt na 2050 voor het hele jaar een afname verwacht.

De wereldwijde elektriciteitsproductie bij stuwmeren zal halverwege deze eeuw iets hoger liggen dan nu, zo is de verwachting. In Europa zal deze vorm van energieaanbod gemiddeld iets afnemen, al zal dit regionaal aanzienlijk verschillen. Zo zal het aanbod in Scandinavië toenemen met 5 tot 14 procent aan het eind van deze eeuw (vergeleken met nu), en voor het continentale deel van Europa en de Alpen afnemen met 6 tot 36 procent. Elektriciteitscentrales die voor hun koelwater afhankelijk zijn van rivieren, zullen in de zomer vaker te maken krijgen met beperkingen in de capaciteit die mag worden benut. Dit om te voorkomen dat het rivierwater te warm wordt voor het leven in die rivieren. Wereldwijd zal een opwarming van de luchttemperatuur met 2°C, 4°C dan wel 6°C de jaargemiddelde temperatuur van het rivierwater doen stijgen met naar verwachting 1,3°C, 2,6°C respectievelijk 3,8°C. Voor Europa is geschat dat de capaciteit van de elektriciteitscentrales in de zomers van 2031-2060 hierdoor met 6 tot 19 procent zal afnemen vergeleken met de capaciteit in de periode 1971-2000.

De beperking van de capaciteit van elektriciteitscentrales in het geval van te warm rivierwater kan de elektriciteitsprijs in West-Europa op jaarbasis tussen nu en 2030 met

ongeveer 1 procent doen stijgen. Het effect tijdens een hete, droge zomer is echter veel hoger: een stijging met 11 tot 24 procent (beperking lozingen) of zelfs 50 procent (geen lozingen) wanneer zich een hittegolf voordoet zoals die van 2006.

De gevolgen van klimaatverandering (meer extreem weer, zeespiegelstijging) kunnen de betrouwbaarheid van de elektriciteitsnetwerken en pijpleidingen beïnvloeden. Het is denkbaar dat de ontwerpnormen hiervoor moeten worden aangepast.

Gezondheid

De toename van het aantal hittegolven en de toename van het extreme karakter hiervan hebben gevolgen voor de volksgezondheid. Ouderen en mensen met een korte levensverwachting zullen door de hitte eerder komen te overlijden. Vooral mensen in (grote) steden zijn kwetsbaar vanwege het stedelijk hitte-eilandeffect (kader 2.3).

Tegenover een hoger sterftecijfer door hitte in de zomer staat een afnemend sterftecijfer door minder (periodes met) extreme kou in de winter. Volgens het IPCC is het negatieve effect van de toenemende hitte in een aantal regio's groter dan het positieve effect van de minder vaak voorkomende extreem koude periodes, maar de verhouding tussen de twee op wereldschaal is vooralsnog onduidelijk.

Wereldwijd zal het risico van ziektes door verontreinigd voedsel en water vrijwel zeker toenemen. Voor Noordwest-Europa zal dit risico echter zeer beperkt blijven omdat de kwaliteit van de infrastructuur voor afvalwaterbehandeling en drinkwaterbereiding hier hoog is. Wel kunnen de zomeromstandigheden (warm water, lage afvoer) in Noordwest-Europa vaker leiden tot de bloei van (toxische) algen en, door de lage afvoer en dus geringe verdunning, sterker verontreinigd oppervlaktewater.

Ook het risico van ziektes die worden overgebracht door zogenoemde vectoren als teken en muggen, neemt waarschijnlijk toe, al zal dit van regio tot regio verschillen.

Er zijn op dit moment geen aanwijzingen dat malaria weer op grote schaal in Europa gaat voorkomen. Voor Noordwest-Europa is dit zelfs onwaarschijnlijk, gezien het hoge niveau van de gezondheidszorg. Dit geldt ook voor andere ziektes die muggen kunnen overbrengen, zoals dengue. Voor ziektes die worden overgebracht door teken, zoals de ziekte van Lyme, zijn er aanwijzingen dat de verspreiding hiervan naar het noorden van Europa en Amerika (deels) te wijten is aan de opwarming van de aarde. Al komt het ruimtelijk beeld van de (verdere) verspreiding van teken overeen met dat van de opwarming, het is (nog) niet aangetoond dat daarmee ook het patroon van ziektegevallen bij mensen verandert.

Wereldwijd zal klimaatverandering leiden tot veranderingen in de luchtkwaliteit, die op haar beurt de gezondheid van mensen beïnvloedt. Belangrijke veranderingen in de luchtkwaliteit zijn hogere gehalten fijnstof door bosbranden, hogere gehalten aan ozon tijdens hittegolven en verschuivingen binnen het jaar van het vrijkomen van pollen. Extreem hoge fijnstofgehalten zijn bijvoorbeeld gemeten in Moskou tijdens de bosbranden van 2010. Hoge ozongehalten zijn mogelijk een belangrijke oorzaak geweest van de hoge sterftecijfers in Noordwest-Europa tijdens de hittegolf van 2003. Binnen Europa is vooral Zuid-Europa gevoelig voor deze gevolgen van toenemende hitte.

2.3 ‘Urban Heat Island’

Het stedelijk hitte-eilandeffect (*urban heat island effect*) is het fenomeen dat het in steden vaak enkele graden warmer is dan in hun omgeving. Dit komt doordat in een stad veel warmte wordt gegenereerd, terwijl beton en asfalt veel (zonne) warmte vasthouden, er weinig begroeiing is die voor verkoeling zorgt en de luchtcirculatie beperkt is. Waar dit effect toeneemt, zullen hete zomers een grotere impact hebben op het leefmilieu in de stad, met mogelijke gevolgen voor de volksgezondheid. Tijdens de hittegolf van 2003 bleken vooral kwetsbare mensen (bijvoorbeeld ernstig zieke ouderen en daklozen) in de grote steden een grotere kans te hebben op overlijden. In Frankrijk zijn door die hitte zo’n 15.000 mensen ‘vervroegd’ overleden. Het merendeel van de slachtoffers leed aan hart- en vaatziekten of had luchtwegproblemen.

Uit onderzoek is gebleken dat het optreden van een hittegolf zoals die van het jaar 2003 zeer goed past bij een opwarmend klimaat in Europa.

Infrastructuur en transport

Wereldwijd zal de kwetsbaarheid van rail- en weginfrastructuur, havens en industriële complexen toenemen. Dit komt doordat de zeespiegel stijgt, piekafvoeren van rivieren extremer en buien en stormen zwaarder worden (al zullen deze factoren van plaats tot plaats verschillen). Dat wil zeggen: tenzij de juiste adaptatiemaatregelen worden genomen. Die maatregelen zijn in het bijzonder van belang voor de zogenoemde ‘kritische (vitale) infrastructuur’: die infrastructuur die ‘essentieel is voor de continuïteit van de diensten waar een land op vertrouwt en waarbij de verstoring hiervan tot grote economische of maatschappelijke gevolgen, of het verlies aan mensenlevens zou leiden’ (definitie IPCC).

De effecten van klimaatverandering op de infrastructuur voor drinkwatervoorziening en riolering zullen in de meeste landen negatief zijn.

Gewelddadige conflicten

Klimaatverandering kan het risico op gewelddadige conflicten vergroten doordat zij ook effect heeft op armoede, de verplaatsing van bevolkingsgroepen en politieke ontwrichting. Doordat een groot aantal factoren een rol speelt bij het ontstaan van conflicten, is de rol van klimaatverandering hierbij nog moeilijk te kwantificeren.

2.4 Hoe kunnen landen zich aanpassen aan de gevolgen van klimaatverandering?

De aard en ernst van klimateffecten zijn sterk geografisch bepaald en er zijn veel verschillende typen maatregelen mogelijk om de kwetsbaarheid voor klimaatverandering te verminderen.

Het ontwikkelen van een effectieve adaptatiestrategie is dan ook maatwerk. Welke maatregelen het beste werken, zal van regio tot regio verschillen en hangt mede af van de sectoren die het betreft.

De gevolgen van klimaatverandering zijn nu al merkbaar en zullen in de nabije en verdere toekomst steeds ingrijpender worden. Tijdige klimaatadaptatie is noodzakelijk om klimaatrisico's te beperken en om op een later moment dure en ingrijpende maatregelen te voorkomen. Het IPCC ziet adaptatie niet als een op zichzelf staande opgave (zie het schema in figuur 2.1). Adaptatie is veeleer een multidisciplinaire opgave, met de interactie tussen klimaateffecten en maatschappelijke en sociaaleconomische ontwikkelingen als het noodzakelijk vertrekpunt voor een effectieve strategie. Maar adaptatie kent grenzen. De emissiereductie van broeikasgassen blijft daarom cruciaal (mitigatie). Daarbij geldt dat hoe eerder mitigatiemaatregelen worden geïmplementeerd, hoe effectiever deze maatregelen zullen zijn om klimaatrisico's te beperken (zie ook hoofdstukken 3 en 4).

Overstromingsrisico

Hoe verstandig is het vanuit economisch oogpunt om te blijven investeren in de bescherming tegen overstromen en kusterosie? Deze vraag is bezien voor verscheidene landen en voor een groot aantal scenario's van zeespiegelstijging en sociaaleconomische ontwikkelingen. Voor al deze scenario's en voor de meeste landen blijkt het antwoord op de vraag positief uit te vallen. Afhankelijk van de situatie in een land zijn drie strategieën mogelijk: kustverdediging met harde maatregelen (kustweringen, stormvloedkeringen) of zachte (zandsuppleties), ruimte bieden aan het overstromingswater door meer flexibiliteit (ruimte voor water, hoogwaterbestendig wonen, waarschuwingssystemen) en terugtrekken. Bij (flexibeler) kustverdedigingsmaatregelen wordt wereldwijd steeds meer ingezet op 'bouwen met de natuur', zoals het herstellen van aangetaste mangroves langs de kust, de aanleg van oesterbanken voor dijken en het stimuleren van de aangroei van schorren. De mate waarin in de loop van deze eeuw maatregelen nodig zijn om de kans op een overstroming vanuit zee niet te laten toenemen, zal van regio tot regio verschillen (figuur 2.7).

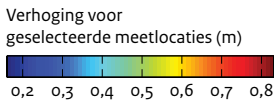
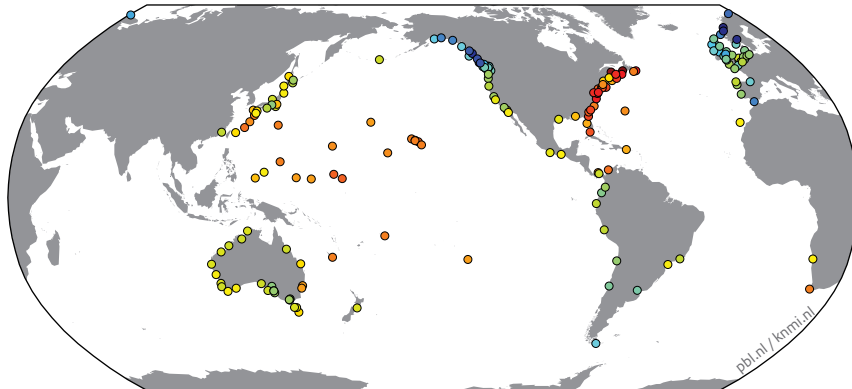
Voor de rivieren zijn er structurele en niet-structurele maatregelen denkbaar. Voorbeelden van het eerste type zijn dijken, rivierverruimende maatregelen en bergingsgebieden (reservoirs), maar ook hoogwaterbestendige bebouwing. Voorbeelden van het tweede type zijn hoogwaterwaarschuwingssystemen en tijdelijke beheersmaatregelen zoals noodkeringen.

Wateroverlast in het stedelijk gebied

Het kost zeer veel tijd en geld om de capaciteit van de riolering te vergroten, en/of om een gescheiden afvoer te maken voor het regenwater en het (stedelijk en huishoudelijk) afvalwater. Op de korte termijn zijn, al dan niet aanvullend, andere adaptatiemaatregelen mogelijk waarmee niet alle neerslag van zware buien tegelijk door de riolering hoeft te worden afgevoerd. Voorbeelden hiervan zijn laaggelegen pleinen in de steden of grote ondergrondse reservoirs. Deze reservoirs zijn bedoeld om

Figuur 2.7

Benodigde verhoging waterkeringen om overstromingskans gelijk te houden tussen 1986 – 2005 en 2081 – 2100 bij middellage emissiepaden (RCP4.5)



Bron: IPCC WG II 2014

De zeespiegel stijgt niet overal even snel. Daardoor zijn er substantiële regionale verschillen in de benodigde inspanningen om de kans op overstromingen deze eeuw niet te laten toenemen. De figuur laat de benodigde verhogingen zien zoals berekend voor 182 locaties waar waterstanden worden gemeten. De grootste ingrepen worden verwacht voor eilanden in de Stille Oceaan en aan de oostkust van Noord- Amerika.

het water tijdelijk te bergen, waarna het in de uren na de bui vervolgens geleidelijk door de riolering wordt afgevoerd. Hetzelfde effect kan worden bereikt met groene daken die het water als een spons vasthouden. Ook kunnen meer vijvers, grachten en parken in de stad worden aangelegd, met als bijkomend voordeel dat hiermee het stedelijk hitte-eilandeffect kan worden bestreden. Daarnaast kan de bestrating meer waterdoorlatend worden gemaakt. Het IPCC noemt Rotterdam als een van de steden die vooroplopen met de maatregelen om wateroverlast in de stad tegen te gaan.

Droogte en zoetwatervoorziening

Effectieve adaptatiemaatregelen zijn het verzamelen van regenwater, vaak door de watervoorraden in natuurlijke of kunstmatige reservoirs te vergroten, het vochtvasthoudende vermogen van de ondergrond en (het aanplanten van) begroeiing te beschermen, erosie tegen te gaan, en door waterhergebruik, ontzilting en efficiëntere irrigatie. Ook het herstellen en beschermen van zoetwaterhabitats en het beheer

2.4 Governance van klimaatadaptatie

In veel landen is er weinig aandacht voor de mogelijkheden om het stedelijk gebied aan te passen aan (gevolgen van) klimaatverandering. Volgens het IPCC zijn hiervoor twee verklaringen. Zo ligt de initiële aandacht van stadsbestuurders vaak nog op mitigatie, terwijl klimaatadaptatie op landsniveau meestal is ondergebracht bij de ministeries, die weinig betrokken zijn bij het stedelijk gebied. Het IPCC constateert dat regeringen en individuele steden in Europa zich wel steeds bewuster worden van de noodzaak om adaptatiemaatregelen te nemen. Juist in het stedelijk gebied, waar zoveel verschillende belangen op een kleine ruimte bij elkaar komen, moeten bestuurders over de juiste capaciteiten beschikken om succesvol op (de gevolgen van) klimaatverandering te kunnen inspelen. Zij moeten:

- kunnen omgaan met de onzekerheden van de verwachte (gevolgen van) klimaatverandering, vooral op lokaal en regionaal niveau, waar veel van de maatregelen moeten worden genomen;
- besluiten kunnen nemen met kennis die door veel onzekerheden is omgeven. Daarbij is wetenschappelijke kennis vaak gericht op de lange termijn (2050 en verder) en de mondiale schaal. Besluitvorming speelt meestal op de korte termijn en op lokale schaal;
- adaptatie in de bestaande procedures van besluitvorming kunnen integreren en te nemen maatregelen kunnen combineren met maatregelen voor adaptatie aan andere ontwikkelingen, zoals globalisering en vergrijzing;
- het adaptatiebeleid voor verschillende regio's en sectoren, op verschillende schalen van besluitvorming en door verschillende actoren, kunnen integreren om conflicten te voorkomen en de kansen te benutten om maatregelen te combineren;
- de gevolgen van klimaatverandering en te nemen maatregelen eerlijk over de samenleving verdelen;
- barrières overwinnen, in wet- en regelgeving, bij te weinig middelen en politieke wil, enzovoort.

van het winterbed van rivieren kan bijdragen aan droogtebestrijding. Deze laatste maatregelen blijven bij het palet aan mogelijkheden echter vaak buiten beeld. Naast maatregelen voor meer aanbod is het ook belangrijk om de watervraag beter te beheersen en waar mogelijk te verminderen, zeker in Zuid-Europa. Dit kan door het watergebruik te bepalen en, waar nodig, te rantsoeneren (in noodsituaties).

Natuur en biodiversiteit

Een adaptatiestrategie moet zich richten op het maximaal faciliteren van het aanpassingsvermogen van de natuur. Dit kan door (1) de druk van andere stressfactoren te verlagen, (2) versnippering van leefgebieden tegen te gaan en deze met elkaar te verbinden, en (3) de genetische diversiteit te handhaven of te verhogen. In een aantal

gebieden in de wereld is het zelfs een optie om planten- of diersoorten te verplaatsen die zelf niet snel genoeg met het veranderende klimaat meebewegen of waarvoor de migratieroute is geblokkeerd, bijvoorbeeld door verstedelijking.

Voedselvoorziening

Met de juiste adaptatiemaatregelen kan de land- en tuinbouwsector in de eerstkomende twintig tot dertig jaar goed omgaan met klimaatverandering. Een voorbeeld voor Europa is gegeven in figuur 2.8. Zo kunnen boeren zelf, door vroeger te zaaien en te oogsten en door andere gewasvariëteiten te verbouwen, hun graanopbrengsten verhogen. Andere mogelijke maatregelen zijn: het verbouwen van andere gewassen en/of het verbouwen op andere percelen, een betere bemesting, irrigatie en/of drainage, het introduceren van meer genetische diversiteit en/of het planten/zaaien van soorten die een grotere tolerantie hebben voor hoge temperaturen, en meer spreiding in de activiteiten van boeren. Ook zouden boeren zich (meer) kunnen verzekeren tegen weegerelateerde rampen. Op de langere termijn (tweede helft van deze eeuw) zullen de gevolgen van klimaatverandering niet meer helemaal met adaptatiemaatregelen kunnen worden gecompenseerd.

Adaptatiemaatregelen ten gunste van de visserijsector zijn volgens het IPCC niet eenvoudig. Adaptatiestrategieën zouden zich kunnen richten op beheersmaatregelen en beleid om de veerkracht van de ecosystemen te vergroten. Hiernaast zouden ze zich kunnen richten op de mogelijkheden voor gemeenschappen die erg afhankelijk zijn van de visserij, om de kansen van klimaatverandering te benutten, en op mogelijkheden om hen minder afhankelijk te maken van één specifieke sector (zoals de visserij).

Energievoorziening

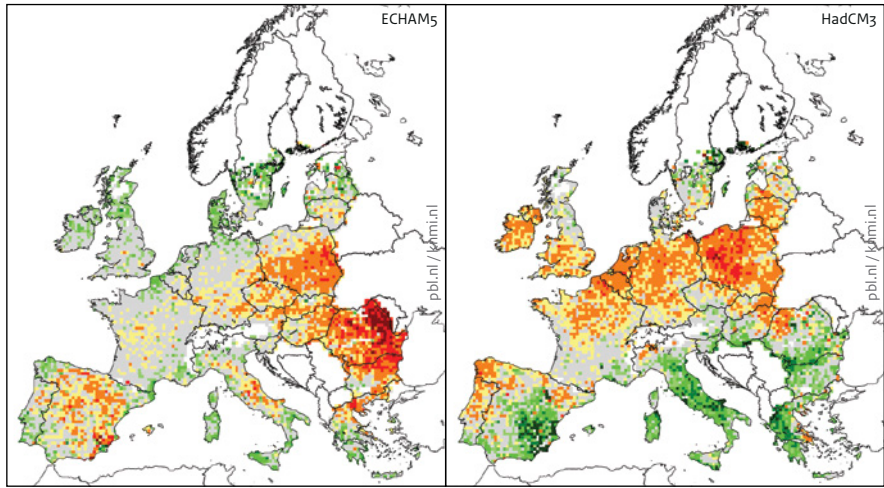
Voor de energievoorziening zijn er veel mogelijkheden om deze aan te passen aan de (gevolgen van) klimaatverandering. Aan de vraagkant bijvoorbeeld kunnen gebouwen beter worden geïsoleerd (tegen koude én hitte). Aan de aanbodkant zijn er verschillende technische mogelijkheden om de hoeveelheid koelwater voor elektriciteitscentrales (sterk) te beperken, zoals het hergebruik van proceswater en het koelen zonder de afgifte van stoom. Ook is er een trend ingezet om meer elektriciteitscentrales aan de kust te bouwen in plaats van langs de rivieren. In veel landen kan de betrouwbaarheid van het elektriciteitsnet worden vergroot door kabels niet langer boven maar onder de grond aan te leggen.

Boven: de toe- en afname van de opbrengst aan wintertarwe in Europa tussen 2000 en 2030 wanneer geen adaptatiemaatregelen zouden worden genomen. De modellen geven niet voor alle delen van Europa dezelfde voorspelling. Zo valt Nederland in de kaart linksboven in de range -5 tot +10 procent, maar in de kaart rechtsboven in de range -5 tot -20 procent. Onder: indien adaptatiemaatregelen worden genomen, laten de modellen een duidelijke verbetering zien ten opzichte van de kaarten zonder adaptatie. Voorbeelden zijn Polen, Duitsland, Frankrijk en ook Nederland.

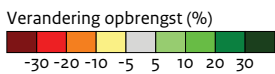
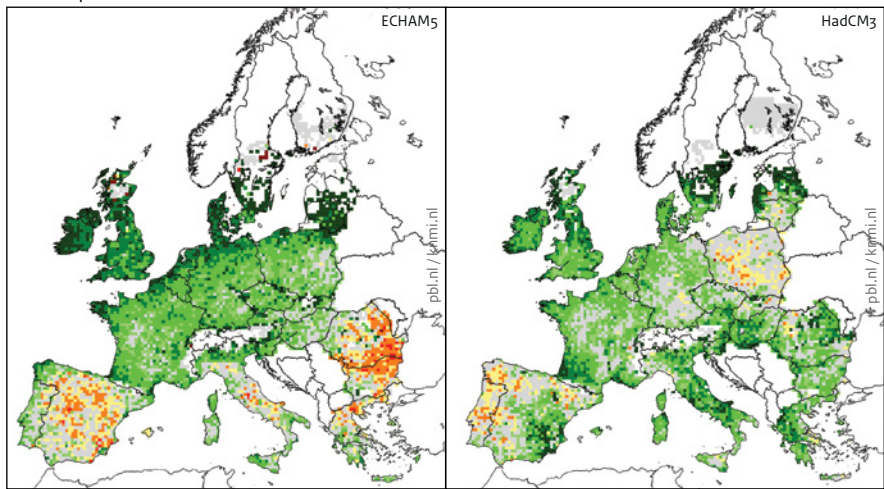
Figuur 2.8

Effect van adaptatie op verandering opbrengst wintertarwe 2000 – 2030 bij middelhoge emissiepaden (A1B)

Zonder adaptatie



Met adaptatie



Geen gegevens

Bron: IPCC WG II 2014

Gezondheid

Voor de nabije toekomst leveren programma's die gericht zijn op de basale volksgezondheid, zoals schoon water, sanitatie en vaccinaties, op armoedebestrijding en op de voorbereiding op en de bestrijding van rampen, wereldwijd de meest effectieve adaptatiemaatregelen. Daarnaast wordt gewerkt aan waarschuwingssystemen specifiek gericht op de gevolgen van klimaatverandering. De extra hitte door het effect van het stedelijk hitte-eiland kan worden verminderd door meer oppervlakte in de stad te bedekken met warmtereflecterende materialen en door meer parken aan te leggen, zodat de bomen enerzijds schaduw brengen en anderzijds door verdamping hitte aan de stad onttrekken.

Bij de (her)inrichting van het stedelijk gebied moet er bij de aanleg van parken en water wel rekening mee worden gehouden dat hierdoor ook plaatsen ontstaan waar veroorzakers van infectieziekten, zoals muggen en teken, zich kunnen vestigen.

2.5 Consequenties en adaptatiemogelijkheden voor Nederland

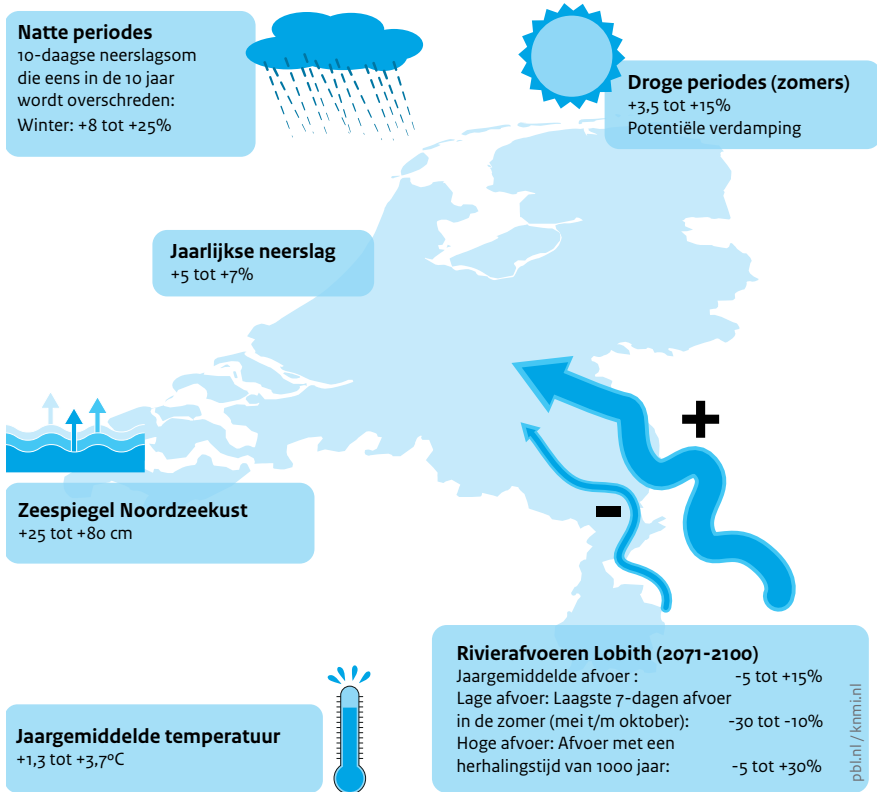
Ook Nederland is gevoelig voor de effecten van klimaatverandering. Negatieve gevolgen zijn bijvoorbeeld een toename van hoge rivierafvoeren, een afname van de beschikbaarheid van zoet water in de zomer, en wateroverlast, en zelfs uitval van energie- of transportnetwerken, na buien. Positieve gevolgen zijn de afname van de sterfte door kou en van het energieverbruik in de winter, de kansen voor nieuwe landbouwgewassen en een toeristisch aantrekkelijker klimaat. Adaptatie aan klimaatverandering krijgt in Nederland expliciete aandacht in het Deltaprogramma en in de Nationale Adaptatiestrategie die voor 2016 op stapel staat.

Nederland is gevoelig voor klimaatverandering. Het is dichtbevolkt, het grondgebruik is intensief en een groot deel van het land kan worden getroffen door overstromingen, zowel vanuit zee als vanuit de rivieren. Er zullen maatregelen nodig zijn om het overstromingsrisico te blijven beheersen en de wateroverlast in het stedelijk gebied te beperken. De effecten van klimaatverandering op de natuur zijn nu al merkbaar. Veel sectoren zullen zich moeten aanpassen aan (de gevolgen van) klimaatverandering, maar hebben daarvoor een goede uitgangspositie. Bovendien heeft klimaatverandering ook positieve effecten, zoals kansen voor nieuwe land- en tuinbouwgewassen en een langer zomerseizoen voor het toerisme. Net als voor andere deltagebieden in de wereld zal de situatie voor Nederland het meest worden bepaald door de ontwikkeling van de zeespiegelstijging in de komende eeuw(en).

Overstromingsrisico

Het overstromingsrisico langs de Nederlandse kust en rivieren is in de afgelopen tientallen jaren toegenomen doordat meer mensen in de laaggelegen gebieden zijn gaan wonen. Daarbij is steeds meer kapitaal in deze gebieden geïnvesteerd. Volgens de meest recente KNMI-scenario's voor klimaatverandering kan de zeespiegel voor

Figuur 2.9
Mogelijke klimaatveranderingen 2071-2100 ten opzichte van referentie 1981-2010, volgens KNMI'14-scenario's



Bron: KNMI'14-scenario's

Het klimaat in Nederland zal verder veranderen, maar in welke mate is nog onzeker. Volgens de KNMI'14-scenario's kan de temperatuur in Nederland richting het einde van deze eeuw stijgen met 1,3 tot 3,7°C en wordt het zowel natter (in de winter) als droger (in de zomer). De verwachte wateraanvoer via de Rijn neemt in de zomer af; piekafvoeren die eens in de duizend jaar voorkomen, kunnen enigszins afnemen of juist fors toenemen.

de Nederlandse kust in de periode 2071-2100 (gemiddeld jaar: 2085) met 25 tot 80 centimeter zijn gestegen ten opzichte van de periode 1981-2010. Voor 2100 wordt een zeespiegelstijging verwacht met een bovenwaarde van 100 centimeter, maar bij een meer extreme klimaatverandering en het versneld afsmelten van het landijs is een snellere stijging denkbaar. Het is nog niet duidelijk of de hoogte van stormvloed voor de Nederlandse kust zal toenemen.

Studies laten zien dat extreem hoge afvoeren van de Rijn en de Maas in de periode 2071-2100 kunnen toenemen tot maximaal 30 procent in vergelijking met de periode 1961-1990 (figuur 2.9). In de benedenlopen van de grote rivieren worden de

extreem hoge waterstanden bepaald door een combinatie van hoge rivierafvoeren en opstuwing vanuit de zee of het IJsselmeer. Overigens hoeven deze rivierafvoeren en opstuwing op zichzelf niet extreem te zijn. De combinatie van (vaker) hoge rivierafvoeren en een (verder) stijgende zeespiegel vergroot de uitdaging om het rivierwater veilig naar zee te kunnen blijven afvoeren.

Voor de Nederlandse kustbescherming is het uitgangspunt 'zacht waar het kan, hard waar het moet'. Het Deltaprogramma stelt een Adaptatieagenda Zand op om met zandsuppleties te werken aan een veilige, economisch sterke, ecologisch robuuste en aantrekkelijke kust. De huidige suppletiehoeveelheden langs de kust (12 miljoen kubieke meter per jaar) zijn onvoldoende om het gehele kustfundament en de Waddenzee op de lange termijn met de zeespiegel te laten meegroeien. In de komende decennia moet het totale suppletievolume langs de Nederlandse kust naar verwachting worden verhoogd tot 20 miljoen kubieke meter per jaar of meer.

Volgens het Deltaprogramma luidt de strategie voor de hoogwaterbescherming van de rivieren en de grote meren tot 2050 als volgt: stap voor stap meegroeien met de veranderingen in de neerslagpatronen, de rivierafvoeren en de zeespiegelstijging. Na 2050 zijn mogelijk grootschaliger ingrepen in het hoofdwatersysteem nodig. Dit zal afhankelijk zijn van de sociaaleconomische en klimatologische situatie. Een definitief besluit over de daadwerkelijke uitvoering van grootschalige ingrepen is nu nog niet nodig.

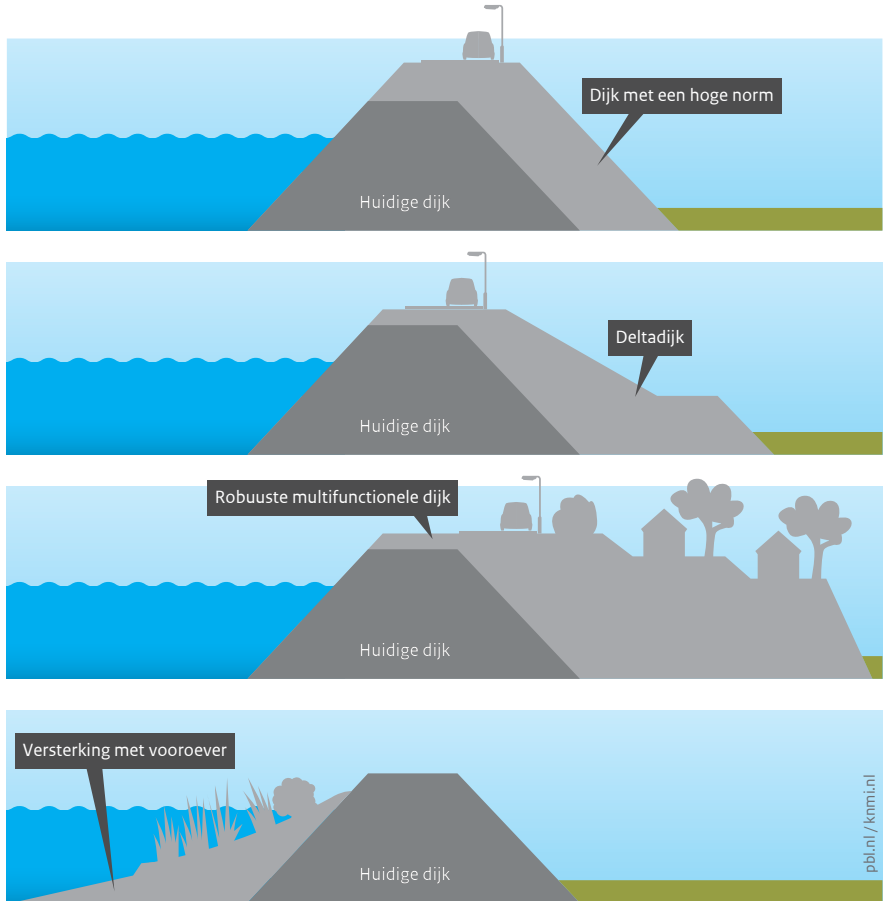
Voor dijktrajecten waar de gevolgen van een doorbraak buitengewoon groot kunnen zijn, zullen strenge normen gaan gelden. Vooral in het rivierengebied kunnen doorbraakbestendiger dijken een middel zijn om dergelijke strenge normen te realiseren. Doorbraakbestendiger dijken zijn zeer robuuste dijken die het overstromingsrisico aanzienlijk reduceren. Waar deze dijken kunnen worden gecombineerd met bijvoorbeeld stedelijke ontwikkeling, is een multifunctionele inrichting mogelijk. Figuur 2.10 schetst een aantal typen doorbraakbestendiger dijken.

Wateroverlast in het stedelijk en landelijk gebied

Net als in veel andere landen is het stedelijk en landelijk gebied in Nederland niet ontworpen om te kunnen omgaan met de zwaardere buien die nu al optreden en met de verdere intensivering van piekbuien die de komende decennia mag worden verwacht (zie hoofdstuk 1). Nu al valt er af en toe zoveel neerslag in zo korte tijd dat landbouwgronden en straten in het stedelijk gebied blank komen te staan en het water de huizen binnen stroomt. Recente voorbeelden zijn in Nederland de zeer zware buien van juli 2014 en in het buitenland de intensieve neerslag die in Kopenhagen tot grote schade heeft geleid en in het Verenigd Koninkrijk ernstige overstromingen en maatschappelijke ontwrichting tot gevolg had.

Zonder forse aanpassingen in het stedelijk gebied kunnen wateroverlast en schade door zware buien vaker gaan voorkomen, zowel in de zomer als in de winter. De maatregelen om de stad klimaatbestendiger te maken, laten zich veelal goed combineren met het vervangen van de riolering (aanpassing dimensionering), het vergroten van de ondergrondse opslagcapaciteit tijdens nieuwbouw- en herstructureringswerken, en met

Figuur 2.10
Opties voor dijkversterking



Bron: PBL

Het klimaat in Nederland zal verder veranderen, maar in welke mate is nog onzeker. Volgens de KNMI'14-scenario's kan de temperatuur in Nederland richting het einde van deze eeuw stijgen met 1,3 tot 3,7°C en wordt het zowel natter (in de winter) als droger (in de zomer). De verwachte wateraanvoer via de Rijn neemt in de zomer af; piekafvoeren die eens in de duizend jaar voorkomen, kunnen enigszins afnemen of juist fors toenemen.

maatregelen die de kwaliteit van de leefomgeving in de stad verbeteren, zoals de aanleg van groene daken, parken, vijvers en bijvoorbeeld waterpleinen (zie foto; zie ook paragraaf 2.4). Om de kosten te beperken en de genoemde kansen voor meekoppelen te benutten, is het van belang dat klimaatopgaven al vroeg in de planvorming en de ontwerpfase van projecten worden meegenomen.



Door een slimme inrichting met bijvoorbeeld de aanleg van waterpleinen kan wateroverlast in de stad door hevige regenbuien worden voorkomen (Water Plaza, Bentheimplein Rotterdam).

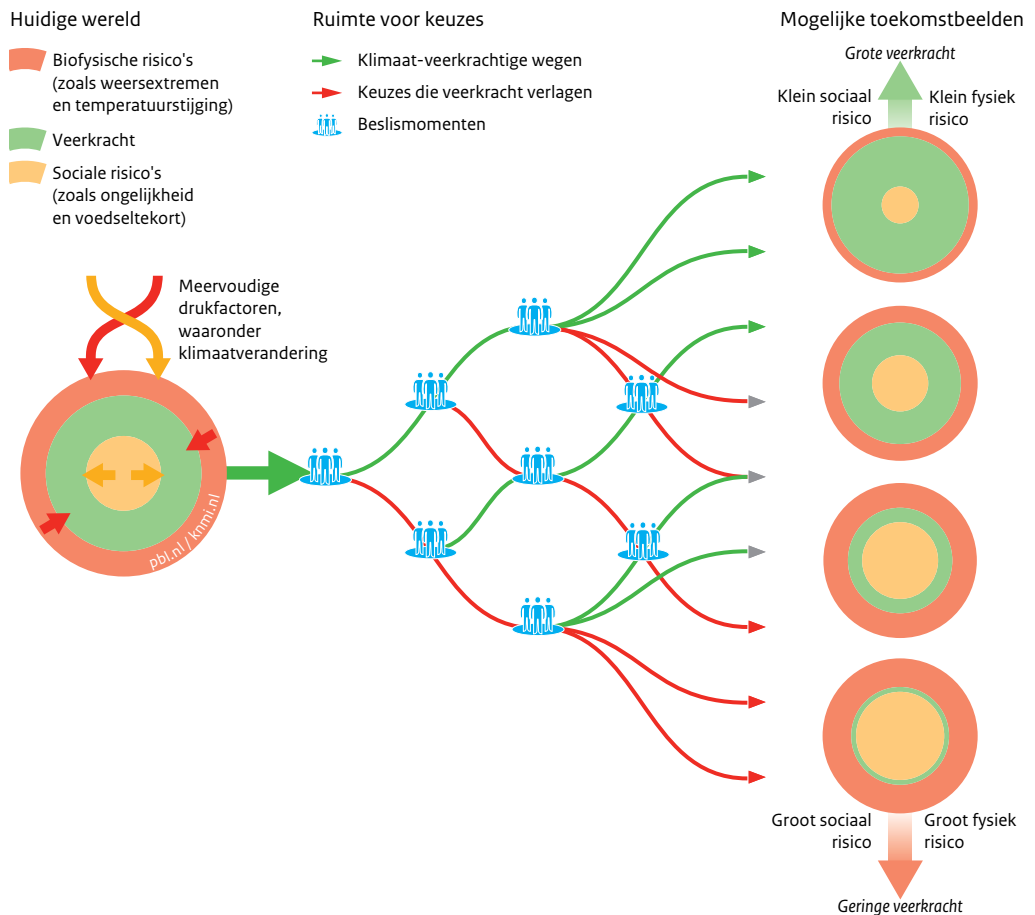
2.5 Adaptatiepaden: basis voor effectieve adaptatiestrategieën

Het Deltaprogramma richt zich op de lange termijn (2050) en omvat ook maatregelen voor de korte termijn. Deze maatregelen moeten worden genomen in het licht van onzekerheden over de sociaaleconomische ontwikkelingen en klimaatverandering. Hoe op de korte termijn de juiste maatregelen te nemen? Dat wil zeggen: maatregelen die te hoge of juist te lage investeringen voorkomen en die de mogelijkheid openhouden om op de langere termijn over te stappen op andere maatregelen als dat op grond van de sociaaleconomische ontwikkelingen en/of klimaatverandering nodig blijkt.

Dit kan door maatregelen uit te werken langs zogenoemde adaptatiepaden. Dit zijn combinaties van in de tijd aan elkaar geschakelde strategieën in een veranderende wereld. Door uit te gaan van verschillende scenario's van klimaatverandering en sociaaleconomische ontwikkelingen, kunnen verschillende adaptatiepaden worden verkend. Zo kan een breed palet aan mogelijke strategieën voor klimaatadaptatie in beeld worden gebracht, waaruit bestuurders kunnen kiezen. Bij de juiste keuzes biedt dit palet voldoende flexibiliteit om van strategie te veranderen als de sociaaleconomische ontwikkelingen of klimaatverandering daartoe aanleiding geven. Deze door het IPCC gepresenteerde werkwijze (figuur 2.11) krijgt in het Deltaprogramma vorm onder de naam 'Adaptief deltamanagement'. Even belangrijk als het palet aan strategieën is in het adaptief deltamanagement het zoeken naar innovatieve oplossingen in samenhang met de maatschappelijke ambities van andere partijen. Zo kan een grotere effectiviteit van de investeringen worden bereikt en meerwaarde worden gecreëerd.

De veerkracht van de aarde staat onder druk van verschillende stressfactoren, waaronder klimaatverandering en sociaaleconomische factoren (links). De keuzes voor maatregelen en strategieën om met die stressfactoren om te gaan, bepalen mede hoe de wereld er in de toekomst uitziet (rechts). Die keuzes zijn een palet aan mogelijke adaptatiepaden met daarbinnen beslismomenten waarop op een andere strategie kan worden overgestapt (midden). De keuzes kunnen leiden tot adaptatiepaden naar een klimaatbestendige wereld met een lager risico voor, onder meer, de gevolgen van klimaatverandering (groen) of tot adaptatiepaden met een hoger risico en een verminderde veerkracht van de aarde (rood).

Figuur 2.11
Invloed van keuzes op veerkracht en biofysische en sociale risico's



Bron: IPCC WGII 2014

Droogte en zoetwatervoorziening

Watertekorten zijn in Nederland in de zomer een normaal verschijnsel en leveren in het algemeen geen problemen op. Uitzonderingen zijn extreem droge zomers, zoals die van 1976 en (in mindere mate) 2003. 1976 was het droogste jaar sinds het begin van de waarnemingen. De kans op een zomer als die van 1976 wordt geschat op eens in de honderd jaar. Tijdens deze extreem droge zomers leden vooral de landbouw en natuur (bosbranden) veel schade, maar ook bleek in 2003 de elektriciteitsproductie in het gedrang te kunnen komen, door een tekort aan koelwater uit de Rijn, en bleek een lokale overstroming op te kunnen treden door het uitdrogen van een veendijk (Wilnis). Dergelijke droge zomers met grote watertekorten zullen waarschijnlijk steeds vaker voorkomen (zie figuur 2.7 en hoofdstuk 1).

Tot het midden van deze eeuw worden ten aanzien van de zoetwatervoorziening en de scheepvaart op de rivieren voornamelijk geen grote knelpunten verwacht. Op langere termijn kan dat geheel anders komen te liggen. Zo kunnen als gevolg van klimaatverandering lage Rijnafvoeren bij Lobith in de periode 2070-2100 afnemen met 10 tot maximaal 30 procent ten opzichte van de periode 1961-1990 (figuur 2.9). Voor de Maas worden vergelijkbare afnames verwacht.

Binnen het Deltaprogramma wordt per regio en per functie een voorzieningenniveau uitgewerkt. Slimmer en zuiniger omgaan met het beschikbare grond- en oppervlaktewater is het uitgangspunt. Dit vraagt ook bij de zoetwatervoorziening de nodige aanpassingen en innovaties, zowel bij de gebruiker als bij de overheid. Mogelijke voorbeelden zijn het terugdringen van het watergebruik en een beter voorraadbeheer door peilgestuurde drainage en 'actief grondwaterbeheer' op de hoge gronden en meer flexibiliteit van het waterpeil van het IJsselmeer om de zoetwaterbuffer te vergroten.

2.6 Zoutindringing

Als de zeespiegel stijgt, kan in de laaggelegen kustgebieden de zoutbelasting via het grondwater toenemen doordat de druk op het grondwater toeneemt. Dit geldt ook voor Nederland. Uit modelstudies blijkt dat de invloed van de zeespiegelstijging op het grondwater in de laaggelegen kustgebieden in de loop van deze eeuw beperkt blijft tot een strook van ongeveer 10 kilometer landinwaarts. De aanpassing van de zoutindringing via het grondwater als reactie op de zeespiegelstijging is een heel langzaam proces: het kan meerdere eeuwen duren voordat een nieuw evenwicht is bereikt.

Zoutindringing via het oppervlaktewater gaat veel sneller, niet alleen als gevolg van de zeespiegelstijging, maar ook doordat zeer lage rivierafvoeren nog lager worden en langer kunnen aanhouden. Het zeewater zal daardoor via het oppervlaktewater verder het land binnen komen.

Natuur en biodiversiteit

Ook in Nederland hebben de veranderende klimatologische omstandigheden al geleid tot verschuivingen binnen het jaar van seizoensgebonden activiteiten van verschillende planten- en diersoorten. Zo leggen zangvogels hun eieren nu gemiddeld negen dagen eerder dan twintig jaar geleden, is de vliegperiode van vlinders in dezelfde periode zeven dagen naar voren geschoven, verschoof de voorjaarspiek voor rupsen in de afgelopen zestig jaar met twaalf dagen en zijn de hazelaar, berk en beuk in de afgelopen vijftig jaar acht tot negen dagen eerder gaan bloeien.

Van de natuurgebieden zijn vooral de veengebieden en de bossen op de hoge zandgronden kwetsbaar voor klimaatverandering. Het veen oxideert nu al. Deels is deze oxidatie te wijten aan de ontwatering ten behoeve van (vooral) de landbouw: een ontwatering die ook leidt tot consolidatie van het veen en dus tot bodemdaling. Op de hoge zandgronden kunnen de bossen in de zomer te lijden krijgen van verdroging. De veerkracht van de bossen kan onder meer worden vergroot door de genetische en soortendiversiteit te vergroten, soorten te introduceren die beter bestand zijn tegen droogte en hitte, en bossen met elkaar te verbinden zodat soorten zich gemakkelijker kunnen verplaatsen. Maatregelen kunnen worden genomen om de neerslag in de winter zoveel mogelijk vast te houden voor de zomer en om de kans op de uitbraak van ziekteplagen en bosbranden te beperken. Bij het behoud van de veengebieden zou de waterstand in de gedraineerde gebieden (deels) weer kunnen worden hersteld (verhoogd).

Bij de huidige snelheid van zeespiegelstijging en de huidige volumes zand die regelmatig op de kust worden gesuppleerd, wordt genoeg zand de Waddenzee ingevoerd om de getijplaten met de zeespiegelstijging te laten meegroeien. Als de zeespiegelstijging in de toekomst gaat versnellen en de bodem onder de Waddenzee (snel) blijft dalen, kan deze zandaanvoer te beperkt blijken. Dan kan het voortbestaan van de Waddenzee, en daarmee van de Waddeneilanden, in zijn huidige vorm en omvang worden bedreigd. De onzekerheden in de kennis over de manier waarop de Waddenzee op de (relatieve) zeespiegelstijging reageert, zijn echter groot.

Voedselvoorziening

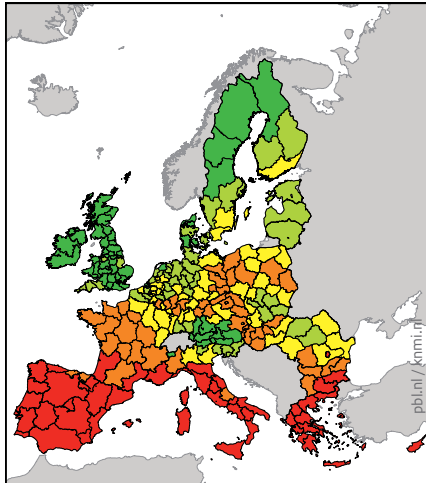
In de eerstkomende decennia zal klimaatverandering naar verwachting slechts een beperkt effect hebben op de opbrengsten van de land- en tuinbouw in Nederland. Een hogere CO₂-concentratie en de hogere temperatuur kunnen in de toekomst leiden tot hogere landbouwopbrengsten en een verlenging van het groeiseizoen (figuur 2.13). In de loop van deze eeuw worden echter in toenemende mate negatieve effecten verwacht. Het gaat daarbij om de verminderde waterbeschikbaarheid op de hogere zandgronden, de verwachte toename van verzilting in laag-Nederland en de toename van oogstschades door weersextremen, zoals hagelbuien, piekbuien en hittegolven. De land- en tuinbouwsector zal zich de komende tientallen jaren naar verwachting goed aan de gevolgen van klimaatverandering kunnen aanpassen. Dit kan onder andere door *remote sensing*-informatie over droogte te benutten, steeds meer kennis te ontwikkelen over het efficiënter gebruik van water, of minder watervragende gewassen te verbouwen.

2.7 Natuurbranden: een onderschat omgevingsrisico

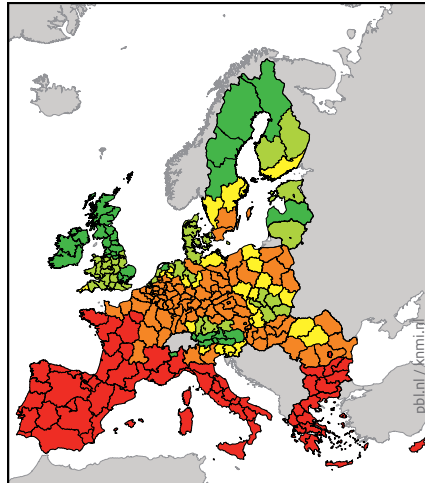
Door klimaatverandering neemt het risico op bosbranden waarschijnlijk toe, ook in Nederland (figuur 2.12). Natuurgebieden zijn in Nederland intensief verweven met uiteenlopende gebruiksfuncties en vitale infrastructuur. Een natuurbrand heeft dan ook niet alleen gevolgen voor de natuur, maar ook voor het verkeer, de economie, de recreatie en de samenleving als geheel. Zo halen drinkwaterbedrijven een substantieel deel van hun drinkwater uit in natuurgebieden gelegen putten.

Figuur 2.12
Risico van bosbranden

Klimaat variabiliteit 1961 – 1990



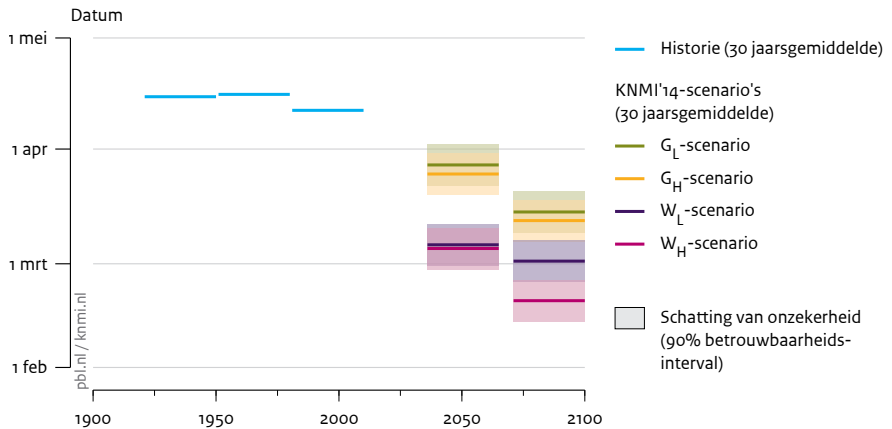
Middelhoge emissiepaden (A1B), 2041-2070



Bron: IPCC WG II 2014

Links: het risico op bosbranden in Europa bij het huidige klimaat, berekend over de periode 1961-1990.
Rechts: idem, voor de periode 2041-2070 op basis van de mogelijke klimaatverandering bij middelhoge emissiepaden in deze eeuw. Gebieden met een hoog tot zeer hoog risico op bosbranden schuiven op naar het noorden.

Figuur 2.13
Start van groeiseizoen in De Bilt



Bron: KNMI 2014

De start van het groeiseizoen, deels gebaseerd op waarnemingen in De Bilt, deels gebaseerd op berekeningen volgens de KNMI'14-scenario's voor 2050 en 2085. Het groeiseizoen start op de kalenderdag waarop de gemiddelde temperatuur boven 5°C komt en dat blijft tot ten minste 1 juli. De figuur laat zien dat de start van het groeiseizoen naar verwachting zal verschuiven van half april in de historische periode naar circa 1 maart aan het eind van deze eeuw.

De Nederlandse land- en tuinbouwsector heeft echter ook belangen in andere landen. Zo worden, bijvoorbeeld, veel bloemen, fruit en groentegewassen gekweekt in Afrika. Deze worden vervolgens naar Nederland gebracht om hier te worden verhandeld. De sector gebruikt dus ook veel ruimte en water in andere landen. In hoeverre klimaatverandering in andere landen leidt tot extra risico's voor de Nederlandse landbouw, is nog niet goed onderzocht.

De Nederlandse beroepsvisserij bestaat uit de visserij op zee en in de binnenwateren, en uit aquacultuur. Vooral de zeevisserij zal de gevolgen van klimaatverandering gaan merken. Omdat Nederlandse trawlers ook in tropische wateren vissen, is de migratie van vissoorten op wereldschaal relevant voor de Nederlandse visserij. In de voor de Nederlandse zeevisserij belangrijke gebieden voor de kust van West-Afrika en Zuid-Amerika wordt op langere termijn een lagere visproductie verwacht, maar de sector heeft waarschijnlijk voldoende tijd om zich aan te passen aan de veranderingen in de productiviteit en de verspreiding van de vissoorten. Dit vraagt wel aandacht voor het tijdig aanpassen van de visrechten in de gebieden waar de verschuivingen optreden. Voor visserij in de binnenwateren zal klimaatverandering zowel voor- als nadelen bieden. Opwarming van het water zal mogelijk nadelig zijn voor zalmachtigen en andere koudwatervissen en waarschijnlijk voordelen opleveren voor karperachtigen en

baarzen. In het algemeen lijken de mogelijke effecten van klimaatverandering voor de recreatieve visserij in de binnenwateren gering.

Energievoorziening

De klimaateffecten met de grootste impact op het energiesysteem in Nederland zijn langdurige droogte, extreme temperaturen, extreme buien, zeespiegelstijging, verhoogde rivierwaterafvoer en harde windstoten.

Door extreme buien of overstromingen kunnen cruciale punten in het energienetwerk onder water komen te staan. Wanneer deze situatie dreigt, zal het netwerk preventief moeten worden uitgeschakeld om directe schade aan de infrastructuur zoveel mogelijk te beperken. Deze maatregel heeft echter indirecte schade tot gevolg doordat delen van Nederland zonder stroom komen te zitten. Een toename van harde windstoten kan nadelige gevolgen hebben voor de opwekking van energie door windmolens, omdat deze bij een te harde wind moeten minderen in capaciteit of zelfs volledig moeten worden uitgeschakeld. En elektriciteitscentrales kunnen vaker te maken krijgen met beperkingen bij het lozen van koelwater in de rivieren, namelijk als het rivierwaterpeil door droogte of hitte te laag komt te staan of de temperatuur van het water te hoog wordt. In Nederland worden centrales echter steeds vaker aan de kust gebouwd, waardoor dit probleem zich minder voor zal doen.

Klimaatverandering kan ook leiden tot de besparing van kosten, bijvoorbeeld doordat huishoudens en bedrijven in de winter minder energie gebruiken. De huidige trend dat steeds meer energie decentraal wordt opgewekt (windmolens, zonnepanelen, enzovoort), kan de robuustheid van het energiesysteem vergroten mits het elektriciteitsnetwerk de fluctuaties van vraag en aanbod kan bijhouden. De ontwikkeling van een 'smart grid' kan ervoor zorgen dat energie efficiënter over het net wordt verdeeld, ook als extreem weer op enkele locaties tot problemen leidt.

De mogelijke maatregelen en strategieën voor de adaptatie van de energievoorziening zijn voor Nederland niet anders dan voor de meeste andere landen (zie paragraaf 2.4). De komende decennia echter zal een steeds groter deel van de energie afkomstig zijn van duurzame energiebronnen, zoals zonne-energie, windenergie en biomassa (zie hoofdstuk 3). Doordat hierbij een deel van de energieproductie verschuift van de grote energiebedrijven naar kleinere energieproducenten, zal de energievoorziening ook gevoeliger worden voor weersextremen zoals piek- en onweersbuien, hagelbuien en windstille periodes. In hoeverre hierdoor risico's voor de energievoorziening groter of kleiner worden, vraagt nog nader onderzoek.

Gezondheid

De kwetsbaarheid van Nederland voor infectieziekten is, ten opzichte van andere landen, laag tot gemiddeld. Zo is de kans dat malaria hier zal terugkeren buitengewoon laag, dankzij het hoge niveau van de gezondheidszorg. Wel is de afgelopen vijftien jaar in Nederland het aantal gevallen van de ziekte van Lyme, een besmetting door met *Borrelia* geïnfecteerde teken, verdrievoudigd. Een relatie met de opwarming van het klimaat is echter (nog) niet met zekerheid vastgesteld.

Voor gezondheidseffecten door allergenen (zoals pollen) daarentegen wordt de kwetsbaarheid van Nederland als hoog beoordeeld. Ongeveer 15 tot 20 procent van de Nederlandse bevolking heeft last van allergische rhinitis. Het aantal 'allergiedagen' is al toegenomen, bijvoorbeeld doordat pollen eerder in het seizoen vrijkomen, maar ook door de komst van de eikenprocessierups (met zijn brandharen) naar Nederland. De blootstelling aan UV-straling zal naar verwachting niet verergeren. Wel neemt het aantal gevallen van huidkanker in de periode 2011-2030 naar verwachting toe, namelijk met 60 procent voor mannen en 30 procent voor vrouwen. Deze toename is vooral te wijten aan het feit dat mensen steeds ouder worden.

Voorlopige berekeningen door TNO en de Universiteit van Maastricht (ICIS) op basis van de KNMI'14-scenario's laten zien dat de afname van door koude veroorzaakte sterfte in de winter in Nederland in de toekomst groter is dan de toename van door warmte veroorzaakte sterfte in de zomer.

Een belangrijk aspect bij klimaatadaptatie is een goede informatievoorziening, zodat tijdens hitteperiodes mensen gericht van informatie kunnen worden voorzien. Het Nationaal Hitteplan van het ministerie van Volksgezondheid Sport en Welzijn biedt in samenhang met het werk van de Gemeentelijke Gezondheidsdiensten (GGD's) hiervoor een goed vertrekpunt. Het moet echter nog verder worden verankerd in de praktijk en zich ook meer richten op zelfstandig wonende kwetsbare groepen zoals ouderen en chronisch zieken. Het Deltaprogramma streeft ernaar dat de Nederlandse steden in 2050 klimaatbestendig zijn, dat wil zeggen dat ze bestand zijn tegen de verwachte toenemende neerslag, droogte en hitte.

Infrastructuur en transport

In Nederland zullen de effecten van klimaatverandering op de infrastructuur voor transport en vervoer zowel negatief als positief zijn. Extremer weer kan tot meer schade leiden en tot hogere kosten voor maatregelen om die schade te voorkomen. Een voorbeeld is de vervorming van rails tijdens hete zomers. En de binnenvaart over bijvoorbeeld de Rijn kan na 2050 vaker te maken krijgen met (langere) periodes van laagwater, en dus met beperkingen voor de hoeveelheid lading die kan worden vervoerd. Aan de andere kant leiden de zachtere winters tot minder kosten voor het onderhoud van wegen. Zo zal het aantal dagen per jaar dat op gladde wegen zout moet worden gestrooid, waarschijnlijk afnemen (figuur 2.14).

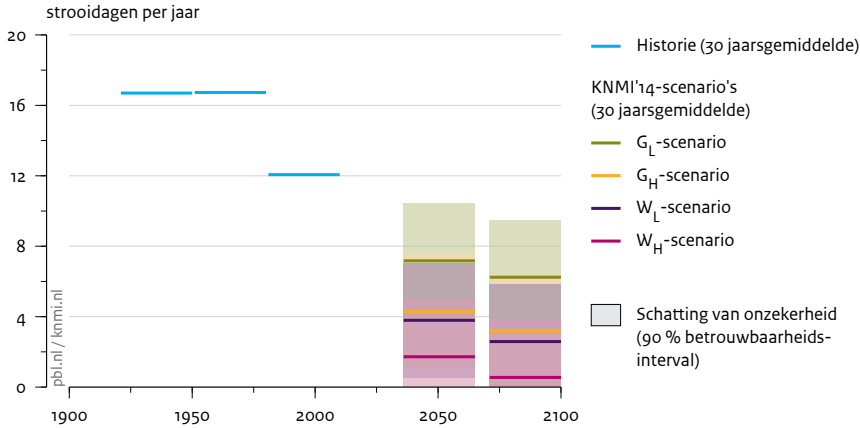
In Nederland kunnen verschillen in de zetting van de ondergrond en hoge temperaturen leiden tot breuken in leidingen, bijvoorbeeld voor water of gas. Voor de vitale infrastructuur in Nederland is vooral de relatie met het overstromingsrisico van belang.

Toerisme

Binnen Europa zullen in de loop van deze eeuw de stromen van toeristen in het zomerhalfjaar geleidelijk gaan verschuiven. De zomers in Zuid-Europa worden voor veel toeristen te heet, terwijl de zomers elders in Europa juist aantrekkelijker worden. Na 2050 zal het toerisme in Zuid-Europa daarom afnemen en in Noord-Europa en

Figuur 2.14

Aantal dagen dat op gladde wegen moet worden gestrooid in De Bilt



Bron: KNMI 2014

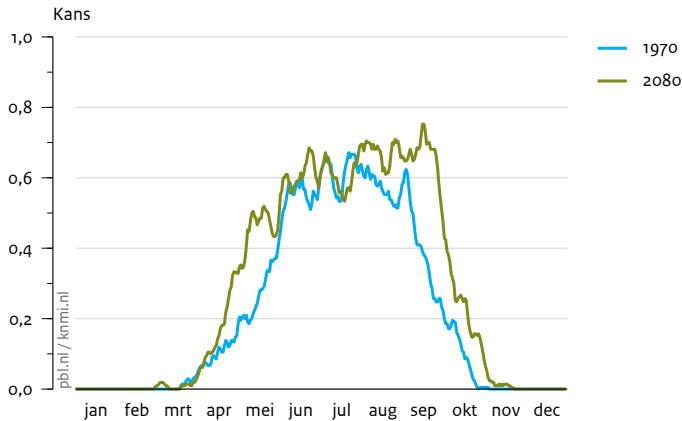
Index voor het aantal dagen per jaar in De Bilt dat op gladde wegen zout moet worden gestrooid. De index is deels gebaseerd op de waargenomen temperatuur en neerslag, en deels op de berekende temperatuur en neerslag volgens de KNMI'14-scenario's. De figuur laat zien dat het aantal strooidagen is afgenomen, van ruim 16 medio vorige eeuw tot 12 rond het begin van deze eeuw; het verwachte aantal strooidagen aan het eind van deze eeuw ligt in de range van 0 tot 10 dagen.

continentaal Europa toenemen. Ook Nederland wordt dan aantrekkelijker voor toeristen: de zomers worden warmer en duren langer (figuur 2.15). Waarschijnlijk zullen ook meer Nederlanders vakantie houden in eigen land.

Gevolgen voor Nederland van klimaateffecten elders

Nederland is een internationale netwerkeconomie die op veel manieren is verbonden met Europa en de wereld, bijvoorbeeld via handelsstromen, goederen- en grondstofstromen, energienetwerken, financiële stromen, datastromen, immigratie en emigratie, toerisme en verkeer. Nederland zelf ligt in een zone waar, uitgaande van een adequaat adaptatiebeleid, de effecten van klimaatverandering naar de huidige inzichten beheersbaar zijn. In andere regio's, zoals Zuid-Europa en gebieden rond de evenaar, zijn de klimaateffecten naar verwachting veel sterker, zo blijkt uit het IPCC-rapport. De effecten van klimaatverandering buiten de Nederlandse grenzen kunnen voor Nederland vaker leiden tot verstoringen als gevolg van vaker optredende weersextremen, zoals overstromingen, overvloedige neerslag, droogte en hittegolven. De Nederlandse internationale netwerkeconomie betekent ook dat elders in de wereld ruimte, grondstoffen en water worden gebruikt voor het maken van producten en het verbouwen van gewassen voor de Nederlandse markt of voor de Nederlandse handel met andere landen. Zo is de Nederlandse economie ook verbonden met de mogelijke gevolgen van klimaatverandering in andere delen van de wereld.

Figuur 2.15
Kans op aantrekkelijk weer



Bron: PBL 2012

Als gevolg van klimaatverandering wordt het toerismeseizoen in Nederland in de periode 1970-2085 mogelijk langer. Aantrekkelijk weer is uitgedrukt als de gemiddelde kans op een voor zomerrecreatie geschikt weertype per dag van het jaar.

Klimaatadaptatie in het beleid: Deltaprogramma en Nationale Adaptatiestrategie

Het IPCC zet het kader voor het klimaatadaptatiebeleid helder neer. De risico's van klimaat effecten bestaan uit een combinatie van de schadelijke effecten van klimaatverandering zelf, de blootstelling hieraan en de kwetsbaarheid voor schadelijke gevolgen (vergelijk figuur 2.1). Daarnaast is aandacht gewenst voor de mogelijke voordelen van het veranderende klimaat. Dit betekent dat klimaatadaptatie gaat over het beperken van de risico's en het benutten van de kansen van klimaatverandering. Adaptatie wordt daarmee niet gezien als een op zichzelf staande opgave, maar als een multidisciplinaire opgave waarbij de interactie tussen de klimaat effecten en de maatschappelijke en sociaaleconomische ontwikkelingen het noodzakelijk vertrekpunt is. Nederland heeft zijn eerste brede Nationale Adaptatiestrategie ingezet in 2006 (Adaptatie Ruimte en Klimaat, ARK). In het verlengde daarvan heeft de Rijksoverheid in de periode 2007-2014 via de onderzoeksprogramma's 'Klimaat voor Ruimte/Ruimte voor Klimaat' en 'Kennis voor Klimaat' de kennisontwikkeling en bewustwording in Nederland rond klimaatverandering en -adaptatie versterkt. Met de start van het Deltaprogramma in 2010 heeft het Rijk de prioriteiten voor de klimaatadaptatie herijkt. Deze liggen in het Deltaprogramma nadrukkelijk bij de watergerelateerde klimaatrisico's: waterveiligheid, zoetwatervoorziening en het klimaatbestendig maken van steden. In 2013 heeft het kabinet als onderdeel van de Klimaatagenda 'Weerbaar, welvend en groen' een nieuwe integrale Nationale Adaptatiestrategie aangekondigd. Deze nieuwe Nationale Adaptatiestrategie wordt gepresenteerd in 2016. Hierin zullen, in aanvulling op

het al bestaande Deltaprogramma, de klimaatrisico's op andere beleidsterreinen dan water worden geadresseerd. Zowel in het Deltaprogramma als in de Nationale Adaptatiestrategie streeft het Rijk naar een nauwe samenwerking met provincies, gemeenten, waterschappen, sectoren en private partijen.

Ook binnen de Europese Unie staat klimaatadaptatie hoog op de agenda. De Europese Commissie heeft in 2013 de EU-strategie voor klimaatadaptatie aangenomen. Met deze strategie wil de Europese Commissie de coördinatie en uitwisseling van informatie tussen EU-landen stimuleren en bereiken dat landen in hun beleid voor verschillende sectoren maatregelen voor klimaatadaptatie meekoppelen. Het Climate-ADAPT-internetportaal is daarbij een belangrijk middel om kennis over klimaatadaptatie tussen landen onderling te delen, resultaten uit EU-onderzoeksprogramma's te ontsluiten en het EU-beleid over klimaatadaptatie uit te dragen. Zie de site <http://climate-adapt.eea.europa.eu/>.

IPCC-Werkgroep III

Beperken klimaatverandering door reductie broeikasgasemissies

Samenvatting

Het klimaat verandert mede als gevolg van menselijke activiteiten die leiden tot de uitstoot van broeikasgassen en daardoor tot een verhoogde concentratie van deze gassen in de atmosfeer. Vooral het toenemende gebruik van fossiele brandstoffen zoals aardolie, steenkolen en aardgas leidt ertoe dat die uitstoot al tientallen jaren stijgt. In de eerste tien jaar van deze eeuw steeg de mondiale uitstoot van broeikasgassen anderhalf keer zo snel als in de dertig jaar daarvoor. Dit komt door de sterk toegenomen economische activiteiten in opkomende economieën als China, Brazilië en Mexico en het stijgende gebruik van steenkolen. De emissiegroei vindt plaats in bijna alle sectoren. Alleen in de land- en bosbouw lijkt de groei grotendeels tot staan te zijn gebracht. In sommige rijke regio's, zoals Europa, neemt de uitstoot door maatregelen af, maar dat is onvoldoende om de temperatuurstijging tot 2°C te beperken.

Klimaatverandering is nu al overal waarneembaar en zal gedurende de komende eeuw verder doorzetten. Ernstige gevolgen van klimaatverandering kunnen alleen worden voorkomen als de uitstoot van broeikasgassen de komende decennia wereldwijd sterk wordt verminderd. Dit vraagt om internationaal klimaatbeleid, waaraan de rijkere landen, waaronder Nederland, een grote bijdrage zullen moeten leveren.

Van groei naar daling: talrijke opties

Om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen, is een groot aantal maatregelen beschikbaar. Elk van deze maatregelen heeft zijn eigen mogelijkheden, kosten, voor- en nadelen, en invloed op de economie. Bekende voorbeelden zijn maatregelen als energiebesparing en het gebruik van zonne- en windenergie. Toepassingen bestaan in alle sectoren, zoals energieopwekking, industrie, vervoer en huishoudens, de inrichting van stad en platteland, en de landbouw en bosbouw. Er zijn ook manieren om broeikasgas actief uit de atmosfeer te halen, zoals het gebruik van bio-energie in combinatie met het afvangen en opslaan van kooldioxide, of – meer controversieel – het direct onttrekken van koolstofdioxide aan de atmosfeer.

In politieke debatten wordt vaak uitgegaan van de zogenoemde 2°C-grens: om de gevolgen van klimaatverandering te beperken, zou de aarde met niet meer dan gemiddeld 2°C mogen opwarmen ten opzichte van het pre-industriële niveau. Om onder die grens te blijven, zal de toename van de broeikasgasemissies snel moeten worden omgebogen in een daling.

Scenario's

Hoe snel de emissies moeten worden omgebogen, kan worden onderzocht met behulp van scenario's. Deze scenario's beschrijven hoe de emissies zich ontwikkelen zonder extra maatregelen, maar ook hoe de inzet van maatregelen kan leiden tot een lagere uitstoot. Voor een goede kans op een temperatuurstijging van minder dan 2°C ten opzichte van het pre-industriële niveau moet de uitstoot van broeikasgassen drastisch omlaag, zo blijkt uit een inventarisatie van 1.200 scenario's. Dit betekent dat de uitstoot rond 2030 terug moet zijn op het niveau van 2010, en daarna moet dalen met 3 tot 5 procent per jaar. Houdt de emissiegroei langer aan, dan daalt de kans om onder de 2°C-grens te blijven snel. De schattingen van de kosten voor zo'n ombuiging lopen ver uiteen. Een gemiddelde schatting is dat de groei van de economische consumptie (van goederen én diensten) in 2050 ongeveer 3 procent zal achterblijven bij de groei die voor de periode tussen 2010 en 2050 wordt verwacht (hierbij is geen rekening gehouden met de gevolgen van klimaatverandering). Dit komt neer op een *jaarlijks* lagere groei van de consumptie van ongeveer 0,06 procent ten opzichte van een scenario zonder beleid. Kosteneffectieve scenario's maken gebruik van een brede set aan technologieën, veranderingen in productiemethoden en gedragsverandering. Wordt een optie uitgesloten, dan leidt dit meestal tot hogere kosten.

Ontwikkelingen in Nederland

Nederland heeft, in navolging van de Europese Unie, een klimaatdoel geformuleerd voor 2020. Nederland moet de emissies van sectoren die niet onder het EU-emissiehandelssysteem vallen (de ETS) in 2020 met 16 procent hebben verminderd (ten opzichte van 2005). Nederland zal naar verwachting dit emissiedoel halen. Voor 2030 heeft de Europese Unie inmiddels een nieuw doel geformuleerd: 40 procent minder uitstoot ten opzichte van 1990. De Nederlandse doelstellingen voor 2030 zullen daarvan worden afgeleid. In 2050 wil de Europese Unie uitkomen op 80 tot 95 procent minder uitstoot dan in 1990. Nederland volgt deze doelstelling en zet in op een energievoorziening die in 2050 volledig duurzaam is. Hierbij krijgen het gebruik van energie uit biomassa en het opvangen en opslaan van CO₂ een prominente positie.

3.1 Beperken van de menselijke invloed op het klimaat

Het klimaat verandert als gevolg van menselijke activiteiten. Deze klimaatverandering is nu al waarneembaar en zal gedurende de komende eeuw verder doorzetten. De ernstigste gevolgen kunnen alleen worden voorkomen als de uitstoot van broeikasgassen snel wordt omgebogen in een sterke daling in plaats van een stijging. Hiervoor is een groot aantal maatregelen beschikbaar.

Maatregelen

Er is een keur aan maatregelen die de uitstoot van broeikasgassen kunnen tegengaan. Deze maatregelen zijn beschikbaar voor alle sectoren, zoals de energieopwekking, de industrie, het vervoer en de huishoudens, de inrichting van stad en platteland, en de land- en bosbouw. Elk van deze maatregelen heeft weer zijn eigen opbrengst, technisch potentieel, kosten, voor- en nadelen bij grootschalige toepassing, en invloed op industriële en economische activiteiten. Deze verschillen bovendien vaak per land of regio.

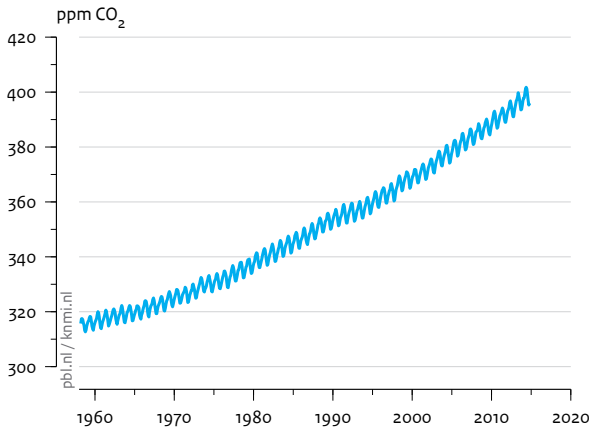
Uitgangspunt: beperken van opwarming

Het klimaat op aarde wordt voor een groot deel bepaald door de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer, die op haar beurt weer afhangt van de toe- en afvoer van broeikasgassen. De toe- en afvoer zijn normaal met elkaar in evenwicht, maar menselijke activiteiten verstoren dit: er worden meer broeikasgassen uitgestoten naar de atmosfeer dan op natuurlijke wijze wordt afgevoerd. Deze zogenoemde 'antropogene' broeikasgassen komen bijvoorbeeld vrij bij energieopwekking, transport, boskap, landbouw en veeteelt. De wetenschap laat zien dat deze uitstoot naar alle waarschijnlijkheid de dominante factor is achter de huidige klimaatverandering. Het IPCC legt verbanden tussen de concentratie van broeikasgassen¹ in de atmosfeer, de gemiddelde mondiale temperatuurstijging die daaruit resulteert, de uitstoot van CO₂ en andere broeikasgassen, en de maatregelen die nodig zijn om klimaatverandering tegen te gaan. Binnen de internationale politiek bestaat inmiddels consensus over het feit dat de ernstigste gevolgen van klimaatverandering moeten worden voorkómen. De wetenschap geeft geen uitsluitsel over welke gevolgen aanvaardbaar zijn en welke niet, maar wel is bekend dat de risico's en de schade van klimaatverandering toenemen naarmate de gemiddelde temperatuur stijgt. In internationale verdragen is vervolgens vastgelegd dat de uitstoot van broeikasgassen zodanig moet worden gereduceerd dat de toename van de gemiddelde temperatuur ten opzichte van het pre-industriële niveau onder 2°C blijft. Onder die grens blijven de gevolgen van klimaatverandering naar inschatting nog beperkt.

3.2 De trend in broeikasgassen: groei

In de eerste tien jaar van deze eeuw steeg de mondiale uitstoot van broeikasgassen anderhalf keer zo snel als in de dertig jaar daarvoor. Dit komt vooral door de toenemende economische activiteiten in opkomende economieën en het stijgende gebruik van steenkolen. De emissiegroei vindt plaats in

Figuur 3.1

Kooldioxideconcentratie in atmosfeer op Mauna Loa, Hawaii

Bron: IPCC WGIII 2014

De metingen op Mauna Loa (Hawaii) van de atmosferische CO₂-concentratie laten sinds 1960 een forse continue stijging zien, dit ondanks diverse wereldwijde economische crises. Het Mauna Loa Observatorium is het bekendste meetstation voor CO₂ in de atmosfeer en ligt ver weg van industriële bronnen.

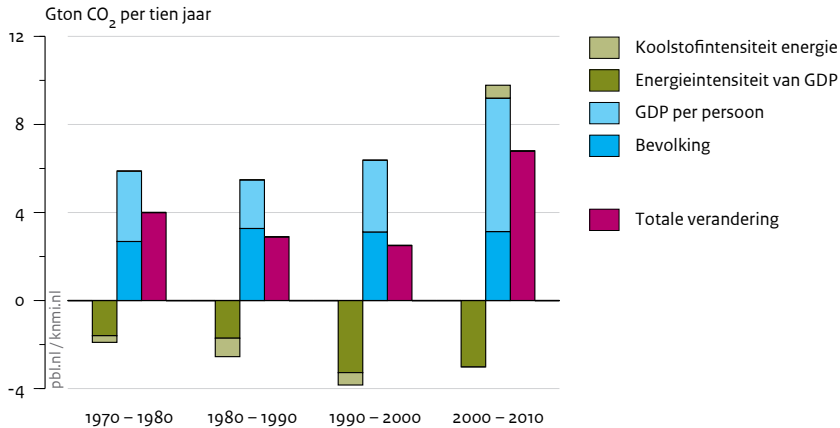
bijna alle sectoren. In 2010 lag de mondiale jaarlijkse uitstoot van broeikasgassen op bijna 50 miljard ton CO₂-equivalenten.

De huidige trends in de uitstoot en de concentraties van broeikasgassen laten zien dat een gemiddelde temperatuurstijging van 2°C al onvermijdelijk wordt. In 2014 steeg de atmosferische concentratie van CO₂, het belangrijkste broeikasgas, voor het eerst in miljoenen jaren langdurig boven het niveau van 400 ppm. Deze concentratie is veel hoger dan die rond 1850, toen de mens begon met grootschalige industriële en agrarische activiteiten en toen de concentratie van alle broeikasgassen samen nog rond 280 ppm CO₂-equivalenten lag. En ook rond 1850 was CO₂ het toonaangevende broeikasgas. De concentratie van CO₂ wordt gemeten op verschillende plaatsen in de wereld. Het oudste meetstation ligt op Mauna Loa, een berg op Hawaii. Het verloop van de concentratie wordt getoond in figuur 3.1. De overige broeikasgassen, zoals methaan, lachgas en halogeenhoudende, synthetische gassen, voegen daar omgerekend nog eens zo'n 30 tot 50 ppm CO₂-equivalenten aan toe.

De concentratie broeikasgassen in de atmosfeer loopt relatief snel op, en zelfs steeds sneller omdat de uitstoot van broeikasgassen toeneemt. Uit meetgegevens tot en met 2010 blijkt dat de uitstoot van broeikasgassen in de periode 2000-2010 jaarlijks met gemiddeld 2,2 procent toenam: ruim anderhalf maal zo snel als in de dertig jaar daarvoor. Ook in de periode 2010 tot 2013 bleef de uitstoot met hetzelfde tempo stijgen.

Figuur 3.2

Verandering van mondiale emissie van kooldioxide door verbranding van fossiele brandstoffen



Bron: IPCC WGIII 2014

De energie-intensiteit neemt al veertig jaar af, terwijl de CO₂-intensiteit sinds 2000 weer toeneemt. Dit komt vooral door een groter gebruik van steenkool.

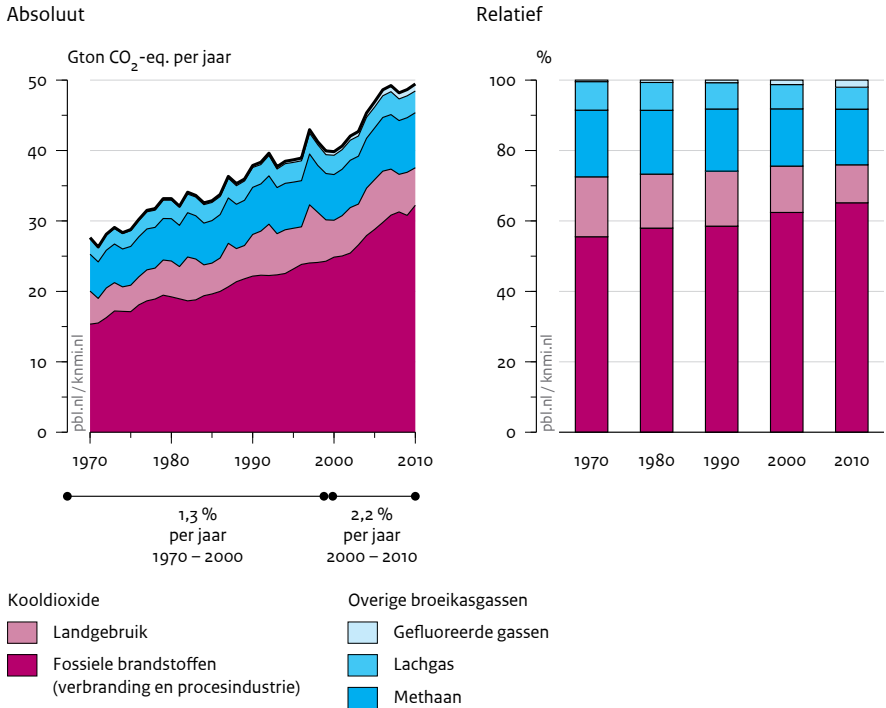
Oorzaken van de toename

De stijging van de wereldwijde uitstoot heeft twee belangrijke oorzaken: de toename van de economische activiteiten per hoofd van de bevolking en de bevolkingsgroei. Beide leiden tot meer vraag naar diensten, energie en materialen. Nieuwe technologieën maken dat weliswaar steeds efficiënter aan die vraag kan worden voldaan, maar dit is niet voldoende om te compenseren voor de effecten van de wereldwijde economische groei. Hoewel de energie-intensiteit voortdurend afneemt, is de CO₂-intensiteit (de uitstoot van CO₂ gedeeld door het bruto binnenlands product van alle landen ter wereld) van het wereldwijde energiegebruik in de eerste tien jaar van deze eeuw juist toegenomen, vooral doordat meer steenkool wordt gebruikt (zie figuur 3.2 en 3.3). Om de CO₂-emissies terug te dringen, zullen de energie-intensiteit van de economie samen met de koolstofintensiteit van de energie sneller moeten afnemen dan de groei van de economie en de bevolking.

Illustratief is dat ongeveer de helft van alle CO₂ die de mens tussen 1750 en 2010 in de atmosfeer bracht, is geproduceerd in de laatste veertig jaar. De economische crisis van 2007/2008 veroorzaakte een tijdelijke dip in de stijgende uitstoot.

In 2010 lag de mondiale jaarlijkse uitstoot van broeikasgassen op bijna 50 miljard ton CO₂-equivalenten. De groei kan worden ontleed in verschillende factoren: per gas, per sector en per regio.

Figuur 3.3
Mondiale emissie van broeikasgassen door menselijke activiteiten per type gas



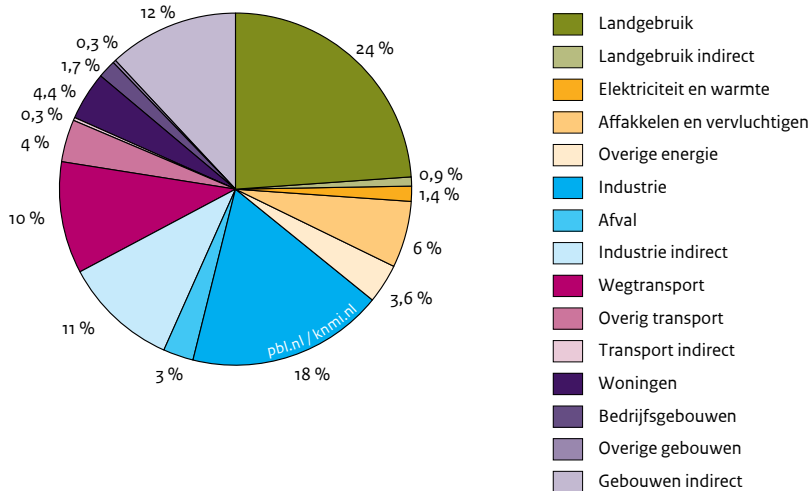
Bron: IPCC WGIII 2014

CO₂ uit fossiele brandstoffen en industriële processen is het belangrijkste broeikasgas. Andere belangrijke bijdragen komen van lachgas (N₂O), methaan (CH₄) en CO₂ uit landgebruik. Gefluoreerde gassen zijn een relatief kleine maar groeiende bron.

Verdeling per gas

CO₂ is het meest prominente broeikasgas, met een aandeel van drie kwart in de totale emissies tussen 1970 en 2010 (figuur 3.3). Deze CO₂ is afkomstig van verbrandingsprocessen en industriële processen, zoals de staal- en cementproductie (ontleden van kalksteen). Dat de uitstoot in de jaren 2001-2010 steeg, komt vooral doordat het gebruik van steenkool voor energieopwekking in die periode toenam. Landbouw en ontbossing zijn verantwoordelijk voor ruim 10 procent van alle uitstoot van broeikasgassen, al neemt dit aandeel wel af. Ongeveer een kwart van de broeikasgassen komt van methaan (16 procent, onder andere door rundvee, boskap, moerasgas, turfwinning, rijstwadi's en aardgaslekken), lachgas (6 procent, uit industriële processen) en synthetische gassen (2 procent, vooral halogeenhoudende drijfgassen en uit koel- en klimaatinstallaties).

Figuur 3.4
Mondiale emissie van broeikasgassen per sector, 2010



Bron: IPCC WGIII 2014

De indirecte uitstoot slaat op de uitstoot als gevolg van het stroom- en warmteverbruik. Deze is vooral groot bij de industrie ('industrie indirect') en bij gebouwen ('gebouwen indirect').

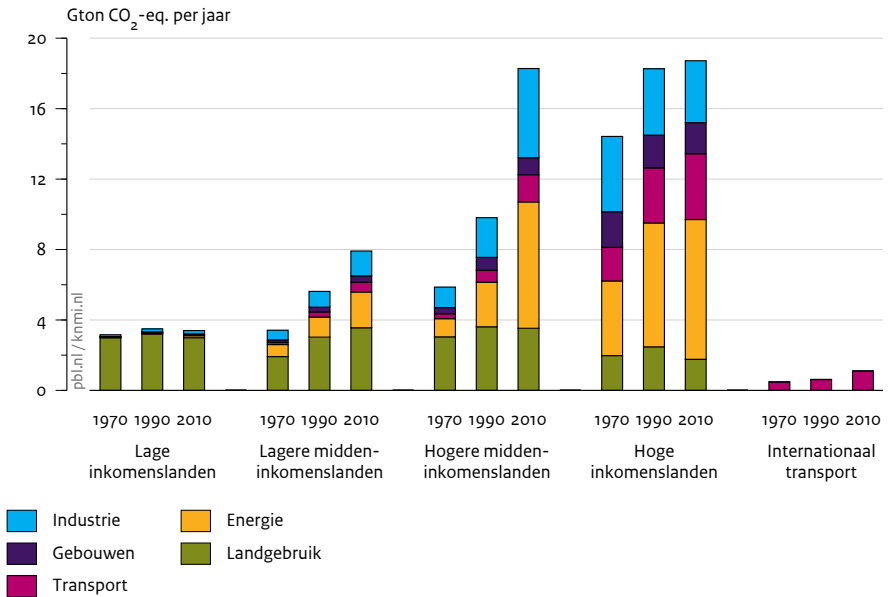
Verdeling per economische sector

De industrie is verantwoordelijk voor 31 procent van alle uitstoot van broeikasgassen, 19 procent komt voort uit gebouwen, 14 procent uit transport, 25 procent uit landgebruik en ongeveer 11 procent uit de energiesector (zie figuur 3.4). Sinds 2000 stijgt de uitstoot in al deze sectoren, behalve in de landbouw en de bosbouw.

Verdeling per land of regio

Naarmate het inkomen van landen toeneemt, stijgen de broeikasgasemissies als gevolg van de groei in de industrie, het transport, de bebouwde omgeving en de energieproductie (figuur 3.5). Per hoofd van de bevolking is de uitstoot in landen met hoge inkomens (een categorie gedefinieerd door de Wereldbank, waartoe ook Nederland behoort) vijf tot tien keer zo hoog als in landen met lage inkomens. Tien landen zijn samen verantwoordelijk voor 70 procent van de uitstoot. De emissies zijn vooral na 1950 snel gestegen. Over de periode 1970-2010 zijn de OECD-landen gezamenlijk verantwoordelijk voor meer dan 50 procent van de uitstoot, gevolgd door Azië (inclusief China) en de regio van de voormalige Sovjet-Unie met elk 17 procent (figuur 3.6). De laatste jaren stijgen de broeikasgasemissies relatief het snelst in de groep van groeiende economieën die een hoger gemiddeld inkomen hebben, zoals in China, Brazilië en Zuid-Afrika. Het traagst is de toename in de armste landen.

Figuur 3.5
Emissie van broeikasgassen naar inkomen



Bron: IPCC WGIII 2014

Naarmate het inkomen van landen toeneemt, stijgen de broeikasgasemissies als gevolg van de groei in de industrie, het transport, de bebouwde omgeving en de energieproductie. De hoge-inkomenslanden (meest rechts) zorgen voor een circa vijfmaal zo hoge uitstoot aan broeikasgassen als de lage-inkomenslanden (meest links).

3.3 Emissiepaden in de toekomst

Voor een redelijke kans op een temperatuurstijging van minder dan 2°C ten opzichte van het pre-industriële niveau moet de uitstoot van broeikasgassen drastisch omlaag, zo blijkt uit een inventarisatie van 1.200 scenario's. Dit betekent dat de uitstoot rond 2030 terug moet zijn op het niveau van 2010, en daarna moet dalen met 3 tot 5 procent per jaar. De schattingen van de kosten voor zo'n ombuiging lopen ver uiteen. Een gemiddelde schatting komt neer op een jaarlijks lagere consumptiegroei van ongeveer 0,06 procent.

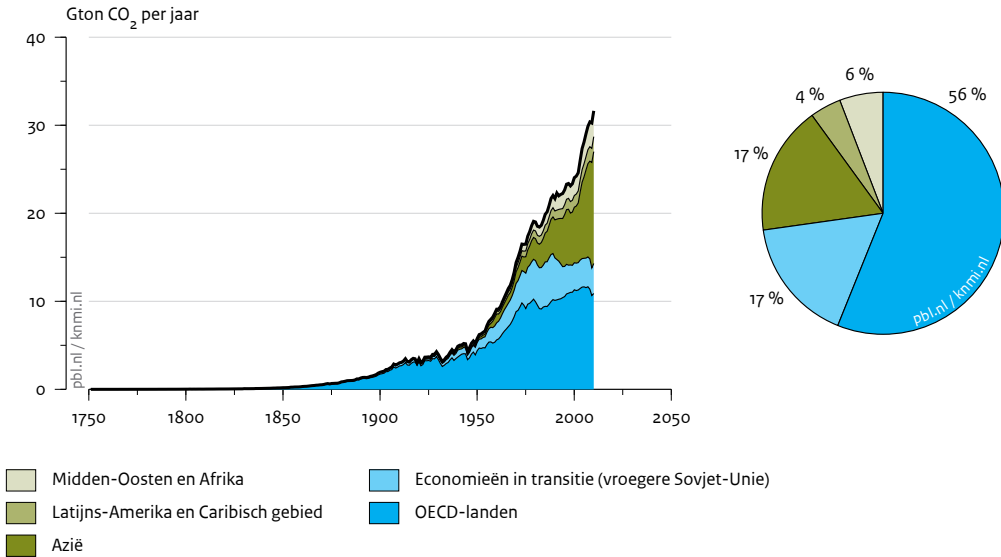
In de loop der jaren hebben onderzoekers over de hele wereld een groot scala geschetst aan mogelijke ontwikkelingen van de mondiale broeikasgasuitstoot, elk met een verschillend ambitieniveau voor het beperken van klimaatverandering. Deze 'emissiepaden' of 'scenario's' beschrijven de mogelijke ontwikkelingen voor sociaaleconomische aspecten en emissies tot aan het jaar 2030, 2050 en vaak ook 2100.

In de wetenschappelijke literatuur worden vier 'karakteristieke concentratiepaden' (in het Engels: *Representative Concentration Pathways*, of RCPs genoemd) beschreven die de

Figuur 3.6
Mondiale emissie van kooldioxide door menselijke activiteiten per regio

Per jaar

Totaal, 1970 – 2010



De ontwikkeling van de CO₂-uitstoot tussen 1750 en 2010 laat een sterke stijging zien na 1950. Over de periode 1970-2010 zijn de OECD-landen verantwoordelijk voor meer dan 50 procent van de uitstoot. De uitstoot in Azië neemt het snelst toe.

totale spreiding van alle scenario's in de literatuur vertegenwoordigen. De vier concentratiepaden variëren van hoge emissies zonder extra beleid (RCP8.6), via een matige (RCP6.0), een sterke (RCP4.5) naar een zeer sterke vermindering van de broeikasgasuitstoot (RCP2.6).

Referentiescenario's: scenario's zonder aanvullend beleid

Ongeveer 300 van de 1.200 scenario's in de IPCC-database zijn zogenoemde referentiescenario's: zij beschrijven de ontwikkeling bij het uitblijven van aanvullend beleid. Omdat zowel de wereldbevolking als de wereldeconomie de komende jaren naar verwachting blijft groeien, neemt in deze scenario's de uitstoot van broeikasgassen toe, en daarmee de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer en de ernst van klimaatverandering. Deze referentiescenario's leiden tot concentratieniveaus tussen zo'n 750 en 1.300 ppm. Hierdoor neemt de gemiddelde temperatuur van de aarde in 2100 naar verwachting toe met zo'n 3,7 tot 4,8°C.

3.1 Beste schattingen

De verwachte klimaatverandering hangt af van de onzekerheid over de toekomstige broeikasgasemissies en van de onzekerheden in het klimaatsysteem. Voor beide onzekerheden hanteert werkgroep III van het IPCC bandbreedtes. In dit hoofdstuk kijken we vooral naar de zogenoemde ‘beste schattingen’ qua klimaatonzekerheid. Deze omvatten alleen de onzekerheid over de emissies. Ter illustratie: zou in de referentiescenario’s ook de klimaatonzekerheid worden meegenomen, dan neemt de range voor temperatuurstijging toe naar 2,5 tot 7,8°C, in plaats van de hiervoor genoemde beste schatting van 3,7 tot 4,8°C.

Welke scenario’s buigen de trend om?

Uit de inventarisatie van in totaal 900 emissiereductiescenario’s blijkt hoe snel de groeitrend zou moeten worden omgebogen naar een geremde groei, en uiteindelijk naar een daling van de emissie, om onder 2 of 3°C temperatuurstijging te blijven (ten opzichte van pre-industrieel niveau). Tezamen leveren deze scenario’s een schat aan informatie over mogelijke antwoorden op vragen zoals: Tot welke emissies leiden de ontwikkelingen in de komende decennia? Welke concentraties van broeikasgassen hangen daarmee samen? Tot welke temperatuurstijging leidt dit? Welke ontwikkelingen en maatregelen zijn relevant? Wat zijn de kosten daarvan? En welk beleid is nodig?

In figuur 3.7 en 3.8 staat het complete spectrum van de 1.200 scenario’s (300 referentiescenario’s, 900 scenario’s met extra maatregelen) die de ontwikkeling van de emissies verbinden met de ontwikkeling van de concentratie broeikasgassen in de atmosfeer. Hieruit blijkt dat de uitstoot in de referentiescenario’s in 2050 al tweemaal zo hoog kan zijn als de huidige uitstoot. De meest ambitieuze reductiescenario’s daarentegen komen in 2100 uit op ongeveer nul, en in sommige gevallen zelfs op ‘negatieve emissies’.

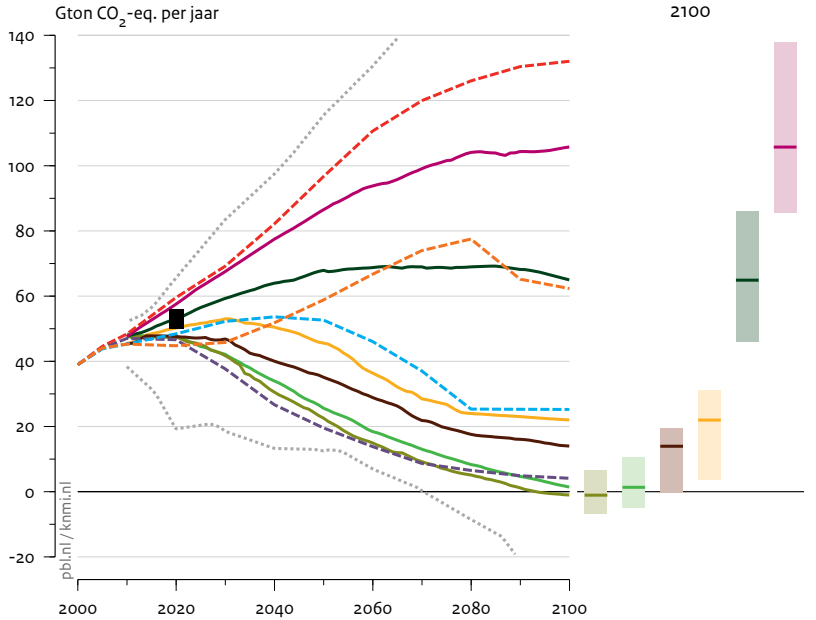
Scenario’s en temperatuurstijging

Alleen de meest ambitieuze scenario’s hebben een redelijke tot goede kans om de temperatuurstijging te beperken tot onder de grens van 2°C. In de andere scenario’s is het onwaarschijnlijk dat zij beneden die grens blijven; daar is vaak een temperatuurstijging van meer dan 3°C waarschijnlijk (zie tabel 3.1). Voor een kans van 50 procent dat de temperatuurstijging onder de 2°C-grens blijft, mag de concentratie van broeikasgassen in 2100 maximaal rond 530 ppm CO₂-equivalenten bedragen. Voor een kans groter dan twee derde geldt een maximumconcentratie van 450 ppm CO₂-equivalenten.

Voor een concentratieniveau van maximaal 530 ppm moeten de mondiale emissies in 2030 op of onder het niveau van 2010 liggen (circa 50 miljard ton CO₂-equivalenten per jaar). Daarna moeten de emissies dalen met 3 procent per jaar. Als vóór 2030 dus geen emissiereductie wordt gerealiseerd, dan is een concentratieniveau van 530 ppm of lager praktisch onhaalbaar. Ter vergelijking: vanaf 1990 tot 2010 namen de emissies toe met 1 tot 4 procent per jaar.

Figuur 3.7

Mondiale emissie van broeikasgassen per scenario-categorie en karakteristieke emissiepaden



Scenario-categorie (mediaan)

- Meer dan 1000 ppm CO₂-eq.
- 720 – 1000 ppm CO₂-eq.
- 580 – 720 ppm CO₂-eq.
- 530 – 580 ppm CO₂-eq.
- 480 – 530 ppm CO₂-eq.
- 430 – 480 ppm CO₂-eq.

Karakteristieke emissiepaden

- Hoog emissiepad (RCP 8.5)
- Middel emissiepad (RCP 6.0)
- Middellaag emissiepad (RCP 4.5)
- Laag emissiepad (RCP 2.6)

■ Schatting van onzekerheid in 2100 (10 – 90 percentiel)

..... Spreiding van alle scenario's

■ Cancún-afspraken 2011

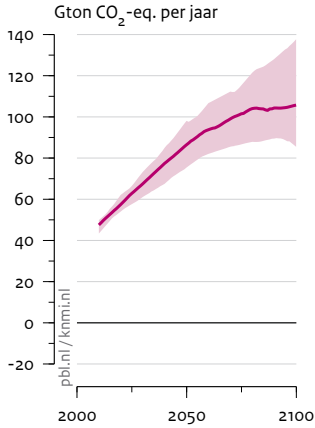
Bron: IPCC WGIII 2014

De jaarlijkse uitstoot van broeikasgassen in verband gebracht met de atmosferische concentratie voor alle 1.200 door het IPCC geanalyseerde scenario's. Zie figuur 3.8 voor de spreiding per scenario-categorie. Zowel aan de boven- als aan de onderkant van elke klasse vallen de extreme scenario's buiten beschouwing. Uitgezet staan ook de karakteristieke emissiepaden (RCP's). Het zwarte balkje ter hoogte van het jaar 2020 geeft de optelling weer van alle bekende klimaatdoelstellingen van landen en regio's voor 2020, ten tijde van de Klimaattop van 2011 in Cancún (Mexico). De gezamenlijke Cancún-doelen hebben weinig overlap met de waaier van emissiepaden die een goede kans hebben om onder een temperatuurstijging van 2°C te blijven.

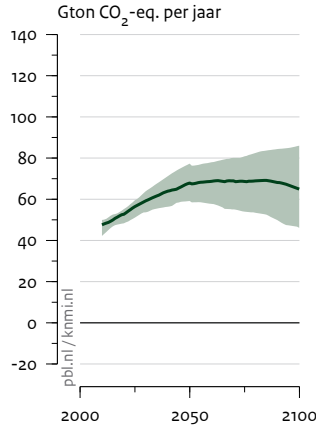
Figuur 3.8

Mondiale emissie van broeikasgassen per scenariocategorie

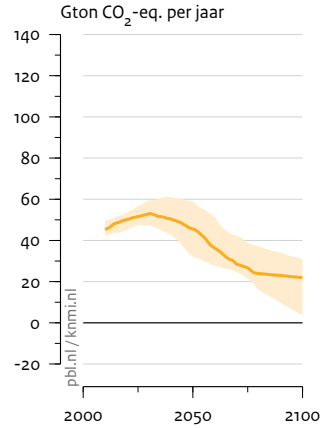
Meer dan 1000 ppm CO₂-eq.



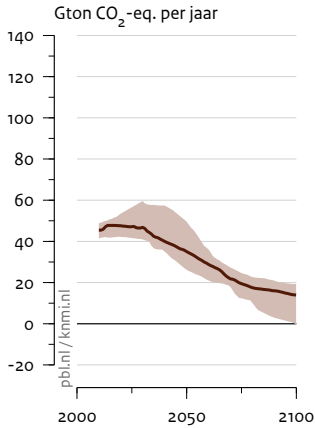
720 – 1000 ppm CO₂-eq.



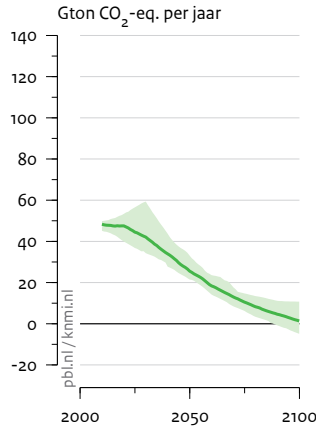
580 – 720 ppm CO₂-eq.



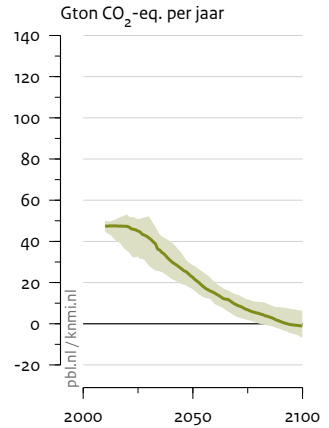
530 – 580 ppm CO₂-eq.



480 – 530 ppm CO₂-eq.



430 – 480 ppm CO₂-eq.



— Mediaan

■ Schatting van onzekerheid (10 – 90 percentiel)

Bron: IPCC WGIII 2014

De spreiding van de emissiepaden in de verschillende scenariocategorieën uit figuur 3.7.

Rek

De genoemde grenswaarden voor de emissieniveaus en de concentraties zijn niet absoluut. In de eerste plaats gaat het om waarschijnlijkheden, in de tweede plaats zit er enige rek in deze grenzen. De vereiste reducties kunnen per jaar variëren, maar tijdelijk hogere emissies moeten dan later wel worden gecompenseerd. Hoe later de groei wordt omgebogen naar een daling, hoe groter de uitdaging om met nóg forsere jaarlijkse reducties op een gewenst emissiepad te komen. Op enig moment kan een voortgezette groei niet meer voor het jaar 2100 worden gecompenseerd.

Zelfs voor het 2°C-emissiepad lijkt er nog even ruimte voor een klein beetje groei in de emissies. Maar hoe langer die groei voortduurt, hoe scherper – en moeilijker – de ombuiging in de jaren erna zal zijn. Zijn de emissies rond 2030 bijvoorbeeld niet terug op het niveau van 2010 (zo'n 50 miljard ton CO₂-equivalenten), dan is overschrijding van de 2°C-grens alleen maar te vermijden als in de jaren na 2030 de jaarlijkse emissiereductie stijgt naar 6 procent, en dat lijkt onwaarschijnlijk. In veel studies luidt de conclusie dan ook dat de 2°C-uitdaging waarschijnlijk niet kan worden gehaald als de emissies in 2030 hoger zijn dan 55 miljard ton.

Meer zekerheid

Pas als de broeikasgasconcentratie in de eenentwintigste eeuw niet hoger uitkomt dan 450 ppm CO₂-equivalenten, wordt de 2°C-grens waarschijnlijk niet overschreden. Scenario's die tot dit doel leiden, hebben in 2050 een wereldwijd emissieniveau dat 40 tot 70 procent lager is dan nu en in 2100 bijna nul of zelfs negatief.

Om zo'n emissieniveau te realiseren is grootschalige toepassing nodig van alle koolstofarme mogelijkheden. Dit betekent niet alleen een hoog tempo van energiebesparing en grote veranderingen in het landgebruik, maar ook minimaal een verdrievoudiging van de koolstofvrije energieopwekking in 2050: zonne-, wind- en kernenergie, energie uit waterkracht en aardwarmte, energieopwekking met afvangen en opslaan van geproduceerde CO₂. Zelfs dan lijkt een tijdelijke overschrijding van 450 ppm bijna onvermijdelijk, maar deze kan later weer worden teruggebracht door bebossing en, na 2050, door het toepassen van biomassa in de energievoorziening, in combinatie met CO₂-opslag.

Overigens kan het tempo waarin de maatregelen worden doorgevoerd, per land, regio of sector fors verschillen. De meeste economische modelstudies laten zien dat een ambitieuze emissiereductie het goedkoopst is als het merendeel van de investeringen plaatsvindt in de armere landen. Die studies gaan er meestal ook vanuit dat er efficiënte mechanismen komen die de kosten van een strenge emissiereductie op een ethisch verantwoorde manier over rijke en arme landen verdelen.

Klimaatverandering beperken door de temperatuurstijging onder 1,5°C te houden, is alleen mogelijk als de wereld erin slaagt de broeikasgasemissies per direct verregaand te reduceren.

Vergelijking met de huidige doelen

Zo'n zestig landen in de wereld hebben nationale doelen gesteld om de uitstoot van broeikasgassen terug te dringen en hebben beleid om deze terugdringing te

Tabel 3.1

Overzicht van de verschillende categorieën van de 1.200 scenario's in de IPCC-analyses

CO ₂ -eq. concentratie in het jaar 2100	Scenario	Cumulatieve CO ₂ -emissie (GtCO ₂ -eq.)	Verandering in CO ₂ -eq. emissies relatief t.o.v. 2010, in %	Toename wereldgem. temperatuur 1995-2100, in °C	Kans om onder de 2,0 °C te blijven in 21ste eeuw	Kans om onder de 3,0 °C te blijven in 21ste eeuw
450 [430-480]	RCP2.6	630-1.180	-120 tot -80	1,0-2,8	Waarschijnlijk (kans > 66%)	Waarschijnlijk (kans > 66%)
500 [530-580]	anders	1.240-2.240	-80 tot -60	1,4-3,6	Onwaarschijnlijk (0%<kans<50%)	Waarschijnlijk (kans > 66%)
[580-650]	RCP4.5	1.870-2.440	-130 tot -50	1,5-4,2	Onwaarschijnlijk (0%<kans<50%)	Waarschijnlijk (kans > 66%)
[650-720]	RCP4.5	2.570-3.340	-55 tot -20	1,8-4,5	Onwaarschijnlijk (kans <33%)	Waarschijnlijk (50%<kans<100%)
[720-1.000]	RCP6.0	3.620-4.990	-7 tot 70	2,1-5,8	Onwaarschijnlijk (kans <33%)	Onwaarschijnlijk (kans <33%)
> 1.000	RCP8.5	5.350-7.010	75 tot 180	2,8-7,8	Onwaarschijnlijk (kans <33%)	Onwaarschijnlijk (kans <33%)

De categorieën, ingedeeld naar CO₂-equivalentenconcentraties in de eenentwintigste eeuw, corresponderen elk met een (on)waarschijnlijkheid om in deze eeuw onder bepaalde grenswaarden voor de gemiddelde temperatuurstijging te blijven.

Deze tabel is een verkorte versie van tabel SPM.1 uit IPCC (2014).

realiseren. Berekeningen van het IPCC laten echter zien dat de huidige reductieniveaus onvoldoende zijn. Als het huidige beleid gedurende de komende eeuw langzaam wordt aangescherpt, zou dit onder optimistische aannames leiden tot een atmosferische broeikasgasconcentratie van 550 tot 650 ppm. Hiermee is het niet erg waarschijnlijk dat de temperatuurstijging beperkt blijft tot onder de 2°C-grens, al is dit ook niet helemaal uitgesloten (zie ook tabel 3.1).

De schattingen van de economische kosten waarmee de emissiereducties gepaard gaan, lopen sterk uiteen. Deze stijgen naarmate de doelen strenger zijn en zijn bovendien afhankelijk van de in de scenario's gebruikte modellen en aannames. Voor de analyse van de kosten vergeleek het IPCC alleen studies die ervan uitgaan dat de maatregelen direct worden geïmplementeerd, dat er een mondiale uniforme prijs is voor de emissie van broeikasgassen en dat alle koolstofarme sleuteltechnologieën beschikbaar zijn.

Voor het berekenen van de economische kosten die gepaard gaan met de emissie-reductie, wordt vaak als economische welvaartsmaat gerekend met het mondiale consumptieverlies ten opzichte van een referentiep pad (zonder extra klimaatbeleid). De meest ambitieuze categorie van scenario's – met een concentratie van rond 450 ppm CO₂-equivalenten – leveren naar schatting een consumptieverlies op van bijna 2 procent in 2030, ruim 3 procent in 2050 en bijna 5 procent in 2100, steeds ten opzichte van het referentiep pad voor het desbetreffende jaar. Deze getallen, die telkens een grote

3.2 Koolstofmarkt: Rekenen met de CO₂-prijs

Scenario's die maatregelen bevatten tegen klimaatverandering, rekenen vaak met de prijs van dergelijke maatregelen, uitgedrukt in de kosten per ton vermeden CO₂-emissie. Door de technische potentiëlen van de maatregelen bij elkaar op te tellen (beginnend bij de goedkoopste), kan worden berekend hoeveel emissiereductie mogelijk is, en hoe duur de duurste maatregelen zijn (in welke CO₂-prijs) die nog nodig zijn.

In theorie worden op een internationale koolstofmarkt eerst winstgevende maatregelen genomen en daarna maatregelen die netto geld kosten, te beginnen bij de goedkoopste. Of de kosten in totaal echt zo laag uitvallen, hangt af van het functioneren van de markt. De huidige koolstofmarkten, zoals de emissiehandelmarkt in de Europese Unie, zijn nu nog vaak regionaal. Bovendien is de CO₂-prijs op deze markten vaak nog te laag om veel effect te kunnen sorteren.

onzekerheidsmarge kennen, corresponderen met een afname van de *jaarlijkse* consumptiegroei van gemiddeld 0,06 procent. De wereldconsumptie groeit dan gemiddeld nog met 1,6 tot 3,0 procent per jaar.

De berekeningen zijn onzeker en vertonen van scenario tot scenario grote verschillen. Een paar observaties echter zijn vrij universeel. Zo heeft de beschikbaarheid van mitigerende technologieën een grote invloed op de totale kosten. Het uitsluiten of beperken van bepaalde soorten koolstofarme technologieën, of een slecht functionerende mondiale markt voor emissiereducties, leidt tot hogere kosten. Vooral het uitsluiten van CO₂-opslag of het beperken van het gebruik van bio-energie telt aan. Ook een vertraging in de ombuiging leidt tot hogere kosten.

Neveneffecten nog niet goed in beeld

Deze kostenschattingen zijn eerste-ordeschattingen en brengen geen neveneffecten in rekening. Energiebesparing en hernieuwbare energie leiden bijvoorbeeld tot minder uitstoot van andere schadelijke stoffen en daarmee tot minder gezondheids- en milieuschade. Ook is er minder import nodig van olie, gas of kolen, wat schade voorkomt als de import van deze energiedragers wordt onderbroken. Voor exporterende landen kan dit juist negatieve consequenties hebben.

Maatregelen kunnen ook andere negatieve neveneffecten hebben. Grootschalige toepassing van bio-energie kan bij een onverantwoord gebruik bijvoorbeeld leiden tot een verlies van biodiversiteit, terwijl kernenergie gepaard gaat met risico's van ongevallen en een afvalprobleem. Hoe de neveneffecten uitpakken, hangt dus samen met de gekozen maatregelen.

Nog minder goed bekend zijn de baten van een kleinere temperatuurstijging: minder overstromingen, minder extreme weersomstandigheden. Dergelijke voordelen laten zich niet gemakkelijk in geld uitdrukken, al zijn verzekeraars en herverzekeraars daar wel

mee bezig. Ook de genoemde nadelen zijn moeilijk te begroten, al worden ze minder groot geschat dan de nevenvoordelen.

Ook hier verschillen de economische aspecten per land of regio. In veel ontwikkelingslanden zijn de kosten per bespaarde ton broeikasgas lager dan in andere delen van de wereld.

3.4 Wat betekenen de emissiepaden per sector?

In de scenario's zonder extra klimaatbeleid stijgen de emissies in alle economische sectoren. Alleen emissies gerelateerd aan landgebruik nemen naar verwachting af. In alle sectoren zijn er veel mogelijkheden voor emissiereductie, waardoor er op de langere termijn een koolstofarme of zelfs koolstofvrije energievoorziening mogelijk is.

Om klimaatverandering te beperken zijn in alle scenario's, zeker als de doelen ambitieus zijn, grootschalige en mondiale veranderingen nodig. Forse emissiereductie is het goedkoopst met energiebesparing en gedragsverandering. Bijna alle scenario's geven aan dat de besparing in alle sectoren onmiddellijk kan starten. Hetzelfde geldt voor het aanpassen van gedrag en leefstijl.

Hiernaast zijn soms ingrijpende wijzigingen nodig van systemen die al jarenlang goed functioneren. De kosten en baten van deze wijzigingen zijn niet voor iedere sector of ieder bedrijf hetzelfde. Er zullen spelers zijn die hun marktaandeel zien groeien, maar er zijn ook verliezers. Partijen zullen hun aandeel willen behouden, terwijl systemen (zoals elektriciteitscentrales) en infrastructuur (zoals wegen) een levensduur hebben van vele tientallen jaren.

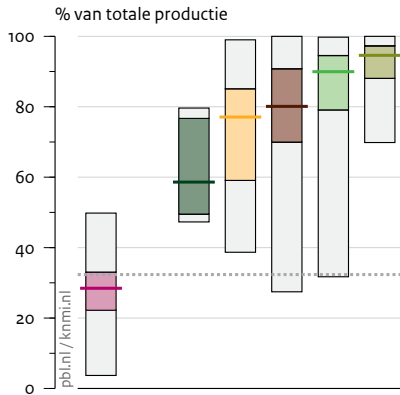
Tot slot: de sectorale ontwikkelingen kunnen niet los van elkaar worden gezien, zeker als de kosten zo laag mogelijk moeten blijven. Vooral de onderlinge afhankelijkheid van de energievoorziening enerzijds en de land- en bosbouwsector anderzijds is groot: hoe hoger de klimaatambities, hoe groter de noodzaak tot onderlinge afstemming – bijvoorbeeld in bio-energie – om de kosten beperkt te houden.

De energiesector

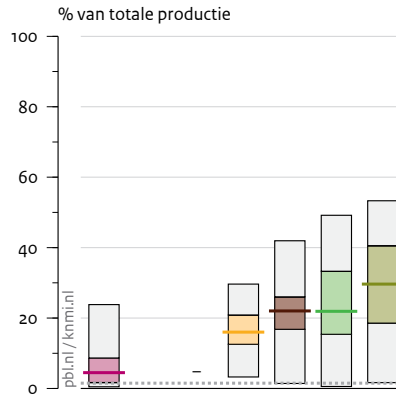
De energiesector die centraal elektriciteit en warmte opwekt, is nu verantwoordelijk voor iets minder dan een derde van de totale uitstoot van de broeikasgassen in de wereld (14,4 miljard ton CO₂-equivalenten in 2010). In de jaren 2001-2010 steeg de uitstoot door deze sector meer dan ooit tevoren, vooral door de toenemende energievraag en een groter gebruik van steenkool. Zonder extra klimaatbeleid zullen de broeikasgasemissies in de energiesector in 2050 zijn verdubbeld of verdrievoudigd ten opzichte van 2010. In elk van de reductiescenario's is het onvermijdelijk dat voor de energieopwekking steeds minder fossiele (koolstofrijke) brandstoffen worden gebruikt. Op dit moment is echter de meest koolstofrijke brandstof (steenkool) nog grotendeels verantwoordelijk voor de in het laatste decennium toegenomen stijging van emissies. De beste kansen liggen bij het verbeteren van het rendement van de energieomzetting. Ook voor de elektriciteitssector zijn er goede kansen. De ontwikkeling van koolstofarme

Figuur 3.9
Aandeel koolstofarme productie per scenariocategorie, 2050

Elektriciteit



Vloeibare brandstoffen



Schatting van onzekerheid (25 – 75 percentiel)

- Baseline
- 650 – 720 ppm CO₂-eq.
- 580 – 650 ppm CO₂-eq.
- 530 – 580 ppm CO₂-eq.
- 480 – 530 ppm CO₂-eq.
- 430 – 480 ppm CO₂-eq.

- Spreiding (min – max)
- Mediaan
- 2010
- Geen data

Bron: IPCC WGIII 2014

De beste groeikansen voor een koolstofarme productie liggen bij de elektriciteitsproductie. Waar koolstofarme vloeibare brandstoffen deze eeuw maximaal tot 50 procent van alle vloeibare brandstoffen kunnen uitmaken, komt koolstofarme stroomopwekking ook in minder ambitieuze scenario's boven een aandeel van 60 procent, en in de meest ambitieuze scenario's zelfs dicht bij 100 procent.

technologieën verloopt daar sneller dan elders in de energievoorziening, de industrie, de gebouwen of het transport (zie figuur 3.9). In de meeste ambitieuze reductie-scenario's stijgt het aandeel van hernieuwbare energiebronnen in de elektriciteitssector, kernenergie en fossiele energie inclusief afvang en opslag van CO₂ – nu in totaal zo'n 30 procent – naar rond 80 procent in 2050. In 2100 zullen fossiele brandstoffen alleen nog maar worden gebruikt als alle resulterende CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen. Er zijn veel opties voor de transitie naar een koolstofarme en zelfs koolstofvrije energievoorziening op de lange termijn. De opties worden in verschillende samenstellingen in de scenario's meegenomen.

Brandstofmix

De emissie van broeikasgas kan op redelijk korte termijn behoorlijk dalen als mondiaal de kolencentrales worden vervangen door gascentrales. Door het lagere koolstofgehalte levert de verbranding van aardgas per eenheid energieopbrengst minder CO₂ op. Aardolie zit tussen steenkool en aardgas in.

Moderne gascentrales zijn ook nog eens efficiënter dan kolencentrales. Al met al produceert een gascentrale per kilowattuur ongeveer de helft minder CO₂ dan de gemiddelde kolencentrale. In de meeste ambitieuze reductiepaden slaat aardgas (voornamelijk bestaand uit methaan) een brug naar een duurzame energievoorziening, mits er weinig verliezen van het sterke broeikasgas methaan naar de atmosfeer optreden. Het gebruik van aardgas kan daardoor de komende jaren nog stijgen. Tenzij de mogelijkheid om CO₂ bij gascentrales af te vangen en ondergronds op te bergen grootschalig wordt toegepast, daalt de productie van energie uit aardgas naar verwachting nog voor 2050 tot onder het huidige niveau, om vervolgens verder te dalen.

Hernieuwbare bronnen

Energieopwekking kan (bijna) koolstofvrij met behulp van zogenoemde stromingsbronnen, zoals de zon, de wind, stromend water of golfenergie, met behulp van aardwarmte (geothermie) of door gebruik te maken van de zwaartekracht (getijdenenergie, reservoirs voor waterkracht). Deze bronnen zijn hernieuwbaar en raken (bijna) niet uitgeput. Ook biomassa is een hernieuwbare energiebron: in een korte cyclus haalt biomassa net zoveel CO₂ uit de atmosfeer voor de eigen groei als deze later bij verbranding weer vrijgeeft. De CO₂-balans over de gehele levenscyclus van biomassa is ongeveer nul. Vooral in de laatste vijf jaar is de prestatie van veel hernieuwbare energiebronnen substantieel verbeterd en zijn de kosten ervan afgenomen. Dit blijkt ook uit de investeringscijfers: in 2012 was het totaal nieuw geïnstalleerd (maximum)vermogen voor elektriciteitsopwekking met windenergie, waterkracht en zonne-energie al groter dan de nieuwbouw voor fossiele elektriciteitscentrales. Voor een verdere groei van hun marktaandeel zijn nog wel beleidsmaatregelen nodig, bijvoorbeeld om financiële of andere drempels weg te nemen. Een verdere groei stelt ook eisen aan de (lokale) inpassing van hernieuwbare bronnen in energiesystemen.

Kernenergie

Kernenergie produceert nauwelijks broeikasgassen, maar lijdt mondiaal al zo'n twintig jaar aan een afnemende populariteit. De bijdrage van kernenergie in de elektriciteitsvoorziening neemt geleidelijk af. Vooral in Azië zijn nog kerncentrales in aanbouw en enkele andere landen overwegen een herintroductie. Maar vooral risico's van veiligheid en de verspreiding van kernwapens, de afvalproblematiek en financiële risico's zitten kernenergie in de weg, nog afgezien van een negatieve publieke opinie. Nieuwe en veiliger splijtstofcycli en reactoren zijn in ontwikkeling, maar kunnen het afnemende aandeel van kernenergie in de wereld tot dusverre nog geen halt toe roepen.

Leveringszekerheid niet als vanzelf behouden

Als het aandeel van zon en wind aan de elektriciteitsproductie toeneemt, is het bij de huidige inrichting van het systeem niet zeker of stroom kan worden geleverd met de bijna 100 procent zekerheid die de rijke landen gewend zijn. Het aanbod van zonne- en windenergie varieert van nature. Toch moet het aanbod aan energie op elk moment van de dag passen bij de vraag. Om te voorkomen dat black-outs optreden, met grote economische schade, is het nodig netten en markten aan te passen. Meer uitwisseling tussen nationale netten, regelcapaciteit, opslag van energie en het aanpassen van de elektriciteitsvraag aan het aanbod zijn enkele mogelijkheden.

Afvangen en opslaan van CO₂ (CCS)

Met het afvangen en opslaan van CO₂ (*Carbon Capture and Storage* ofwel CCS) kan het gebruik van kolen (inclusief bruinkool), aardgas en olie ook in een koolstofarme energievoorziening worden ingepast. Sommige industriële processen (staal- en cementproductie) produceren veel CO₂ en hebben naast CCS maar weinig alternatieven om die uitstoot terug te dringen. De verschillende elementen van CCS (afvang, transport en ook opslag) worden inmiddels apart op industriële schaal toegepast, maar van een grootschalige en geïntegreerde toepassing van CCS in commerciële elektriciteitscentrales of de industrie is nog geen sprake. Daarvoor moeten nog enkele barrières worden overwonnen. Zo reduceert CCS weliswaar de CO₂-uitstoot maar deze reductie weegt, bij de huidige prijzen voor CO₂, nog niet op tegen de operationele en investeringskosten van deze technologie. De kosten voor CCS zitten mede in de rendementsverliezen die het afvangen van CO₂ bij een centrale oplevert.

Het transport en de opslag van CO₂ kampen nog met onzekere factoren. Vergunningverlening en wetgeving zijn daar één van. Ook zitten er veiligheidsrisico's aan de opslag van CO₂, al neemt de wetenschappelijke kennis toe over bijvoorbeeld de kans op lekkage en de veiligheid voor mens en milieu. Daarnaast is er in dichtbevolkte gebieden vaak maatschappelijke weerstand tegen het transport of de opslag van CO₂.

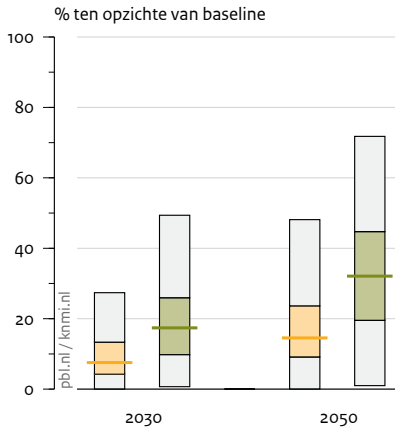
Negatieve emissies

Een speciaal geval van emissiereductie is de combinatie van bio-energie en CO₂-afvang en -opslag. Biomassa levert over de levenscyclus netto geen CO₂-uitstoot op als ervan wordt uitgegaan dat biomassa in principe ongeveer evenveel CO₂ uit de atmosfeer haalt voor de eigen groei als de verbranding van biomassa later weer oplevert. Afvangen en opslaan van de bij bio-energie vrijkomende CO₂ zorgt er dan voor dat er netto CO₂ uit de atmosfeer wordt gehaald en opgeslagen. Bij sommige strenge reductiepaden is deze combinatie nodig om eerdere emissies in latere jaren te compenseren en op het juiste emissiepad uit te komen.

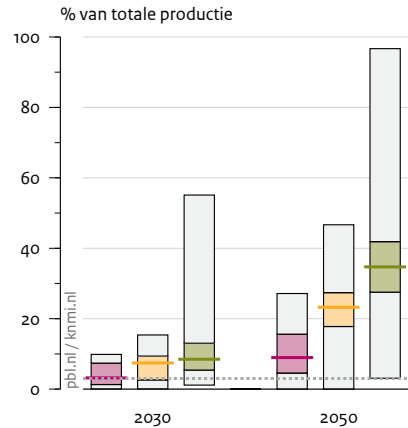
De meerderheid van de ambitieuze reductiescenario's houdt rekening met een forse inbreng van CCS, vooral bij de elektriciteitsopwekking en de industrie. Na 2050 moet ook biomassa worden toegepast in combinatie met CCS. Hiernaast zijn er enkele ambitieuze scenario's zonder CCS. Deze gaan ervan uit dat de overige koolstofarme technologieën optimaal worden benut, ook wanneer de toepassing daarvan duurder wordt.

Figuur 3.10
Verduurzaming energiegebruik van transportsector

Energiebesparing



Koolstofarme productie



Schatting van onzekerheid (25 – 75 percentiel)

- Baseline
- 530 – 650 ppm CO₂-eq.
- 430 – 530 ppm CO₂-eq.

- Spreiding (min – max)
- Mediaan
- 2010

Bron: IPCC WGIII 2014

Besparing op de (finale) energievraag in de transportsector loopt in sommige scenario's op tot enkele tientallen procenten in 2050, terwijl ook het aandeel van koolstofarme brandstoffen dan al flink kan zijn opgelopen (tot enkele tientallen procenten).

Geo-engineering

Geo-engineering is de gemeenschappelijke term voor maatregelen die relatief snel klimaatverandering kunnen tegengaan. Verwijderen van CO₂ uit de atmosfeer is één groep van maatregelen. Naast CCS in combinatie met het gebruik van biomassa en bebossing behoort ook een versnelde opname van CO₂ door de oceanen (met bemesting) tot deze groep. Een ander cluster van technologieën is gebaseerd op het verminderen van de zonne-instraling (SRM: *solar radiation management*). Dit kan bijvoorbeeld door deeltjes te injecteren in de hogere luchtlagen. Oceaanbemesting en SRM zijn niet meegenomen in de IPCC-analyses.

De opties bij het eindgebruik van energie

Besparing op het eindgebruik van energie is een voor de hand liggende optie om de broeikasgasemissies terug te dringen. Energie die niet wordt gebruikt, hoeft ook niet te worden opgewekt en zal dus geen broeikasgassen opleveren. Besparing wordt vaak beschouwd als een no-regret-maatregel, omdat ze brandstof en de bijbehorende kosten uitspaart en daardoor snel rendabel is.

Wel zijn er zorgen over het zogenoemde *rebound*-effect. Dit ontstaat bijvoorbeeld als een apparaat vaker wordt gebruikt omdat het zo energie-efficiënt is. Er is in de literatuur wel overeenstemming over het bestaan van het *rebound*-effect, maar niet over de besparing die dit effect teniet zou doen.

In de transportsector

In 2010 vond meer dan een kwart (27 procent) van het eindgebruik van energie plaats in de transportsector. De emissies die hieraan kunnen worden toegeschreven, bedroegen 6,7 miljard ton CO₂-equivalenten. Onder de huidige trend zullen de emissies tot 2050 bijna verdubbelen, onder druk van de toenemende vraag naar passagiers- en vrachtvervoer. Maar door verbeteringen in de koolstofarme brandstoffen, in de prestaties van voertuigen (minder energiegebruik per passagier) en in het gebruik van de infrastructuur en door een zuiniger reisgedrag zouden die emissies in 2050 weer met ruim 30 procent kunnen worden teruggeschoefd (zie figuur 3.10). Dit kan bijvoorbeeld met nieuwe koolstofarme brandstoffen en met transportmiddelen die werken op elektriciteit uit hernieuwbare bronnen.

Veel maatregelen kunnen profiteren van het belangrijke nevenvoordeel van lokaal schonere lucht, omdat zij leiden tot veel minder fijnstof of ozon. Maar maatregelen kennen ook onzekerheden en technische obstakels. De onzekerheden schuilen vooral in de nieuwe brandstoffen, zoals biodiesel, omdat hun beschikbaarheid en technisch potentieel nog niet duidelijk zijn.

Grote onzekerheden zitten ook in de kostenschattingen voor de emissiereductie van transportmiddelen. In sommige gevallen is de emissiereductie zeer effectief en levert deze geld op, bijvoorbeeld door de brandstofbesparing van efficiëntere motoren of bij beter rijgedrag. Maar maatregelen kunnen, mede door regionale omstandigheden, ook duur uitpakken, zoals bij het treinverkeer, elektrische voertuigen of het vliegverkeer.

In gebouwen

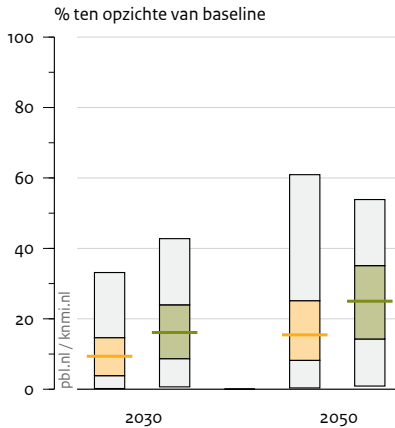
In 2010 waren gebouwen (woningen, kantoren) verantwoordelijk voor 32 procent van alle eindgebruik van energie. Dit komt neer op een uitstoot van broeikasgassen van 8,8 miljard ton CO₂-equivalenten per jaar. In de referentiescenario's is die uitstoot in 2050 met 50 tot 150 procent toegenomen, vooral onder invloed van de wens voor een hogere levensstandaard, met bijbehorende ruimte voor huisvesting en energiediensten.

Juist in deze sector is het risico op de zogenoemde *lock-in* hoog: gebouwen en infrastructuur blijven tientallen jaren staan en kunnen – eenmaal gebouwd – niet zo gemakkelijk worden omgebouwd naar een laag of zelfs geen energiegebruik. Dit *lock-in*-gevaar bestaat vooral in regio's waar veel nieuwbouw plaatsvindt, zoals in opkomende economieën. Tegelijkertijd biedt nieuwbouw een groot potentieel om te voldoen aan de toenemende vraag naar energiediensten tegen veel lagere emissies.

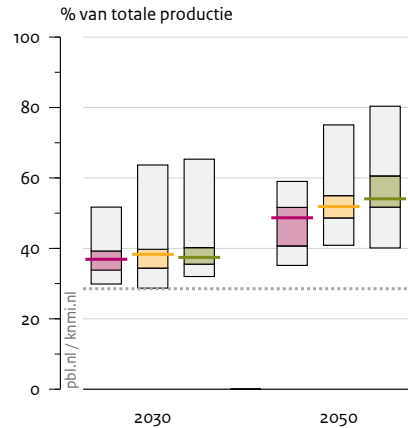
Er zijn vele mogelijkheden om het energiegebruik in gebouwen omlaag te schroeven en zelfs om te buigen naar een daling. Bij stabilisatie of daling van het energiegebruik zullen schone omzettingstechnologieën ervoor zorgen dat de uitstoot van broeikas-

Figuur 3.11
Verduurzaming energiegebruik van gebouwen

Energiebesparing



Koolstofarme productie



Schatting van onzekerheid (25 – 75 percentiel)

- Baseline
- 530 – 650 ppm CO₂-eq.
- 430 – 530 ppm CO₂-eq.

- Spreiding (min – max)
- Mediaan
- 2010

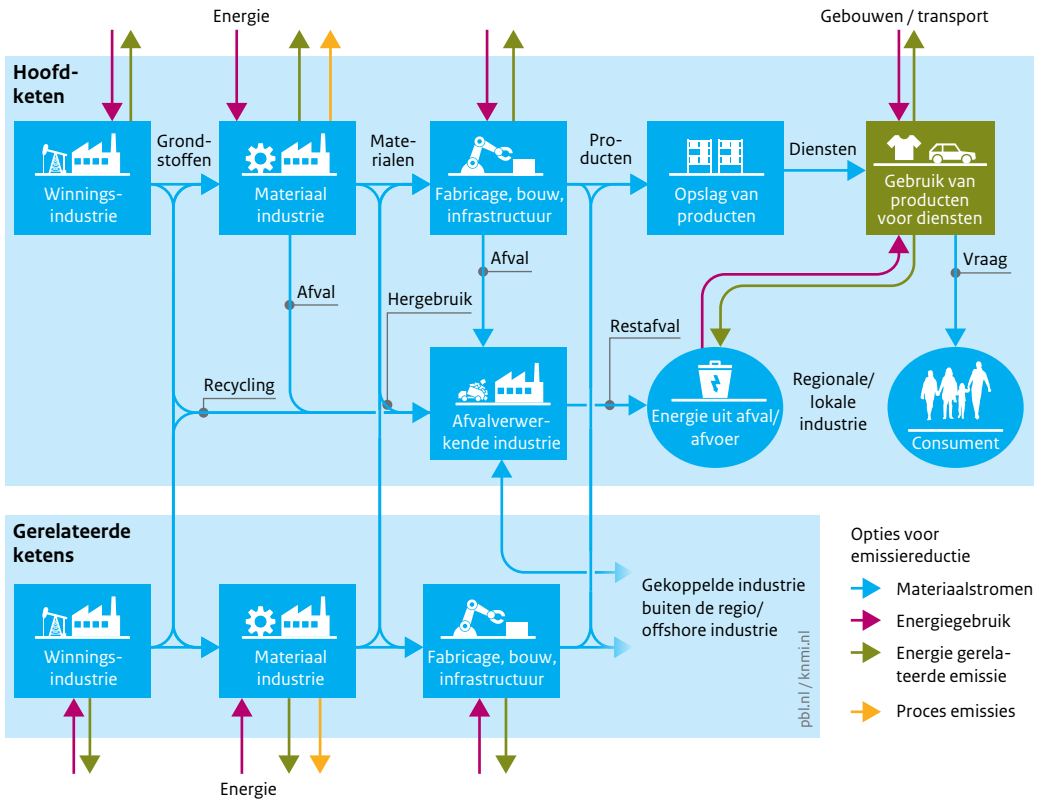
Bron: IPCC WGIII 2014

In gebouwen loopt de besparing van de finale energievraag in 2050 bij ambitieuze emissiepaden op tot tientallen procenten ten opzichte van de referentie. Het aandeel koolstofarme energie (inclusief traditionele energie) haalt meestal via het elektriciteitsverbruik soortgelijke percentages.

gassen extra daalt (zie figuur 3.11). Er staan nu al veel gebouwen die, gemeten over hun levensduur of over een jaar, netto geen energie gebruiken (nul-energie) of zelfs energie produceren. Dit heeft vaak te maken met zeer goede isolatie, verwarming via zonlicht en teruggewonnen warmte, gebruik van de ondergrond voor opslag van warmte en koude, toepassen van warmtepompen en andere energiezuinige apparatuur, en met de productie van elektriciteit via bijvoorbeeld zonnecellen of gezamenlijke windturbines. In de meeste scenario's bieden nieuwbouwvoorschriften, bijvoorbeeld voor zeer goede isolatie en terugwinning van warmte, veel potentieel voor emissiereductie, evenals rendementseisen voor apparatuur. Ook in het renoveren van bestaande gebouwen zit erg veel potentieel, tot wel 50 tot 90 procent per gebouw. De meeste maatregelen brengen ook andere voordelen met zich, zoals een beter leefcomfort en minder uitstoot van schadelijke stoffen. Deze voordelen worden vaak nog hoger gewaardeerd dan de voordelen voor het energiegebruik en het klimaat.

De marktstructuur staat het benutten van dit potentieel vaak in de weg, zo constateert het IPCC. Omdat de gebruiker van een gebouw vaak niet degene is die de investeringsbeslissingen neemt (het *split incentive*-probleem), komen verbeteringen in het energie-

Figuur 3.12
Emissiereductie in industriële ketens



Bron: IPCC WGIII 2014

Elke schakel biedt mogelijkheden voor een efficiënter gebruik van energie en materialen en voor emissiereductie: energiebesparing, lagere emissies, efficiënter materiaalgebruik in fabricage en productontwerp, efficiëntere diensten en een lagere vraag naar diensten.

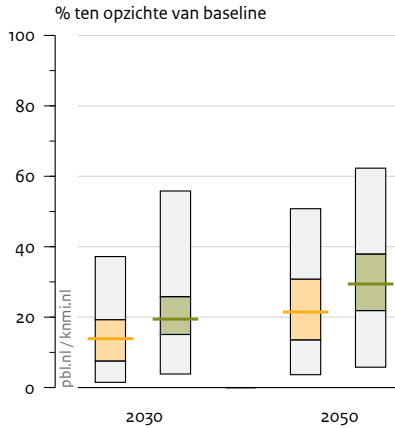
gebruik niet tot stand. Ook is er vaak beperkte toegang tot de juiste informatie en stuit (voor)investering in rendabele energiezuinige maatregelen op het gebrek aan toegang tot kapitaal. Beleidsmaatregelen die deze problemen integraal aanpakken, behoren tot de meest lucratieve energie- en klimaatmaatregelen. De scenario's zijn daarover bijna unaniem.

In de industrie

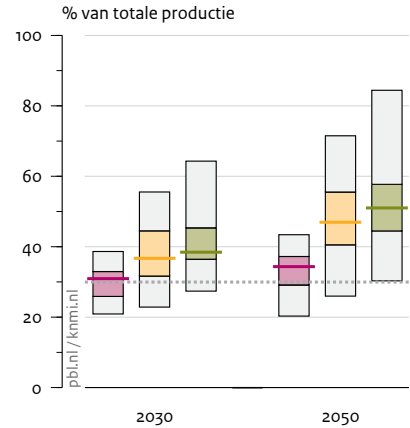
De industrie was in 2010 verantwoordelijk voor 28 procent van het eindgebruik van energie. De directe en indirecte uitstoot van broeikasgas bedroeg 13 miljard ton CO₂-equivalenten. Hierin zijn ook de zogenoemde procesemissies meegenomen.

Figuur 3.13
Verduurzaming energiegebruik van industrie

Energiebesparing



Koolstofarme productie



Schatting van onzekerheid (25 – 75 percentiel)

- Baseline
- 530 – 650 ppm CO₂-eq.
- 430 – 530 ppm CO₂-eq.

- Spreiding (min – max)
- Mediaan
- 2010

Bron: IPCC WGIII 2014

Om het industriële energieverbruik te verduurzamen, is zowel besparing als een meer koolstofarme energieopwekking (stroom en warmte) nodig.

Tenzij de CO₂-efficiëntie van de industrie snel verbetert, blijft deze uitstoot tot 2050 toenemen, wellicht tot bijna het dubbele van 2010. In beginsel biedt elke schakel in de productieketen mogelijkheden om de emissies terug te dringen (figuur 3.12). Om de benodigde emissiereductie vanuit de industrie te bereiken, zal een inzet over de gehele keten nodig zijn.

Van de voor 2050 geprojecteerde emissies kan al een kwart worden afgetrokken als in de industrie de huidige productiemethoden op grote schaal worden vervangen door de beste technieken die nu beschikbaar zijn. In sommige landen, zoals in Nederland, is het al verplicht om bij de nieuwbouw van productielijnen de best beschikbare technieken toe te passen. Nog eens 20 procent reductie tot 2050 lijkt mogelijk wanneer deze beste technieken nog verder verbeteren. Net als bij gebouwen stuiten ook hier investeringen vaak op een gebrek aan informatie of kapitaal.

Hogere rendementen, hergebruik en een efficiënter gebruik van materialen, evenals de samenwerking tussen bedrijven voor energiegebruik, materiaalgebruik en warmte-uitwisseling, dragen aanzienlijk bij aan een lagere broeikasgasuitstoot door de industrie.

Maatregelen betalen zichzelf vaak snel terug door de lagere energie- en materiaalrekeningen. Daarnaast stimuleren ze innovatie, nieuwe economische activiteiten en werkgelegenheid. Een daling van de uitstoot in de industrie vraagt wel om de inzet van een breed spectrum aan opties: opties die verder gaan dan besparingsmaatregelen, zoals nieuwe productontwerpen met minder materiaalgebruik, nieuwe diensten, opslag van CO₂ en reductie van de vraag naar diensten en producten (zie figuur 3.13).

De opties ten aanzien van (verandering in) landgebruik

Het gebruik van het aardoppervlak voor landbouw en bosbouw is goed voor ongeveer een kwart van alle broeikasgassen: 10 tot 12 miljard ton per jaar. Deze emissies komen vrij door onder andere ontbossing, landbouw, het gebruik van mest en veeteelt.

Ontbossing levert langs twee wegen broeikasgassen op. In de eerste plaats door het 'loswoelen' van vastgelegde broeikasgassen uit de ondergrond. In de tweede plaats doordat biomassa vaak wordt verbrand zonder de energie nuttig te gebruiken. En uit mest komen broeikasgassen vrij zoals methaan en lachgas, en ook vee produceert broeikasgassen.

Recente schattingen wijzen erop dat de toename in de uitstoot van broeikasgassen in deze sector tot staan is gebracht, of zelfs langzaam afneemt. Deze afname heeft te maken met een minder snelle ontbossing. De onzekerheden in de berekeningen zijn hier groter dan in de andere sectoren. Met extra beleid zou de uitstoot in 2050 kunnen halveren ten opzichte van 2010. Voor het einde van de eeuw kan een verantwoord landgebruik er zelfs voor zorgen dat er netto CO₂ wordt opgenomen uit de atmosfeer. In de bosbouwsector zijn (her)bebossing, duurzame bosbouw en reductie van de ontbossing kosteneffectieve klimaatmaatregelen. In de landbouwsector bestaan de meest effectieve maatregelen uit duurzaam beheer van land voor gewassen en begrazing, en herstel van natuur en van vruchtbaar land. Tot 2030 kunnen deze maatregelen al leiden tot een emissiereductie met 7 tot 11 miljard ton per jaar, tegen een beperkte maximumprijs van 100 euro per ton CO₂-equivalenten. Maatregelen om de vraag naar landgebruik te beperken – denk aan eetgewoontes met minder vlees en het beperken van afval – zouden nog eens 1 tot 9 miljard ton per jaar kunnen opleveren, maar zijn veel onzekerder in hun effectiviteit. Maatregelen worden rendabeler als ook in rekening wordt gebracht dat de landbouw kan bijdragen aan klimaatadaptatie.

Het kweken van gewassen voor energieopwekking speelt een potentieel zeer belangrijke rol als het erom gaat ernstige klimaatverandering te vermijden. Maar er zijn ook belangrijke zorgen op dit punt. Het grootschalig aanplanten van biomassa voor energiegebruik kan de lokale biodiversiteit of waterbronnen aantasten. Ook kan het gebruik van land voor bio-energie teelt direct of indirect leiden tot extra ontbossing en daardoor extra broeikasgasemissies. En ten slotte is er de concurrentie met de landbouw voor voedsel doeleinden, die – zeker in arme landen met weinig voedselproductie – een potentiële bedreiging voor de biomassateelt vormt. Het kweken van snelgroeïende gewassen op arme grond en het toepassen van kleinschalige biogasinstallaties lijken voor de hand liggende oplossingen voor deze problemen, maar een algemeen recept om eventuele nadelige gevolgen in te dammen, bestaat nog niet. Dat komt mede doordat de effecten lokaal en per technologie vaak sterk verschillen.

In de teelt van energiegewassen zit dus een belangrijke link met de mitigatie van broeikasgassen in de energieopwekking.

Ruimtelijke ontwikkeling

Verstedelijking, infrastructuur en ruimtelijke ordening zijn op verschillende manieren van invloed op de broeikasgasemissies. In steden liggen het gemiddelde gebruik van energie en het niveau van uitstoot bijvoorbeeld iets hoger dan op het platteland. Urbanisatie heeft dus consequenties voor de emissies. In 2011 woonde iets meer dan de helft (52 procent) van de wereldbevolking in stedelijk gebied, terwijl volgens cijfers uit 2006 zowel het energiegebruik als de emissies in het stedelijk gebied ongeveer drie kwart van het mondiale totaal bedroegen.

Dit aandeel verschilt overigens tussen noord en zuid: in arme landen is het energiegebruik in de steden hoger dan het landelijk gemiddelde, in rijke landen (bijvoorbeeld de Annex I-landen van het VN Klimaatverdrag, zoals Nederland) is dat juist andersom. Omdat in de komende twee decennia zich in de ontwikkelingslanden veel kleine en middelgrote steden zullen ontwikkelen, biedt het slim combineren van beleidsmaatregelen veel perspectief om energie te besparen en emissies te beperken. Hoewel veel steden in de wereld al een eigen klimaatbeleid voeren, is het effect daarvan nog onmogelijk in te schatten. Het succes van de lopende klimaatplannen hangt vaak samen met de inschatting van de nevenvoordelen. Toepassing van klimaatmaatregelen is zeer aantrekkelijk als deze ook perspectief bieden op economische groei en werkgelegenheid.

3.5 Hoe ziet succesvol klimaatbeleid eruit?

Klimaatbeleid is een collectieve, liefst mondiale actie, en vraagt dus om internationale coördinatie. Het klimaatbeleid is in veel landen nog pril en de effecten op de (toekomstige) mondiale emissies zijn nog moeilijk meetbaar. Maar sinds 2008 is er een duidelijke trend waarneembaar dat beleidsmaatregelen een steeds breder perspectief krijgen. Dit maakt beleidsmaatregelen beter aanvaardbaar en langer houdbaar.

Bijna alle landen in de wereld (zo'n 200) zijn aangesloten bij het Raamwerkverdrag over Klimaatverandering van de Verenigde Naties (UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change). Dat raamwerk formuleerde in 1992 als uitgangspunt: 'Het uiteindelijke doel [...] is om stabilisatie van concentraties van broeikasgassen in de atmosfeer te realiseren op een niveau dat gevaarlijke menselijke beïnvloeding van het klimaat voorkomt. Dat niveau moet worden bereikt in een tijdspanne die ecosystemen de gelegenheid geeft om zich op natuurlijke wijze aan te passen, die voedselproductie niet aantast en die de voortgang van duurzame economische ontwikkeling mogelijk maakt.'

Het is één ding om efficiënte en effectieve maatregelen voor emissiereductie te beschrijven, maar het ontwerpen van een succesvolle aanpak met effectieve beleidsmaatregelen is een ander. Zo'n twee derde van alle emissies van broeikasgassen valt

momenteel onder enige vorm van nationaal klimaatbeleid. Maar getuige de voortdurende toename van de uitstoot heeft dat beleid nog onvoldoende effect.

Collectieve actie

Bij het formuleren van maatregelen zijn beleidsmakers aangewezen op gegevens uit allerlei wetenschappelijke disciplines. Wetenschappers schatten bijvoorbeeld de gevolgen in van klimaatverandering, de kansen om die gevolgen te voorkomen en de effectiviteit van tegenmaatregelen. Over één conclusie zijn ze daarbij volstrekt helder: klimaatverandering kan nooit effectief worden bestreden als elke partij (land, sector, industrie) haar eigen gang gaat zonder rekening te houden met anderen. Klimaatbeleid is een collectieve, liefst mondiale actie, en vraagt dus om internationale coördinatie. Die afstemming is het meest effectief, en leidt onder andere tot verder onderzoek en ontwikkeling, innovatie, kennisuitwisseling en een goede samenwerking tussen verschillende maatregelen in verschillende regio's.

Uitgangspunten voor het verdelen van de inspanningen

De inspanningen kunnen op verschillende manieren over landen, regio's en sectoren worden verdeeld. De criteria die daarvoor worden gebruikt, zijn goed herkenbaar in de internationale onderhandelingen over het klimaatbeleid. Het zijn de criteria van gelijkheid, rechtvaardigheid en redelijkheid bij het vermijden van en het aanpassen aan effecten van klimaatverandering. Factoren zoals de historische emissies, het vermogen om maatregelen te kunnen nemen en lokale omstandigheden zijn van grote invloed op de interpretatie van die criteria.

Het ethische aspect is terug te vinden in verhitte debatten rondom het internationale klimaatbeleid. Terwijl rijke landen zoals de Verenigde Staten geen grote stappen willen zetten zonder een zekere (en verplichtende) bijdrage van snel opkomende economieën zoals China en Brazilië, willen die ontwikkelende economieën juist ook een forse input van de rijke landen op grond van hun historisch hoge uitstoot. Waardeoordelen, sociale, economische en ethische overwegingen, de stand der welvaart en culturele verschillen compliceren dat debat. Pas als partijen de uitkomsten van dit debat als evenwichtig ervaren, heeft gecoördineerde actie een kans van slagen.

Het begint bij economische argumenten

In alle complexiteit van argumenten en achtergronden begint het ontwerp van het klimaatbeleid toch vaak met de economische analyse en evaluatie van maatregelen. Daarvoor bestaan veel praktische gereedschappen, zoals kosten-batenanalyses, analyses van kosteneffectiviteit, multicriteria-analyses (dus niet alleen optimalisatie naar kosten, maar ook naar sociale of culturele effecten) en modellen over het verwachte nut voor de samenleving. De volgende stap is het wegen van de voor- en nadelen van klimaatmaatregelen.

De verhouding van klimaatbeleid met ander beleid

Nóg gecompliceerder wordt klimaatbeleid als dat ook in overeenstemming moet worden gebracht met andere beleidsvelden, zoals werkgelegenheid, voedselzekerheid,

energiezekerheid of duurzame ontwikkeling. Maatregelen ter vermindering van of aanpassing aan klimaatverandering hebben soms effect op deze andere gebieden, en andersom. Deze wisselwerking kan zelfs grote vormen aannemen, al is soms moeilijk te kwantificeren hoe groot, vooral in termen van welvaarts-groei. Maar het brede perspectief helpt wel om beleid te identificeren dat meerdere doelen in één keer dient. In het algemeen zijn de risico's van klimaatverandering moeilijk in getallen uit te drukken. Sinds enkele jaren is uit de wetenschappelijke literatuur bekend dat het hier soms gaat om grote gevolgen met kleine kansen. Een accurate kansberekening van die effecten is van groot belang om de voordelen van klimaatmaatregelen niet te onderschatten. Beleidsmakers zullen in hun keuze van maatregelen ook meewegen hoe andere sociaaleconomische aspecten worden beïnvloed, zoals economische groei of innovatie.

Perceptie van klimaatverandering speelt een rol

Klimaatbeleid is niet alleen gestoeld op cijfers, maar vooral ook op de wijze waarop individuele mensen en organisaties de risico's en de kansen percipiëren. Mensen en organisaties hebben vaak niet alleen een verschillende manier om risico's te mijden, maar ook een voorkeur voor de status quo, zelfs als deze een hoger risico inhoudt dan veranderingen. Ontwerpers van beleidsmaatregelen kunnen wel formele methodes toepassen om de kansen en risico's in verschillende systemen in rekening te brengen, inclusief de manier waarop betrokkenen die kansen waarderen, beoordelen en de bijbehorende besluitvormingsprocessen.

Grote veranderingen in investeringen nodig

Voorzichtige schattingen van de huidige investeringen in het vermijden van en aanpassen aan klimaatverandering bedragen mondiaal gezien rond 350 miljard dollar per jaar. Van dit bedrag gaat het overgrote deel naar mitigatiemaatregelen, dus maatregelen om klimaatverandering te vermijden. Voor beleidsmakers is het relevant te weten dat drastische reducties van de broeikasgasuitstoot gepaard gaan met grote veranderingen in investeringen.

Enkele scenariostudies besteden hieraan aandacht. In de referentiescenario's wordt dan eerst nog fors geïnvesteerd in nieuwe energieopwekking met fossiele brandstoffen. In de strengere emissiereductiepaden maken die investeringen snel plaats voor investeringen in koolstofarme oplossingen.

Breder perspectief

Het klimaatbeleid is in veel landen pril en de effecten op de (toekomstige) mondiale emissies zijn nog moeilijk meetbaar. Maar sinds 2008 is er een duidelijke trend waarneembaar dat beleidsmaatregelen een steeds breder perspectief krijgen, zoals nevenvoordelen voor de luchtkwaliteit, de economie en de werkgelegenheid, en het beperken van nadelige gevolgen. Dit bredere perspectief wordt vooral gezocht omdat die de beleidsmaatregelen beter aanvaardbaar en langer houdbaar maakt.

Beleed dat de breedte van de economie in acht neemt, is vaak kosteneffectiever dan beleid dat dit niet doet. Echter, de meerderheid van de klimaatmaatregelen is nog altijd

beperkt in hun bereik en vaak specifiek gericht op één sector tegelijk. Brede beleidsmaatregelen lopen door hun omvang meer kans op grote weerstand en zijn ook lastiger te ontwerpen en te implementeren dan sectorspecifiek beleid. Sectorspecifiek beleid kan onvolkomenheden in een bepaalde markt juist sneller oplossen.

De ervaringen met beleidsopties in de wereld

Beleidsopties voor klimaat en energie worden vaak geanalyseerd aan de hand van vier criteria: de effectieve invloed op het milieu, de economische effectiviteit en efficiëntie van de maatregel, de maatschappelijke acceptatie en de politieke haalbaarheid. In de literatuur worden verschillende types beleidsmaatregelen onderscheiden. Deze worden hieronder kort beschreven.

Regelgeving

Regelgeving voor zuiniger apparatuur, transportmiddelen of woningen is een populaire maatregel, die vaak wordt toegepast in combinatie met een betere informatievoorziening zoals etikettering of labels. Hoewel vaak verondersteld wordt dat regelgeving een maatschappelijk voordeel heeft, is de wetenschappelijke literatuur verdeeld over de kosten ervan voor bedrijven en individuen. Zuiniger apparaten en diensten kunnen leiden tot een frequenter gebruik, maar over de grootte van dat *rebound*-effect is men het nog niet eens.

Emissiehandel

Sinds 2008 hebben veel landen en regio's nieuwe systemen voor de handel in emissierechten opgezet, gebaseerd op *cap-and-trade*: voor verschillende industriële sectoren wordt een gezamenlijk plafond gesteld aan de jaarlijkse emissies. Onder dat plafond kunnen deelnemers aan het systeem (meestal individuele bedrijven) onderling emissierechten verhandelen. In theorie worden de goedkoopste reductie maatregelen het eerst genomen, pas daarna komen andere maatregelen in beeld. Emissiehandelssystemen halen in de regel hun emissiedoel. Maar de nog magere ervaringen laten zien dat de plafonds vaak te ruim zijn om een relevante CO₂-prijs te genereren. Zo'n CO₂-prijs is nodig om maatregelen binnen bereik te brengen die op termijn nodig zijn voor een verdere emissiereductie. Onzekerheid over de regelgeving in de toekomst is een andere factor die investeringen in innovatieve, drastische reductietechnologieën belemmert.

CO₂-belasting

Sommige landen heffen belasting op de uitstoot van CO₂ (bijvoorbeeld op motorbrandstoffen), soms niet eens ten behoeve van het klimaatbeleid maar in veel gevallen wel succesvol als het erom gaat emissies te reduceren. Zo heeft een stijging van de brandstofprijzen met 1 procent op den duur een besparing van 0,6 tot 0,8 procent op brandstoffen tot gevolg, al is het kortetermijneffect kleiner. Inkomsten worden soms gebruikt om andere belastingen omlaag te brengen of lage inkomens te compenseren. Dit illustreert dat inkomsten bepaalde maatregelen ook maatschappelijk beter aanvaardbaar kunnen maken.

Subsidies

Het schrappen van subsidies van broeikasgasrijke activiteiten is een effectief middel om broeikasgasemissies tegen te gaan, afhankelijk van de maatschappelijke context. Dit geldt speciaal voor de subsidies op brandstoffen die in veel landen nog worden verstrekt om ook mensen met lage inkomens toegang te verschaffen tot energie. Het schrappen van dergelijke subsidies vraagt om maatregelen om de armere bevolkingsgroepen te sparen.

Interactie

Verschillende beleidsmaatregelen kunnen elkaar versterken of verzwakken. Zo kunnen subsidies voor hernieuwbare energie het effect van een CO₂-belasting versterken, maar de werking van een emissiehandelssysteem verzwakken als de groei van hernieuwbare energie niet is verdisconteerd in het emissieplafond. In zo'n geval kan extra hernieuwbare energie de uitstoot van de elektriciteitssector verlagen en zo ruimte geven aan andere bedrijven om broeikasgassen uit te stoten.

Private financiering

Private partijen spelen een belangrijke rol bij de financiering van maatregelen. De private sector kan naar schatting twee derde tot drie kwart van de benodigde financiering opbrengen, die vervolgens kan worden aangevuld met publiek geld. Of deze private partijen willen investeren, is voor een groot deel afhankelijk van het lokale investeringsklimaat.

Internationale klimaatsoeverwerking

De mondiale afstemming en samenwerking op het gebied van het klimaat vindt vooral plaats onder de vlag van de Verenigde Naties, en dan speciaal onder die van het VN Klimaatverdrag (UNFCCC). Onder dit verdrag werken praktisch alle landen van de wereld samen. Het Kyoto Protocol dat tot 2020 geldt en waaronder enkele tientallen landen klimaatafspraken maakten, heeft veel lessen opgeleverd voor toekomstige afspraken: afspraken over deelname, over de praktijk van implementatie van beleid, flexibele mechanismen om inspanningen te delen, over de effectiviteit voor het milieu. Jaarlijks komen de VN-lidstaten bijeen in de Conferentie van de Partijen, de zogeheten COP's. Veel hoop wordt gevestigd op de Conferentie in Parijs in 2015, waar een nieuw mondiaal klimaatakkoord op de agenda staat.

Daarnaast zijn er vele bilaterale, multilaterale en regionale verbanden waarbinnen afspraken worden gemaakt, met verschillende niveaus van afstemming. Zo hebben de Verenigde Staten en China – de grootste broeikasgasemittenten – eind 2014 afgesproken de uitstoot te gaan beperken. Zulke afspraken kunnen het mondiale overleg inspireren en leveren niet zelden wederzijdse voordelen op voor het vermijden van en aanpassen aan klimaatverandering.

3.6 Wat kan er in Nederland?

Nederland heeft, in navolging van de Europese Unie, een klimaatdoel voor 2020 geformuleerd, en ligt op koers om de vereiste emissiereductie te halen. In 2050 wil de Europese Unie uitkomen op 80 tot 95 procent minder uitstoot dan in 1990. Om deze doelstelling te realiseren zet Nederland in op een energievoorziening die in 2050 volledig duurzaam is. Hierbij krijgen het gebruik van energie uit biomassa en het opvangen en opslaan van CO₂ een prominente positie. Hiernaast is flankerend beleid voor innovatie, onderzoek en ontwikkeling nodig om (nieuwe) technologieën en systemen marktrijp en goedkoper te maken.

In navolging van de routekaart die de Europese Unie in 2011 heeft opgesteld voor het helpen realiseren van de mondiale 2°C-doelstelling – door de broeikasgasemissies in 2050 te hebben teruggedrongen met 80 tot 95 procent ten opzichte van 1990 – is ook voor Nederland een routekaart ontworpen voor de langere termijn. Daarbij worden de voor Nederland specifieke omstandigheden in acht genomen. Hiernaast worden in de Nationale Energieverkenning 2014 de huidige trends beschreven, evenals scenario's voor de jaren tot 2020, en deels voor de jaren daarna (zie figuur 3.14). Zowel de routekaart als de energieverkenning schetst de beelden voor een mogelijke emissiereductie in Nederland. Deze beelden liggen dicht bij de meest ambitieuze scenario's uit het IPCC-rapport.

De trend in Nederland

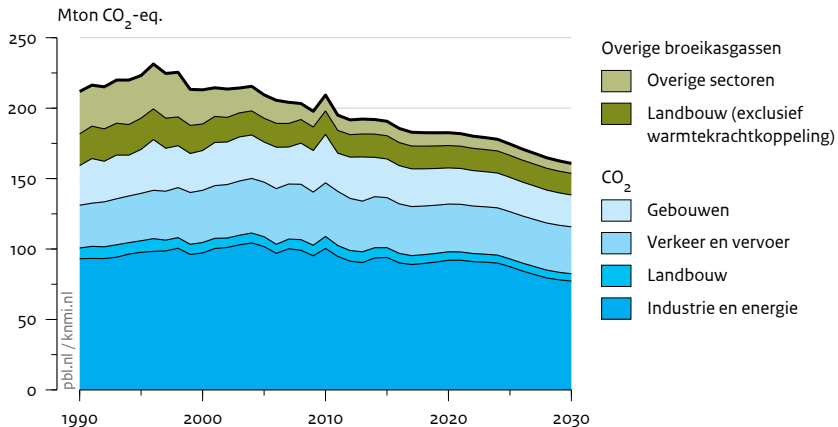
Het beleid tot 2020 en 2030

In 2008 heeft de Europese Unie de klimaatdoelstellingen voor 2020 vastgelegd in de zogenoemde 20-20-20-doelen: 20 procent minder emissies, 20 procent hernieuwbare energie en 20 procent energiebesparing in 2020. De laatste doelstelling is niet bindend, de andere twee wel.

Elke EU-lidstaat levert zijn eigen specifieke bijdrage aan de 2020-doelen, berekend naar draagkracht, beginsituatie, historische inspanningen en lokale omstandigheden. Voor Nederland is dit een aandeel van 14 procent hernieuwbare energie in 2020 en 16 procent emissiereductie voor de sectoren die niet onder het EU-brede emissiehandelssysteem vallen. Daarnaast valt ongeveer 40 procent van alle binnenlandse emissies onder het emissiehandelssysteem dat in 2020 een emissiereductie van 19 procent moet opleveren. Nederland realiseert tussen 1990 en 2020 naar verwachting een emissiereductie van broeikasgassen van in totaal 13 procent.

Voor het beleid in de jaren tussen 2020 en 2030 hebben de Europese Commissie en de Europese Raad al overeenstemming bereikt: 40 procent emissiereductie ten opzichte van 1990 en 27 procent efficiëntieverbetering, en ten minste 27 procent van onze energieconsumptie moet afkomstig zijn van hernieuwbare energiebronnen. In dit voorgestelde beleid maakt elke lidstaat een eigen energieplan. Opgeteld moeten deze plannen leiden tot de realisatie van de gezamenlijke EU-doelen. De Europese Unie als geheel (inclusief het Europese Parlement) moet hierover nog een akkoord sluiten.

Figuur 3.14
Emissie van broeikasgassen in Nederland per sector



Bron: NEV 2014

Ook in Nederland is CO₂ het belangrijkste broeikasgas. De uitstoot van overige broeikasgassen is meer gedaald.

Dit raamwerk vormt de inzet van de Europese Unie bij de onderhandelingen over de mondiale klimaatafspraken die nu worden gevoerd. Alle landen die zijn aangesloten bij de UNFCCC, hebben afgesproken om uiterlijk tijdens de Klimaatop van Parijs in november 2015 mondiale klimaatafspraken te maken die vanaf 2020 gaan gelden. Deze mondiale onderhandelingen kunnen eventueel weer leiden tot aanpassingen van de EU-plannen voor 2030.

Het Energieakkoord

In 2013 is onder supervisie van de Sociaal-Economische Raad een Energieakkoord gesloten tussen overheid, bedrijfsleven en milieuorganisaties. Dit Energieakkoord is bedoeld om de transitie naar een duurzame energievoorziening te versnellen en omvat diverse doelen ter aanvulling op en met hogere ambities dan de 2020-doelen van de Europese Unie.

Deze binnenlandse doelen beslaan een fors deel van de Nederlandse energiehouding. Kort samengevat luiden ze:

- 14 procent hernieuwbare energie in 2020, waarvan 6.000 megawatt aan windvermogen op land;
- een verdere groei van het aandeel hernieuwbare energie naar 16 procent in 2023 met onder andere 4.450 megawatt aan offshore-windvermogen;
- een energiebesparingtempo met 1,5 procent per jaar, resulterend in 100 petajoule extra energiebesparing in 2020;
- 15.000 extra banen, gerelateerd aan het Energieakkoord.

Tabel 3.2

De ontwikkeling van het binnenlands primaire energiegebruik volgens het scenario met het ingezette beleid uit de Nationale Energieverkenning 2014, uitgesplitst naar energiedrager

Primair energiegebruik	2000	2010	2012	2014	2015	2020	2023	2030
Totaal (PJ)	3.125	3.399	3.260	3.167	3.167	3.158	3.166	3.104
Aardgas	1.510	1.544	1.355	1.196	1.197	1.172	1.129	994
Kolen	329	318	344	445	447	397	400	326
Olie	1.092	1.307	1.264	1.189	1.178	1.183	1.186	1.194
Overig fossiel	33	51	54	55	55	63	63	61
Nucleair	41	38	39	43	43	43	43	42
Hernieuwbaar	53	130	143	160	174	266	323	475
Importsaldo elektriciteit	68	10	62	79	74	35	22	11
	2000	2010	2012	2014	2015	2020	2023	2030
Totaal bruto eindverbruik	2.245	2.215	2.185	2.177	2.177	2.163	2.176	2.192

Bron: Nationale Energieverkenning (2014)

Nog voor 2020 zou aardolie de toepositie van aardgas als energiedrager in de Nederlandse energievoorziening kunnen overnemen.

Ook voor 2030 en 2050 zijn al enkele nationale doelen geformuleerd:

- in 2030 17 procent minder emissies in transport en mobiliteit;
- in 2050 een volledig duurzame energievoorziening (energie en transport), 80 tot 95 procent emissiereductie met een lagere reductie (60 procent minder emissies) in transport en mobiliteit.

In 2016 zal, zoals afgesproken, een tussentijdse evaluatie van het Energieakkoord plaatsvinden, met eventueel aanvullende maatregelen tot gevolg.

De voortgang tot 2012

Volgens de Nationale Energieverkenning 2014 (ECN & PBL 2014) en de Balans van de Leefomgeving 2014 (PBL 2014) ligt Nederland op schema om de doelstellingen voor emissiereductie te halen. Dit was al het geval voor de Kyoto-verplichting voor de jaren 2008-2012. In die periode mocht Nederland 999 miljoen ton CO₂-equivalenten uitstoten (gemiddeld 6 procent minder dan in 1990). Daar bleef Nederland ruim onder. Dit getal is overigens wel inclusief de emissiereductie (in de vorm van emissierechten) die Nederland heeft aangekocht in landen zonder reductiedoelstellingen.

In het laatste jaar van de Kyoto-periode (2012) was in Nederland de emissie ten opzichte van 1990 al afgenomen met 18 procent, tot 191 miljoen ton CO₂-equivalenten. Dit gebeurde ondanks dat het primaire energiegebruik toenam met zo'n 20 procent. De verklaring hiervoor ligt in de eerste plaats in de reductie van de uitstoot van de 'overige broeikasgassen', zoals methaan, lachgas en gefluoreerde gassen, uit bijvoorbeeld

gaswinning en gastransport, landbouw en industrie. Ook nam de CO₂-uitstoot minder toe dan het primaire energieverbruik (10 respectievelijk 20 procent). Daarnaast heeft Nederland de rechten aangekocht van buitenlandse emissiereducties die in de Kyoto-periode 2008-2012 mochten meetellen.

De voortgang tot 2020

Voor Nederland ligt een verdere afname van de emissies in het verschiet. Naar verwachting zullen de broeikasgasemissies zonder extra acties tot 2020 nog eens afnemen met 3 procent, naar 185 miljoen ton CO₂-equivalenten (ECN & PBL 2014). Dit komt vooral doordat de CO₂-emissies in de sectoren gebouwen, verkeer en vervoer en glas-tuinbouw dalen. De daling in deze sectoren is iets sterker dan de toename door een verder stijgende uitstoot in de energieopwekking en de industrie. Worden bovendien de voorgenoemde beleidsmaatregelen uit het Energieakkoord uitgevoerd, dan bedraagt de emissiereductie tussen 2013 en 2020 zo'n 6 procent (179 miljoen ton CO₂-equivalenten). Deze extra maatregelen betreffen vooral de groei van het aandeel hernieuwbare energie, het sluiten van oude kolencentrales en extra energiebesparing in gebouwen. Het is echter onzeker of de extra voorgenoemde maatregelen ook zullen worden geëffectueerd. De voorgenoemde maatregelen komen vooral voort uit het Energieakkoord en de EU-richtlijn voor energiebesparing uit 2013. In de Nationale Energieverkenning 2014 wordt geschat dat zowel voor hernieuwbare energie als voor energiebesparing de extra maatregelen voor 2020 nog niet voldoende zijn om de gestelde doelen te realiseren.

Voor hernieuwbare energie blijven de prognoses voor 2020 en 2023 van zo'n 12 respectievelijk 15 procent achter bij de doelstellingen van 14 en 16 procent voor die jaren. Wel neemt het aandeel hernieuwbare energie de komende jaren sneller toe dan ooit, met vooral veel meer wind- en zonne-energie. Maar er zitten grote onzekerheden in de daadwerkelijke realisatie van projecten. Ook wanneer subsidies al zijn toegekend, is onzeker hoe snel een project kan worden gerealiseerd en hoeveel projecten uiteindelijk helemaal niet worden gebouwd.

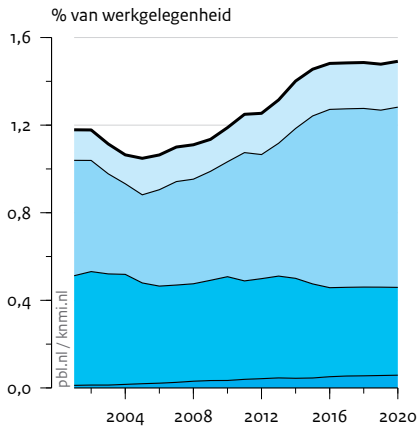
Het tempo voor energiebesparing (met minder energie hetzelfde doen) lag in Nederland in de periode 2000-2010 op 1,1 procent per jaar. Dit percentage zal de komende jaren nog wat toenemen, maar niet tot de 1,5 procent die in het Energieakkoord is gesteld, zo schatten ECN en PBL in de Energieverkenning 2014. De 100 petajoule extra besparing waarvoor de partijen in het Energieakkoord tekenden, zal dus niet worden gerealiseerd, maar op zijn best 61 petajoule bedragen. Met het voorgenoemde beleid groeit het tempo naar 1,2 procent per jaar. Hiermee komt wel de nationale doelstelling binnen bereik die voortkomt uit de EU-richtlijn voor energie-efficiëntie.

De rol van aardgas in Nederland

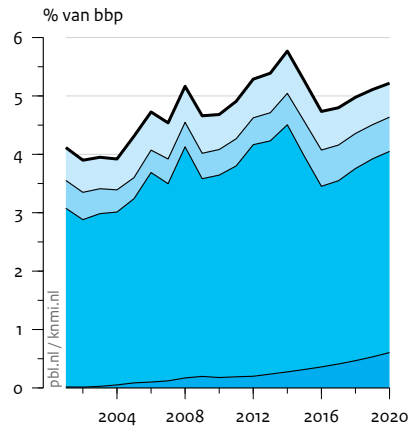
Aardgas is sinds de ontdekking van de velden in Slochteren de belangrijkste energiedrager in de Nederlandse energiehuishouding. Onder invloed van de energiemarkt (hoge gasprijzen en lage kolenprijzen in de elektriciteitsvoorziening) en het klimaatbeleid (zuiniger ketels in huizen en kantoren) is deze positie echter aan het veranderen.

Figuur 3.15
Economische waarde van energiesector in Nederland

Aandeel werkgelegenheid



Bijdrage aan bruto binnenlands product



- Exploitatie netwerken elektriciteit en aardgas
- Activiteiten uit investeringen in hernieuwbaar en energiebesparing
- Exploitatie productie en handel conventionele energie
- Exploitatie productie en handel hernieuwbare energie

Bron: NEV 2014

Links: in het aandeel van de werkgelegenheid in hernieuwbare energie (de exploitatie van bronnen en de dienstverlening daaromheen) zit groei. Rechts: het aandeel van de energiesector in het bruto binnenlands product varieert tussen de 4 en 5 procent, zoals geprojecteerd door de Nationale Energieverkenning 2014.

Bovendien lijdt de aardgaswinning aan een slechter imago, door de toegenomen aardbevingen in Groningen en de aandacht daarvoor.

Door de lage wereldprijzen voor steenkool en de steeds grotere import van elektriciteit is de inbreng van aardgas in de stroomproductie in de eerste jaren van het decennium 2010-2020 afgenomen. De prijs van CO₂ was in deze jaren te laag om het klimaatvoordeel dat aardgas heeft ten opzichte van steenkool, te kunnen uitdrukken. Ook energiebesparing in de warmtevraag speelt een belangrijke rol. Omdat het gebruik van aardolie stabiel blijft, vooral in de sector mobiliteit en als industriële grondstof, zou aardolie de topospositie van aardgas aan het eind van dit decennium kunnen overnemen (zie tabel 3.2). Dit heeft een negatief effect op de mogelijke reductie van broeikasgasemissies.

Na 2020 zal bovendien de productie van het Nederlands aardgas afnemen. Tussen 2025 en 2030 wordt Nederland een netto-importeur van aardgas, terwijl het momenteel juist netto aardgas exporteert. Groen gas en eventueel de productie van schaliegas in Nederland kunnen de omslag nog even uitstellen.

Effecten op werkgelegenheid en economie

In totaal bedraagt de werkgelegenheid in de sector energievoorziening (inclusief investeringen in hernieuwbare energie en energiebesparing) tussen de 200.000 en 250.000 voltijdsbanen, zo blijkt uit de Nationale Energieverkenning 2014. De verhouding tussen conventionele energie (fossiel en kern) en nieuwe energie verandert gestaag in het voordeel van de laatste categorie (zie figuur 3.15, links).

Energiebesparing, en dan vooral in de bouw (bij installateurs en fabrikanten van isolatie en dubbelglas), is de belangrijkste bron van nieuwe werkgelegenheid. Hier zijn nu ongeveer 20.000 tot 25.000 voltijdsbanen: een aantal dat ook tijdens de afgelopen malaise in de bouwsector relatief stabiel bleef. Bij hernieuwbare energie en elektrisch rijden is de werkgelegenheid nog relatief klein, maar ook daarin zit groei. Overigens zijn dit getallen voor de bruto werkgelegenheid, dus exclusief het verlies aan banen dat door de verschuiving van activiteiten wordt veroorzaakt.

Ook voor de economie, gemeten in aandeel van het bruto binnenlands product (bbp), veranderen de verhoudingen, maar in een ander tempo dan van de werkgelegenheid. Fluctuaties zijn hier groter vanwege sterk variërende marktprijzen. De exploitatie, productie en handel van aardgas en andere fossiele brandstoffen, vertegenwoordigen voorlopig nog het leeuwendeel van de toegevoegde waarde van energie aan het bbp. De rol van hernieuwbare energie en besparing neemt echter gestaag toe (zie figuur 3.15, rechts).

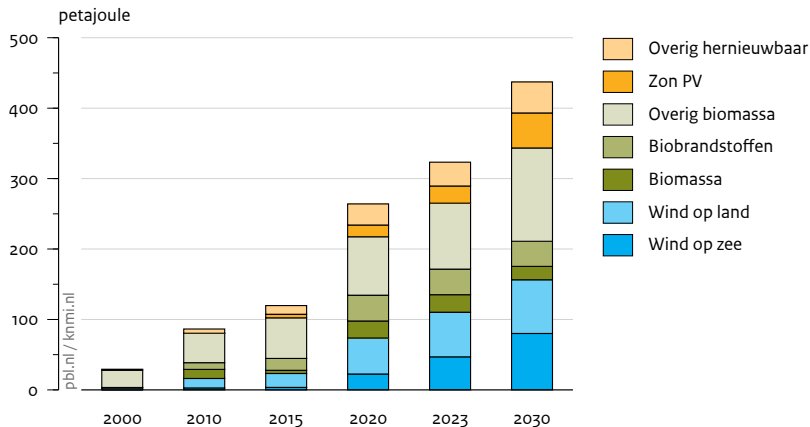
De voortgang tot 2030

De Nationale Energieverkenning 2014 geeft ook een doorkijkje naar de periode van 2020 tot 2030, waarvoor nog nauwelijks concrete beleidsmaatregelen bestaan. De versterkte groei van het aandeel hernieuwbare energie die in de jaren voor 2020 wordt verwacht, zet ook na dat jaar vermoedelijk door (figuur 3.16), maar kent ook onzekerheden. Stel dat de Europese Unie na 2020 bijvoorbeeld niet langer specifieke beleidsmaatregelen voert voor het gebruik van biobrandstoffen in de sector vervoer, dan zou het aandeel hernieuwbare energie in Nederland met 1,7 procent kunnen terugvallen. Dit is een risico voor het tussendoel uit het Energieakkoord van 16 procent hernieuwbare energie in 2023, en uiteraard ook voor de periode erna.

De route naar klimaatneutraal in 2050

In navolging van de Europese Unie heeft ook Nederland sinds 2011 een routekaart voor een (bijna) klimaatneutrale economie in 2050 (PBL & ECN 2011). Het overgaan op een koolstofarm energiesysteem is een ingrijpend proces waarvoor een lange adem is vereist, zo blijkt uit de schets hiervoor van de eerste vijftien jaar van de door PBL en ECN (2011) opgestelde routekaart. Nieuwe processen en producten zijn nodig, inclusief de bijbehorende ketens en infrastructuur die de bestaande systemen vervangen. Hoe het klimaatneutrale systeem er in 2050 precies uitziet? Er zijn veel varianten mogelijk. Hier volgt een schets van enkele hoofdlijnen voor een klimaatneutraal systeem in Nederland uit de routekaart (PBL & ECN 2011).

Figuur 3.16

Bijdrage van verschillende technologieën hernieuwbare energie in Nederland

Bron: NEV 2014

Als de huidige ondersteunende maatregelen gehandhaafd blijven, neemt de productie van hernieuwbare energie ook na 2020 volgens de Nationale Energieverkenning nog fors toe.

Veel bouwstenen zijn nodig

Een klimaatneutraal systeem vergt veel nieuwe technologieën en infrastructuur. Als om welke reden dan ook een bouwsteen geen deel kan uitmaken van het nieuwe systeem, trekt dit een wissel op de andere technologieën, met alle kosten vandien. Het gaat om het verminderen van de energievraag, de inzet van biomassa, een CO₂-vrije elektriciteitsproductie (hernieuwbare energiebronnen en kernenergie), en de afvang en opslag van CO₂.

Bio-energie krijgt een belangrijke rol

Zonder de inzet van biomassa zal Nederland het niet voor elkaar krijgen om de CO₂-uitstoot met 80 tot 95 procent te verminderen. De toepassingsgebieden zijn bij voorkeur groen gas (ter vervanging van aardgas) en transportbrandstoffen op de weg, op het water en in de lucht. Voor deze sectoren is vaak nog weinig zicht op alternatieve koolstofarme oplossingen, terwijl die er voor de elektriciteitsproductie wel zijn. De groeiende vraag naar bio-energie vergt wel grote zorgvuldigheid. Nederland zal vermoedelijk grotendeels zijn aangewezen op import van biomassa, en moet daarbij zien te voorkomen dat de veranderingen in het landgebruik die een toenemende vraag naar biomassa teweegbrengt, juist leiden tot een toenemende netto uitstoot van broeikasgassen. Dit laatste kan immers gebeuren als bossen worden gekapt voor de aanplant van in Nederland te gebruiken energiegewassen. Of, via een omweg, als eerst landbouwgrond wordt omgevormd voor het verbouwen van energiegewassen en de aanleg van nieuwe landbouwgrond vervolgens ten koste gaat van bossen. Aansluiten bij

en monitoren van internationale afspraken over de productie van biomassa zijn dus belangrijk.

CO₂ van industrie en centrales: afvangen en opslaan

Nederland heeft een goede uitgangssituatie bij het afvangen en opslaan van CO₂ (CCS), mede dankzij het perspectief van een behoorlijke capaciteit voor het ondergronds opslaan van CO₂ in lege gasvelden. Watervoerende lagen onder de Noordzee bieden nog veel meer opslagcapaciteit. Door bijna tien jaar ervaring met nationale onderzoekprogramma's op dit gebied is in Nederland bovendien veel kennis aanwezig. Afzonderlijke componenten van het afvangen, transporteren en opslaan van CO₂ worden in de wereld al op industriële schaal toegepast. Maar voor hun onderlinge samenhang is nog een grootschalig demonstratieproject nodig, om zowel de technische haalbaarheid en veiligheid aan te tonen als de kosten van CCS verder omlaag te brengen. Een voorgenomen grootschalig demonstratieproject bij een kolencentrale op de Maasvlakte stuit vooralsnog op financiële barrières. Niettemin is CCS ook in Nederland van belang zolang het gebruik van fossiele brandstoffen doorgaat. De combinatie van CCS en biomassa biedt, zowel op mondiale als op nationale schaal, bijzondere perspectieven. Ook in de Nederlandse economie zijn negatieve emissies nuttig en mogelijk noodzakelijk voor een gebalanceerde bijdrage aan de 2°C-doelstelling. Het ministerie van Economische Zaken bereidt momenteel een langetermijnvisie voor CCS in Nederland voor.

Kosten: onzeker

Zoals bij de mondiale scenario's is onzeker wat de kosten zijn van een transitie naar een klimaatneutrale economie in Nederland. Schattingen lopen uiteen van 0 tot 20 miljard euro per jaar extra ten opzichte van het handhaven van het huidige systeem. De onzekerheid schuilt vooral in de kostenontwikkeling voor nieuwe technieken en in de prijzen voor brandstoffen en biomassa. Met de inzet van koolstofarme technologieën nemen de kapitaallasten in het algemeen toe in vergelijking met de operationale kosten voor brandstoffen en onderhoud.

Bij deze schattingen zijn de positieve effecten op de natuur en de gezondheid niet inbegrepen, noch de vermeden kosten van schade door klimaatverandering. Schattingen van die voordelen zijn aan nog meer onzekerheden onderhevig.

De transitie is begonnen

Een schone economie in 2050 zal gedeeltelijk steunen op technologieën en systemen die nu nog niet bestaan of relatief onderontwikkeld zijn, die nog te duur zijn, of beide. Een voorbeeld is de opslag van energie. Dergelijke systemen moeten wel worden ontwikkeld tot ze marktrijp zijn en op brede schaal inzetbaar. Het technologiebeleid moet zich daar nu al rekenschap van geven. Doelstellingen voor 2020 en 2030 geven daarvoor op zichzelf nog onvoldoende impulsen omdat die doelen kunnen worden gehaald zonder de toekomstige systemen. Flankerend beleid voor innovatie, onderzoek en ontwikkeling is daarom nodig.

Nederland kan niet zonder het buitenland

Uit de IPCC-rapportage en de Nationale Energieverkenning 2014 valt op te maken hoeveel moeite het zal kosten om de mondiale temperatuurstijging te beperken tot onder de 2°C. Er is voldoende potentieel om de energievoorziening en de industrie te veranderen op een manier die aan de internationaal gedragen klimaatambitie voldoet. Dergelijke ambities betekenen dat iets moet worden ingeboet op de groei van het bruto nationaal product. Het uitsluiten van CCS of van een verantwoorde toepassing van bio-energie gaat ten koste van een kostenefficiënte transitie naar de broeikasgasarme economie.

Veranderingen op deze schaal stuiten op veel barrières. Vaak zijn deze niet eens technisch of financieel van aard, maar maatschappelijk of politiek. Denk aan de onbekendheid met de mogelijkheden in de toekomst, of het verschillend inschatten en beoordelen van de risico's op klimaatverandering, of de kansen op economische voordelen van nieuwe activiteiten in energie en industrie.

Eén conclusie is glashelder: de ontwikkeling van Nederland is stevig verknoopt met de internationale ontwikkelingen. Dit geldt bijvoorbeeld voor technologische innovatie. Hoewel deze misschien zonder Nederland zou kunnen plaatsvinden, is deelname om meer dan één reden gewenst of zelfs noodzakelijk. Om het volle potentieel aan technologieën tot 2050 te kunnen benutten, zal ook kennis in huis aanwezig moeten zijn. Daarnaast is innovatie in veel gevallen een bron voor nieuwe economische activiteit die Nederland niet zal willen missen. En ten slotte is er het morele argument dat ambitieuze emissiereducties niet mogelijk zijn als landen zoals Nederland niet op volle kracht meedoen.

Het IPCC vraagt om internationale coördinatie, en het lijkt voor Nederland niet verstandig om al te zeer uit de pas te lopen met de internationale ontwikkelingen. Voorlopen op de ontwikkelingen kan weliswaar leiden tot economisch gewin, zoals meer werkgelegenheid en toenemende export, maar heeft ook risico's voor hogere kosten. Die hogere kosten zijn er echter ook als Nederland zou gaan achterlopen op de ontwikkelingen in de omringende landen – mocht dit voor een volwaardige EU-lidstaat al mogelijk zijn.

Het assessmentrapport van het IPCC en de Nationale Energieverkenning 2014 bieden ten opzichte van voorgaande rapportages steeds meer zekerheden, en duiden ook beter waar de onzekerheden schuilen. Zij geven daardoor steeds duidelijker de mogelijke richtingen aan en de kansen die daarmee samenhangen. In Nederland is met het Energieakkoord een belangrijke stap gezet. Het is aan de overheden en de stakeholders

om te besluiten welke ambities zij haalbaar achten, welke paden zij willen volgen om daarbij een goede oriëntatie te behouden op de internationale ontwikkelingen en afspraken. Maatschappelijk draagvlak is hierbij belangrijk: burgers kunnen de transitie versnellen – bijvoorbeeld door energiecoöperaties op te richten – maar ook vertragen – bijvoorbeeld door windmolenparken tegen te houden.

Als het IPCC iets duidelijk maakt dan is het dit: ‘geen besluit’ over het te volgen emissiepad is ook een besluit. Het achterwege blijven van nationale en internationale besluiten over mitigatiemaatregelen betekent namelijk dat sommige ambities om klimaatverandering tegen te gaan technisch en economisch onhaalbaar worden. Dat verzwaart de opgave voor latere jaren en generaties.

Noot

- 1 Andere broeikasgassen dan CO₂ hebben een ander effect op het klimaat. Die andere broeikasgassen worden steeds omgerekend naar CO₂-equivalenten, volgens methoden die in 1995 zijn vastgesteld. Als het alleen om het broeikasgas CO₂ gaat, wordt dat in dit rapport expliciet aangegeven.

Syntheserapport van het IPCC: kernpunten

Samenvatting

Artikel 2 van het VN-klimaatverdrag stelt dat klimaatbeleid moet zijn gericht op het vermijden van gevaarlijke menselijke beïnvloeding van het klimaatsysteem. Het IPCC-rapport geeft inzicht in de relatie tussen risico's op klimaatschade en beperking van de mondiale uitstoot van broeikasgassen.

Zelfs als de uitstoot van broeikasgassen stopt, zullen de effecten van klimaatverandering nog lang aanhouden. De kans op abrupte of onomkeerbare veranderingen neemt toe als de mondiale temperatuur verder stijgt.

Het succes van adaptatie en mitigatie is afhankelijk van effectief bestuur, de bereidheid tot innoveren en investeren in milieuvriendelijke technologie en infrastructuur, en van de leefstijlen binnen de wereldgemeenschap. Adaptatie en mitigatie zullen alleen effectief zijn als het internationale, nationale en lokale beleid bij elkaar passen.

Beleidsinzet op deze drie schaalniveaus voor de ontwikkeling, verspreiding en overdracht van technologie, kan de effectiviteit van adaptatie- en mitigatiebeleid aanvullen en verbeteren.

Om de 2°C-grens voor temperatuurstijging niet te overschrijden, is duurzame ontwikkeling een noodzaak. Er is in beginsel een groot aantal mogelijkheden om mitigatie en adaptatie te verbinden met andere na te streven maatschappelijke doelen, zoals een duurzame ontwikkeling en het verbeteren van de kwaliteit van de leefomgeving. Dit vraagt om een integrale benadering op alle schaalniveaus.

In de Nederlandse Klimaatagenda 2013 plaatst het kabinet de ambities van Nederland voor klimaatadaptatie en -mitigatie in de context van een duurzame ontwikkeling en een integrale aanpak. De langetermijnambities van de Klimaatagenda passen bij de Europese ambities voor het terugdringen van de uitstoot van broeikasgassen in 2050.

4.1 Inleiding

Het Syntheserapport van het IPCC (IPCC 2014c) bevat informatie uit de werkgroepen I, II en III en legt belangrijke verbanden tussen deze informatie. In dit slothoofdstuk vatten we de belangrijkste punten uit de voorgaande drie hoofdstukken – waarin de resultaten van de werkgroepen zijn besproken – eerst kort samen:

- Klimaatverandering en de effecten daarvan zijn wereldwijd al merkbaar.
- Het is uiterst waarschijnlijk dat de mens de belangrijkste veroorzaker is van de sinds het midden van de twintigste eeuw waargenomen opwarming van de aarde.
- Nederland krijgt de komende eeuw te maken met gemiddeld hogere temperaturen, veranderende neerslagpatronen en een stijgende zeespiegel. De kans op hittegolven in de zomer neemt toe en neerslagextremen zullen vaker voorkomen.
- Zonder ingrepen in de uitstoot van broeikasgassen zal klimaatverandering in de komende eeuwen doorzetten.
- Om klimaatverandering te beperken, is dan ook een forse vermindering nodig van de mondiale uitstoot van broeikasgassen. Om de 2 °C-doelstelling te halen, is in 2050 een reductie nodig van de uitstoot aan broeikasgassen van minstens 40 procent ten opzichte van 2010.
- Er zijn veel opties om de uitstoot van broeikasgassen terug te dringen. Ook een ambitieuze inzet op emissiereductie zal op mondiale schaal naar verwachting maar een beperkte aanslag op de economische groei hoeven te betekenen.
- Hoe langer het duurt voordat de uitstoot wordt teruggedrongen, hoe duurder en moeilijker het wordt om klimaatverandering te beperken en hoe groter de adaptatie-opgaven zijn.
- Sommige effecten van klimaatverandering, zoals verzuring van de oceanen of een verschuiving van de verspreidingsgebieden van dieren en planten, kunnen met adaptatiemaatregelen niet worden opgevangen.

Tegen deze achtergrond belichten we de vijf doorsnijdende onderwerpen die het IPCC in het Syntheserapport naar voren brengt en die minder aandacht hebben gekregen in onze samenvattingen van de IPCC-rapporten in de hoofdstukken 1, 2 en 3. Deze onderwerpen zijn: de samenhang tussen mondiale temperatuurstijging en ernstige mondiale klimaatschade (paragraaf 4.2), de mogelijke klimaatverandering en risico's na 2100 (paragraaf 4.3), de voorwaarden en belemmeringen voor klimaatmaatregelen (paragraaf 4.4), benaderingen van klimaatbeleid (paragraaf 4.5), en de samenwerking met duurzame ontwikkeling (4.6). Ten slotte bespreken we in paragraaf 4.7 kort de Nederlandse Klimaatagenda.

4.2 Vermijden van gevaarlijke menselijke beïnvloeding van het klimaatsysteem

Artikel 2 van het VN-klimaatverdrag stelt dat klimaatbeleid gericht moet zijn op het vermijden van gevaarlijke menselijke beïnvloeding van het klimaatsysteem. Het IPCC-rapport geeft inzicht in de relatie tussen de risico's op klimaatschade en beperking van de mondiale uitstoot van broeikasgassen.

Figuur 4.1 geeft een illustratie van het combineren van de resultaten van de drie IPCC-werkgroepen; in deze figuur is de informatie over de relatie tussen CO₂-emissies en klimaatverandering (werkgroep I) gecombineerd met de informatie over de risico's op klimaatschade (werkgroep II) en de scenario's voor CO₂-concentraties (werkgroep III). De relatie tussen de mondiale temperatuurstijging en de risico's op klimaatschade is te zien in het zogenoemde *burning amber*-diagram in figuur 4.1 linksboven. De risico's zoals schade aan ecosystemen en schade veroorzaakt door extreme weersomstandigheden nemen sterk toe naarmate de temperatuur meer stijgt. De afgesproken 2°C-doelstelling is de uitkomst van een beleidsmatige afweging tussen de aanvaardbaarheid van de verwachte gevolgen en de kosten van het vermijden ervan. Dit geeft een goed beeld van de reductieopgaven die zijn verbonden aan de diverse klimaatdoelen en van de bijbehorende onzekerheid.

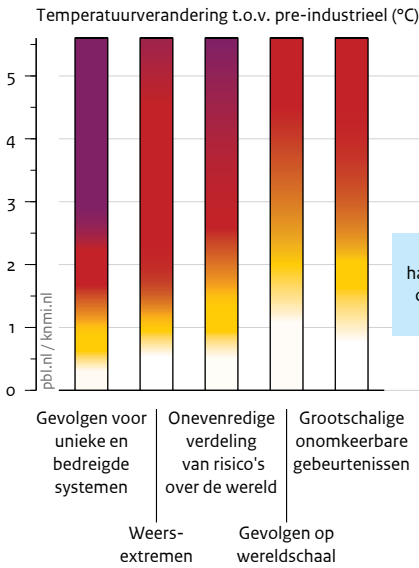
Rechtsboven in figuur 4.1 wordt de relatie getoond tussen de cumulatieve CO₂-emissies en de temperatuurstijging, gebaseerd op de berekeningen van klimaatmodellen (roze gekleurd gebied). De spreiding wordt veroorzaakt door de onzekerheid over de werking van het klimaatsysteem. In de figuur staan ook de emissiepaden die IPCC-werkgroep III heeft toegepast. In de onderste grafiek van figuur 4.1 wordt de cumulatieve CO₂-emissie gekoppeld aan de bijbehorende emissiepaden tot aan het jaar 2100 (variërend van lage emissiepaden, RCP 2.6, tot hoge emissiepaden, RCP 8.5).

Figuur 4.1 laat zien welk emissiepad noodzakelijk is om de temperatuurstijging te beperken tot 2°C. Dit betekent dat de cumulatieve CO₂-emissie in de eenentwintigste eeuw niet hoger mag uitkomen dan circa 3.500 gigaton CO₂. Om dit te bereiken, moeten de wereldwijde emissies in het jaar 2050 40 tot 70 procent lager zijn dan in 2010, en in het jaar 2100 bijna nul of zelfs negatief. Voor het 2°C-emissiepad lijkt een geringe toename van de emissies gedurende korte tijd mogelijk. Maar hoe langer de toename voortduurt, hoe moeilijker de ombuiging zal zijn in de jaren erna. De 2°C-doelstelling wordt waarschijnlijk niet gehaald als de emissies in 2030 hoger liggen dan 50 miljard ton.

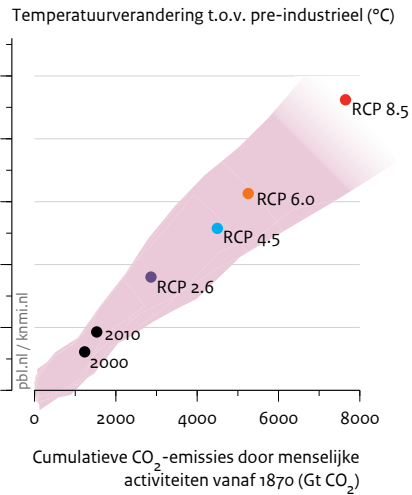
Figuur 4.1

Relatie tussen klimaatrisico, temperatuurverandering, cumulatieve CO₂-emissies en karakteristieke emissiepaden

Risico's door klimaatverandering



Relatie temperatuur en cumulatieve CO₂-emissies, 2100



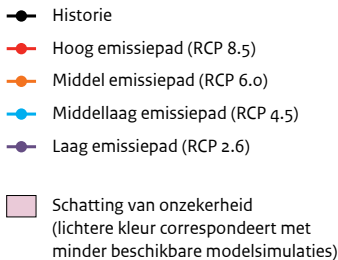
Risico's hangen af van cumulatieve emissies

Cumulatieve emissies hangen af van emissies deze eeuw

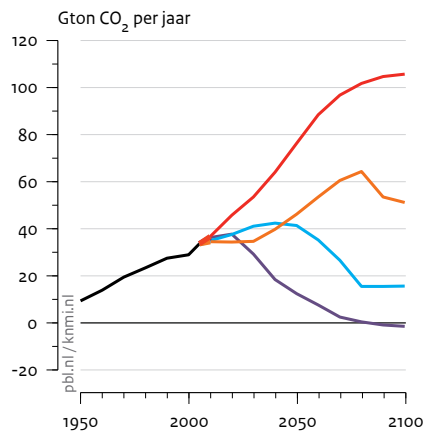
Extra risico door klimaatverandering



Karakteristieke emissiepaden



Mondiale CO₂-emissies door menselijke activiteiten



Bron: IPCC SPM 2014

Naarmate de temperatuur stijgt, nemen de effecten van klimaatverandering op wereldschaal sterk toe (linksboven). De temperatuur stijgt bij verdere ophoping (cumulatie) van CO₂ in de atmosfeer en de temperatuurstijging is afhankelijk van de verschillende emissiepaden (rechtsboven). De onderste grafiek laat het verloop zien van de emissiepaden in de tijd tot 2100. Om de 2°C-doelstelling te halen, is in 2050 een reductie nodig van minstens 40 procent van de uitstoot aan broeikasgassen ten opzichte van 2010.

4.3 Klimaatverandering heeft effecten op de lange termijn

Zelfs als de uitstoot van broeikasgassen stopt, zullen de effecten van klimaatverandering nog lang aanhouden. De kans op abrupte of onomkeerbare veranderingen neemt toe als de mondiale temperatuur verder stijgt.

Sinds de industriële revolutie (1850-1900) is de aarde met 0,8°C opgewarmd. Zelfs als de mondiale uitstoot aan broeikasgassen sterk wordt teruggebracht, zal de opwarming aan het eind van de eenentwintigste eeuw naar verwachting zijn opgelopen tot 2°C. Meer uitstoot van broeikasgassen leidt ook tot een verdere opwarming ná 2100. Daarnaast reageert het klimaatsysteem erg traag op temperatuurveranderingen. Het belangrijkste antropogene broeikasgas CO₂ heeft in de atmosfeer namelijk een levensduur van meer dan honderd jaar. Dit betekent dat zelfs als de door de mens veroorzaakte uitstoot van broeikasgassen volledig is gestopt, het nog vele eeuwen warmer zal blijven, tenzij de CO₂ actief uit de atmosfeer wordt gehaald.

Blijft de hogere temperatuur na 2100 stabiel, dan zal een aantal effecten van klimaatverandering verder doorzetten. Dit geldt bijvoorbeeld voor het opwarmen van de oceanen, het afsmelten van de ijskappen, het stijgen van de zeespiegel, het verschuiven van dier- en plantensoorten en het veranderen van ecosystemen.

Voortgaande verzuring en zeespiegelstijging

De langetermijneffecten zijn op een tijdschaal van generaties moeilijk te keren. Zo zullen de temperatuurstijging en de verzuring van de oceanen gedurende lange tijd toenemen als de CO₂-uitstoot blijft doorgaan. Dit heeft een grote invloed op het zeeleven. Ook zal de wereldgemiddelde zeespiegelstijging na 2100 nog vele eeuwen doorgaan. In hoeverre de zeespiegel stijgt, is afhankelijk van de mate waarin de toekomstige uitstoot aan broeikasgassen kan worden verminderd. De drempel waarbij de Groenlandse ijskap helemaal zal afsmelten – en waardoor de zeespiegel wereldwijd tot zeven meter extra zou kunnen stijgen – is onzeker, maar ligt naar verwachting bij een opwarming van tussen 1°C en 4°C. Dit houdt in dat ook wanneer de wereldtemperatuur bij een opwarming van 2°C stabiliseert, het op basis van de huidige inzichten dus niet uit te sluiten is dat het Groenlandse landijs uiteindelijk afsmelt. De verwachting is dat het afsmelten wel duizend jaar of langer kan duren. Er is echter nog onvoldoende kennis en er zijn nog veel onzekerheden over het smeltproces van zowel de Groenlandse als Antarctische ijskappen. Vanwege het grote (overstromings)risico voor Nederland vraagt dit om een blijvende aandacht en zorgvuldige monitoring.

Verhoogd risico op plotselinge en onomkeerbare veranderingen

Klimaatverandering leidt ook tot een verhoogd risico op plotselinge en onomkeerbare veranderingen in de ecosystemen op land, in zee en in zoet water, met inbegrip van de wetlands. De kans op dergelijke veranderingen neemt naar verwachting toe als de klimaatverandering in omvang en snelheid toeneemt. Zo kunnen de arealen met permafrost substantieel afnemen en grotendeels verdwijnen als de wereldtemperatuur verder stijgt. Bovendien komt bij het smelten van de permafrostbodems het broeikas-

gas methaan (CH₄) vrij, dat op zijn beurt weer bijdraagt aan een verdere stijging van de broeikasgasconcentraties in de atmosfeer.

4.4 Voorwaarden en belemmeringen voor adaptatie- en mitigatiemaatregelen

Het succes van adaptatie en mitigatie is afhankelijk van effectief bestuur, de bereidheid tot innoveren en investeren in milieuvriendelijke technologie en infrastructuur en van de leefstijlen binnen de wereldgemeenschap.

Het huidige klimaatbeleid heeft nog niet geleid tot een beperking van de uitstoot van broeikasgassen op mondiale schaal. Hierbij spelen onder andere de verschillende belangen van landen een belangrijke rol, evenals de daardoor trage besluitvorming en het gebrek aan draagkracht voor verregaande beleidsbeslissingen. Het ligt niet aan onvoldoende kennis over de mogelijke oplossingen. Met de nu beschikbare kennis en technologie kan de uitstoot van broeikasgassen in beginsel sterk worden verminderd (zie hoofdstuk 3) en kan de bestendigheid tegen de gevolgen van klimaatverandering sterk worden vergroot (zie hoofdstuk 2).

Maatregelen die passen bij de manier waarop mensen wensen te leven

De kwetsbaarheid van mensen voor de effecten van klimaatverandering en de mogelijkheden om zich hieraan aan te passen of om deze tegen te gaan, worden sterk beïnvloed door de sociaaleconomische en culturele omstandigheden, zoals de middelen van bestaan, leefstijlen en gedrag. Zo kunnen aan de ene kant energie-intensieve leefstijlen tot een hoge uitstoot van broeikasgassen leiden. Aan de andere kant kunnen veranderingen in consumptiepatronen en technologische vernieuwing deze uitstoot tegengaan. Ook de acceptatie en de effectiviteit van het klimaatbeleid worden beïnvloed door de mate waarin ze passen bij de mogelijkheden om leefstijlen te veranderen of bepaald gedrag aan te moedigen, of daarvan afhankelijk zijn voor succes. De bestuurlijke inrichting van de samenleving is van groot belang voor het sturend vermogen.

Verbinden van bestuursniveaus

Een verbeterde coördinatie van het bestuur en samenwerking met private en maatschappelijke organisaties kunnen helpen om de regionale belemmeringen voor klimaatmitigatie, klimaatadaptatie en risicobeheersing bij rampen weg te nemen. Ondanks een enorme toename aan bestuurlijke activiteiten op internationaal, nationaal en lokaal niveau blijven de broeikasgasemissies stijgen en zijn de geïdentificeerde adaptatieopgaven in de meeste gevallen nog niet adequaat opgepakt. Het kan nodig zijn om die bestuursactiviteiten te versterken die de verschillende schaalniveaus met elkaar verbinden (zie paragraaf 4.5).

4.5 Beleidsbenaderingen voor adaptatie en mitigatie, technologie en financiering

Adaptatie en mitigatie zullen alleen effectief zijn als het internationale, nationale en lokale beleid bij elkaar passen. Beleidsinzet op deze schaalniveaus voor de ontwikkeling, verspreiding en overdracht van technologie, kan de effectiviteit van adaptatie- en mitigatiebeleid aanvullen en verbeteren.

Internationale samenwerking

Internationale samenwerking is van cruciaal belang voor een effectieve mitigatie, die ook lokale positieve neveneffecten kan bieden. Adaptatie heeft voornamelijk effect op lokale en nationale schaal, maar de effectiviteit kan worden verbeterd door coördinatie tussen de bestuursniveaus, waaronder internationale samenwerking. Enkele voorbeelden:

- Het VN-klimaatverdrag is het belangrijkste multilaterale forum gericht op het aanpakken van klimaatverandering, waaraan bijna alle landen meedoen. Omdat bij gerelateerde beleidsterreinen (grensoverschrijdende wateren, biodiversiteit, verwoestijning, enzovoort) nu ook aandacht is voor klimaatbeleid, is er sprake van een verbreding van de internationale samenwerking.
- Het Kyoto-protocol biedt lessen voor hoe de uiteindelijke doelstelling van het VN-klimaatverdrag kan worden bereikt, vooral met betrekking tot participatie, uitvoering en de mate van flexibiliteit in de uitvoering en milieu-effectiviteit.
- Het benutten van verbanden tussen internationaal, nationaal en lokaal klimaatbeleid biedt potentiële kansen om klimaatverandering tegen te gaan. Een voorbeeld is de rol van steden. Potentiële voordelen zijn de lagere kosten voor mitigatie, het voorkomen van verplaatsing van emissies en het gebruikmaken van marktwerking.
- Er is in het verleden minder aandacht geweest voor de internationale ondersteuning van adaptatieplanning en -uitvoering dan voor die van mitigatie. Momenteel echter neemt de aandacht hiervoor duidelijk toe. Dit heeft ertoe geleid dat adaptatie-strategieën, -plannen en -acties op nationaal en lokaal niveau tot stand komen.

Nationaal en lokaal beleid

Sinds het vierde IPCC-rapport uit 2007 is het aantal nationale en lokale plannen en strategieën voor zowel adaptatie als mitigatie aanzienlijk gestegen. Een belangrijke ontwikkeling hierbij is dat er in het klimaatbeleid meer aandacht is gekomen voor synergie: het beleid is meer gericht op het realiseren van meer doelstellingen tegelijkertijd. Denk aan het combineren van doelen voor het verminderen van de luchtverontreiniging, het verhogen van de energievoorzieningszekerheid en het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen. Een dergelijk 'geïntegreerd' beleid kan effectiever en efficiënter zijn.

Beleidsopties mitigatie

Voor het terugdringen van de broeikasgasemissies kan de overheid verschillende initiatieven ontplooiën en verschillende instrumenten inzetten. Voorbeelden zijn

prijsmechanismen, regelgeving en voorlichting, subsidies en sectorspecifieke mitigatiemaatregelen.

Bij prijsmechanismen waarbij in meer of mindere mate moet worden betaald voor de uitstoot van broeikasgassen, gaat het onder andere om het instellen van emissieplafonds en een emissiehandel (*cap and trade*) en het heffen van koolstofbelastingen. In beginsel leidt dit bij een voldoende scherp emissieplafond en een voldoende scherpe beprijzing van de broeikasgassen tot een kosteneffectief mitigatiebeleid. In de praktijk is de ervaring met deze beleidsinstrumenten echter nog wisselend, wat deels te wijten is aan het ontwerp ervan. Zo blijken de emissiehandelssystemen op korte termijn slechts weinig effect te hebben doordat de emissieplafonds (*caps*) niet beperkend genoeg zijn. Een fiscaal beleid daarentegen, heeft in sommige landen een positief effect gehad op het terugdringen van de uitstoot van broeikasgassen. Daarnaast hebben in veel landen belastingen op fossiele brandstoffen, hoewel niet specifiek ontworpen voor de mitigatie van klimaatverandering, effecten gehad die vergelijkbaar zijn met die van milieubelastingen.

Regelgeving en voorlichting worden veel in combinatie gebruikt en zijn dan ook vaak effectief. Een voorbeeld van regulering is het instellen van energie-efficiëntienormen in de bouw en bedrijfsprocessen. Een voorbeeld van een voorlichtingsstrategie zijn etiketteringsprogramma's om consumenten te helpen beter geïnformeerde beslissingen te nemen.

Subsidies kunnen als beleidsinstrument in alle sectoren worden toegepast, en omvatten een scala aan maatregelen, zoals fiscale kortingen of vrijstellingen, leningen en kredietlijnen. Het gebruik van hernieuwbare-energie technologie is de afgelopen jaren snel toegenomen. Hierbij speelt ook het beleid, met inbegrip van subsidies, een belangrijke rol. Ook het verminderen van nog bestaande subsidies voor activiteiten die leiden tot de uitstoot van broeikasgassen (zoals het opwekken van energie uit fossiele brandstoffen), kan leiden tot emissiereducties.

Synergie met andere sectoren kan de inzet van mitigatiemaatregelen kosteneffectiever maken. Toch komen sectorspecifieke mitigatiemaatregelen vaker voor dan integraal (economiebreed) beleid. Sectorspecifiek beleid kan dikwijls gemakkelijker worden ingezet omdat ministeries vaak langs sectorale lijnen zijn georganiseerd. Sectorspecifieke barrières kunnen dan gemakkelijker worden geslecht, en de maatregelen kunnen gemakkelijker worden gecombineerd met andere sectorale doelen.

Beleidsopties adaptatie

Ook voor het inzetten van adaptatiemaatregelen kan de overheid verschillende initiatieven ontplooiën en verschillende instrumenten inzetten. Nationale overheden spelen een belangrijke rol bij het ontwikkelen van adaptatiestrategieën en het initiëren van adaptatiemaatregelen door andere overheden, het bedrijfsleven en maatschappelijke organisaties. Anders dan bij het terugdringen van de broeikasgasemissies zijn de specifieke geografische kenmerken van een gebied bepalend voor de adaptatieopgaven. Terwijl veel adaptatiemaatregelen lokaal en sectorspecifiek moeten worden genomen door de private sector en lokale overheden, kan de nationale overheid hierbij een belangrijke stimulerende en ondersteunende rol spelen door

kaders te stellen, door informatievoorziening en door de benodigde interactie tussen de verschillende schaalniveaus te organiseren.

De uitvoering van adaptatiemaatregelen kan op verschillende manieren worden vormgegeven. Hierbij speelt onder andere de rol van economische instrumenten (zoals verzekeringen, publiek-private samenwerking), wet- en regelgeving (bijvoorbeeld rond bestemmingsplannen) en beleid en programma's op nationaal (regerings)niveau (bijvoorbeeld rond economische diversificatie in landbouwgebieden).

Neveneffecten klimaatbeleid (mitigatie en adaptatie)

Klimaatbeleid kan belangrijke gevolgen hebben voor andere beleidsterreinen. Deze gevolgen kunnen zowel positief zijn als negatief. Denk bij mitigatiebeleid bijvoorbeeld aan de verbetering van de luchtkwaliteit (positief) en hogere energieprijzen (negatief). Het gaat bij neveneffecten onder andere om voedselzekerheid, biodiversiteit, lokale milieukwaliteit, de toegang tot energie, levensonderhoud en een rechtvaardige duurzame ontwikkeling. Het IPCC-rapport laat zien dat de zogenoemde nevenvoordelen in het algemeen veel groter zijn dan de negatieve effecten van klimaatmaatregelen. Speciale aandacht vraagt het feit dat beleidsmaatregelen gericht op mitigatie gevolgen kunnen hebben voor achtergestelde groepen, bijvoorbeeld doordat de energieprijzen stijgen. Deze mogelijke – en uit sociaal oogpunt ongewenste – effecten op de toegang tot energie kunnen worden vermeden door aanvullende beleidsmaatregelen, zoals kortingen op de inkomstenbelasting of andere herverdelingsmechanismen. Dit is overigens niet uniek voor het klimaatbeleid. Veel nevenvoordelen en nadelige neveneffecten zijn op dit moment moeilijk te kwantificeren.

Rol van technologiebeleid

Technologiebeleid (ontwikkeling, verspreiding en overdracht) biedt voor alle schaalniveaus, van internationaal tot lokaal, een aanvulling op het mitigatiebeleid. Het gaat bij technologiebeleid om zowel *technology push* (bijvoorbeeld publiek gefinancierde R&D) als *demand pull* (bijvoorbeeld aanbestedingen door overheden). De mondiale investeringen in het onderzoek naar mitigatietechnologie zijn echter nog gering ten opzichte van de totale publieke onderzoeksinvesteringen. Het belang van technologiebeleid geldt niet alleen voor mitigatie, maar ook voor adaptatie. Adaptatie-inspanningen zijn voor hun succes afhankelijk van de verspreiding en overdracht van technologie en managementpraktijken. Hierbij geldt dat adaptatietechnologie vaak al bekend is en elders wordt toegepast.

Rol van financiering en investeringen

Emissiereductie gaat logischerwijs samen met grote veranderingen in investeringspatronen. Om een 2°C-scenario (430-530 ppm CO₂-equivalenten in 2100, zie ook figuur 4.1) te realiseren, is het nodig dat de jaarlijkse investeringen in een koolstofarme elektriciteitsvoorziening en energie-efficiëntie vóór 2030 mondiaal stijgen met naar schatting enkele honderden miljarden dollars per jaar. In een passende, gunstige omgeving kan de private sector, samen met de publieke sector, een belangrijke rol

spelen bij de financiering van mitigatie- en adaptatiebeleid. Effectief bestuur, heldere regels voor de private sector, bescherming van eigendomsrechten en geloofwaardig beleid dragen bij aan zo'n 'passend, gunstige' omgeving in een land.

Financiële middelen voor adaptatiebeleid zijn tot op heden langzamer beschikbaar gekomen dan voor mitigatiebeleid, zowel in ontwikkelde landen als in ontwikkelingslanden. Een goede schatting van de mondiale adaptatiekosten is moeilijk te maken en nog niet voorhanden. Dit heeft te maken met de grote regionale verschillen in klimaateffecten en specifieke lokale opgaven. Aandacht is nodig voor het ontwikkelen van geschikte financierings- en investeringsmechanismen om klimaatadaptatie te kunnen integreren in de uitvoering van plannen en projecten. Ook de mogelijke synergieën tussen de internationale financiering voor rampenbestrijding in de wereld en de internationale financiering voor klimaatadaptatie verdienen brede aandacht bij de uitwerking van het mondiale klimaatbeleid (zie ook tekstkader 2.1).

4.6 Wisselwerking met duurzame ontwikkeling

Om de 2°C-grens niet te overschrijden, is duurzame ontwikkeling een noodzaak. Er is in beginsel een groot aantal mogelijkheden om mitigatie en adaptatie te verbinden met andere na te streven maatschappelijke doelen. Dit vraagt om een integrale benadering op alle schaalniveaus.

Bij het ontwikkelen van zowel adaptatie- als mitigatiestrategieën is het zaak het klimaatbeleid te plaatsen in de context van duurzame ontwikkeling. Het streven naar een circulaire of klimaatneutrale economie is nodig om de 2°C-grens niet te overschrijden. Het uitstellen van mondiale mitigatieacties kan de mogelijkheden voor een klimaatbestendige infrastructuur verminderen. Ook kan een weinig effectief mitigatiebeleid ertoe leiden dat bij de noodzakelijke aanpassingen aan klimaateffecten bepaalde grenzen worden bereikt, bijvoorbeeld in de voedselvoorziening (hoofdstuk 2). Tot slot neemt de kans op abrupte of onomkeerbare veranderingen toe als de mondiale temperatuur blijft stijgen (zie paragraaf 4.2).

Om het klimaatbeleid in de bredere context van duurzame ontwikkeling te kunnen plaatsen, is het nodig de adaptatie- en mitigatiemaatregelen in te bedden in een bredere en meer integrale strategie. Geïntegreerde oplossingen zijn bijvoorbeeld relevant bij de energie- en adaptatieplanning in de stedenbouw, bij rurale gebiedsontwikkeling en bij de interacties tussen water, voedsel, energie en ontbossing. In de komende decennia zal de wereldbevolking zich in toenemende mate concentreren in de steden. Dit biedt kansen voor een schone, energie-efficiënte ontwikkeling en een effectieve verbetering van de klimaatbestendigheid van de stedelijke omgeving.

4.7 Nederland: de Klimaatagenda 2013

In de Klimaatagenda plaatst het kabinet de ambities voor klimaatadaptatie en -mitigatie in de context van een duurzame ontwikkeling en een integrale aanpak. De langetermijnambities van de Klimaatagenda passen bij de Europese ambities voor het terugdringen van de uitstoot van broeikasgassen in 2050.

Het kabinet heeft in oktober 2013 de Klimaatagenda ‘Weerbaar, welvarend en groen’ uitgebracht. Deze agenda schetst een gecombineerde aanpak van klimaatmitigatie (het terugdringen van de uitstoot van broeikasgassen) en klimaatadaptatie (het robuust inrichten van de samenleving). Het kabinet plaatst de ambities in de context van een duurzame ontwikkeling en een integrale aanpak.

Bij klimaatmitigatie staat het in 2013 afgesloten Energieakkoord centraal, dat is ondertekend door alle belangrijke betrokkenen zoals overheden, energiemaatschappijen, de industrie en maatschappelijke organisaties. In dit akkoord zijn de langetermijnambities neergelegd voor het verminderen van de broeikasgasuitstoot en de uitvoeringsstrategie tot 2020 (zie ook paragraaf 3.6). De langetermijnambities van de Klimaatagenda passen bij de Europese ambities voor het terugdringen van de uitstoot van broeikasgassen in 2050.

Voor klimaatadaptatie kondigt het kabinet een Nationale Adaptatie Strategie aan, in aanvulling op het al bestaande Deltaprogramma. Deze adaptatiestrategie moet in 2016 gereed zijn (zie ook paragraaf 2.5). Hiermee voldoet Nederland aan de verwachting van de Europese Commissie dat lidstaten in 2017 een alomvattende adaptatiestrategie hebben vastgesteld om binnen de Europese Unie tot een coherente aanpak te kunnen komen. Bij de implementatie van de Europese Adaptatiestrategie wil Nederland een voortrekkersrol vervullen.

Literatuur

- Braakhekke, W.G., F. Berendse & M. de Jong (2014), *Klimaatverandering en natuur. Een verkenning van risico's, kansen en aangrijpingspunten voor klimaatadaptatiebeleid*, Nijmegen/Wageningen: Bureau Strooming en Wageningen UR.
- Deltaprogramma (2014), *Werk aan de delta. Kansrijke oplossingen voor opgaven en ambities*, Den Haag: Deltaprogramma.
- Deltares (2011), *Zoetwatervoorziening in Nederland. Landelijke analyse knelpunten in de 21^e eeuw*, Delft: Deltares.
- Dissanayake, D.M.P.K., R. Ranasinghe & J.A. Roelvink (2012), 'The morphological response of large tidal inlet/basin systems to relative sea level rise', *Climatic Change* 113: 253-276.
- Drogue, G. et al. (2010), *Analysis of climate change, high-flows and low-flows scenarios on the Meuse basin*. AMICE WP1 report – Action 3.
- ECN & PBL (2014), *Nationale Energieverkenning 2014*, Petten/Den Haag: ECN/PBL.
- Görgen, K. et al. (2010), *Assessment of climate change impacts on discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project*, CHR rapport 1-23.
- Grothmann, T., K. Grecksch, M. Wings & B. Siebenhüner (2013), 'Assessing institutional capacities to adapt to climate change: integrating psychological dimensions in the Adaptive Capacity', *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13(12): 3369-3384.
- IPCC (2012), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK/New York, USA: Cambridge University Press.
- IPCC (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Summary for Policymakers*, Genève: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2014a), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Summary for Policymakers*, Genève: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2014b), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Summary for Policymakers*, Genève: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2014c), *Climate Change 2014: Synthesis Report, Contributions of Working Groups I, II and III to the IPCC Fifth Assessment Report, Summary for Policymakers*, Genève: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kennis voor Klimaat, <http://www.kennisvoorklimaat.nl/>.
- KNMI (2014), *KNMI'14, klimaatscenario's voor Nederland. Leidraad voor klimaatprofessionals in klimaatadaptatie*, De Bilt: KNMI.

- Loon-Steensma, J.M. van & P. Vellinga (2014), 'Robust, multifunctional flood defenses in the Dutch rural riverine area', *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14: 1085-1098.
- Luijff, H.A.M. & S.H. van Oort (2014), *Informatie- en Communicatie Technologie (ICT)*, Den Haag: TNO.
- Maas, N. & R. Vogel (2014), *Klimaatverandering en transport en infrastructuur. Actualisatie van de risico's en kansen voor klimaatadaptatiebeleid*, Delft: TNO.
- Marotzke, J. & P.M. Forster (2015), 'Forcing, feedback and internal variability in global temperature trends', *Nature* 517: 565-570.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat RIZA (2005), *Eindrapport Droogtestudie Nederland*, Den Haag: Rijkswaterstaat/RIZA.
- Moel, H. de, J.C.J.H. Aerts & E. Koomen (2011), 'Development of flood exposure in the Netherlands during the 20th and 21st century', *Global Environmental Change* 21: 620-627.
- Munich Re (2014), *Loss events worldwide 1980-2013*, Munich Re rapportage febr. 2014.
- Noordhoff Atlasproducties/KNMI (2011), *De Bosatlas van het klimaat*, Groningen: Noordhoff.
- PBL (2012), *Effecten van klimaatverandering in Nederland: 2012*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- PBL (2014), *Balans van de Leefomgeving*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- PBL & ECN (2011), *Naar een schone economie in 2050: routes verkend. Hoe Nederland klimaatneutraal kan worden*, Den Haag/Petten: PBL/ECN.
- Rijnsdorp, A.D., E. Buisman, R. Beukers, C. Deerenberg, M. de Graaf, P. Kamermans, M. Poelman, L. Teal & M. Turenhout (2014), *Klimaatverandering: risico's en kansen voor de Nederlandse visserij- en aquacultuursector*, Wageningen: Imares.
- RIVM (2014), *Effecten klimaat op gezondheid. Actualisatie voor de Nationale Adaptatiestrategie (2016)*, Bilthoven: RIVM.
- Runhaar, H., H. Mees, A. Wardekker, J. van der Sluijs & P.P.J. Driessen (2012), 'Adaptation to climate change-related risks in Dutch urban areas: stimuli and barriers', *Regional Environmental Change* 12: 777-790.
- Schaap, B.F., H. Agricola, J. Bessembinder, P. Reidsma, A. Verhagen & P. Prins (2014), *Klimaatrisico's- en kansen voor de landbouw*. Wageningen: Wageningen UR.
- Van der Veer, L., H. Visser, A.C. Petersen & P. Janssen (2014), 'Innovating the IPCC review process - the potential of young talent', *Climatic Change* 125: 137-148.

In 2013 en 2014 heeft het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) vier rapporten gepubliceerd over klimaatverandering. De vier rapporten zijn opgesteld door 235 auteurs en beslaan in totaal een kleine 5.000 pagina's. Op verzoek van het ministerie van Infrastructuur en Milieu hebben het KNMI en het PBL de IPCC-rapporten samengevat in vier hoofdstukken en vertaald naar de Nederlandse situatie.

De rapporten van het IPCC laten zien dat klimaatverandering en de effecten daarvan nu al wereldwijd en overal merkbaar zijn, en dat het uiterst waarschijnlijk is dat de mens de belangrijkste oorzaak is van de waargenomen opwarming sinds het midden van de vorige eeuw. Om de mondiale klimaatverandering en de negatieve effecten ervan te beperken, is een forse vermindering nodig van de uitstoot van broeikasgassen. Om de doelstelling van maximaal 2 graden opwarming te halen, is in 2050 een mondiale reductie nodig van minstens 40 procent van de uitstoot aan broeikasgassen ten opzichte van 2010. Hoe langer het duurt voordat de uitstoot wordt teruggedrongen, hoe duurder en moeilijker het wordt om klimaatverandering te beperken en hoe groter de adaptatieopgaven zijn. Sommige effecten van klimaatverandering, zoals verzuring van de oceanen en de verschuiving van verspreidingsgebieden van dieren en planten, kunnen met adaptatiemaatregelen niet worden opgevangen.

Op basis van de IPCC-rapporten heeft het KNMI klimaatscenario's ontwikkeld voor Nederland. Nederland krijgt de komende eeuw te maken met gemiddeld hogere temperaturen, veranderende neerslagpatronen en een stijgende zeespiegel. Het aantal hittegolven in de zomer zal toenemen en er zullen vaker neerslagextremen voorkomen. Om de gevolgen van klimaatverandering voor Nederland te beperken, heeft het kabinet voor 2016 een Nationale Adaptatiestrategie aangekondigd. In het Deltaprogramma zijn al de eerste stappen gezet om de watergerelateerde klimaatrisico's te beperken.