

# OZON, LUCHTKWALITEIT EN KLIMAATVERANDERING

Klimaatverandering is een mondiaal probleem. De veranderingen in het klimaat door toename van broeikasgassen zullen echter per regio verschillen. Regionale klimaatveranderingen kunnen echter ook gedreven worden door regionale veranderingen in luchtkwaliteit. Andersom leiden mondiale en regionale veranderingen in het klimaat ook tot veranderingen in luchtkwaliteit bij gelijkblijvende bronnen van vervuiling. In dit artikel zal ik een aantal aspecten van de interactie tussen luchtkwaliteit en klimaatverandering bespreken, waarbij ik vooral zal ingaan op de rol van ozon.

TWAN VAN NOIJE\*

**| Mondiale en regionale forcering**  
Veranderingen in de concentraties van broeikasgassen en aerosolen leiden tot veranderingen in de stralingshuishouding van de atmosfeer. De belangrijkste door de mens veroorzaakte forcering van klimaatverandering is de toename in kooldioxide (CO<sub>2</sub>), een gevolg van de huidige snelle verbranding van fossiele brandstoffen en grootschalige veranderingen in landgebruik zoals ontbossing. Opwarming aan het aardoppervlak is een gevolg van het beter vasthouden door een CO<sub>2</sub>-rijke atmosfeer van de uitgaande warmtestraling van de aarde. Andere belangrijke broeikasgassen zijn methaan (CH<sub>4</sub>), ozon (O<sub>3</sub>), lachgas (N<sub>2</sub>O) en halokoolstoffen (hk's), waarvan de chloorfluorkoolstoffen (cfk's) het sterkst bijdragen. Deze broeikasgassen dragen samen bijna net zoveel bij aan de stralingsforcering als

CO<sub>2</sub> (zie figuur 1).

Door een lange verblijftijd, van jaren tot eeuwen, zijn de meeste broeikasgassen goed gemengd in de atmosfeer en is de toename in de atmosfeer wereldwijd vrijwel hetzelfde. De mondiale forcering kan echter leiden tot grote verschillen in klimaatverandering tussen verschillende regio's. Dit is afhankelijk van de klimaatgevoeligheid van de regio.

Naast broeikasgassen bevat de atmosfeer ook fijne stofdeeltjes, aerosolen genaamd, die het klimaat op verschillende manieren beïnvloeden. Deze hebben zowel een directe als een indirecte bijdrage aan de stralingsforcering. De directe forcering is negatief en heeft een koelend effect voor sulfaten en andere deeltjes die het zonlicht verstrooien, en is positief voor roetdeeltjes, die het zonlicht absorberen. Aerosolen

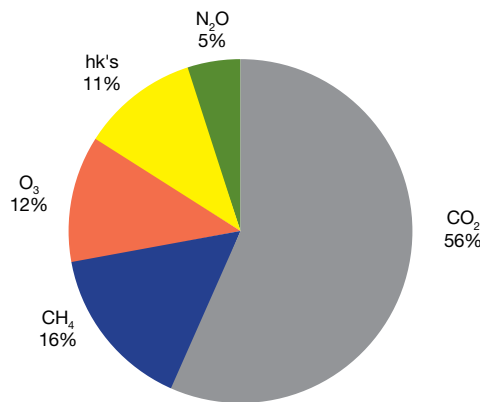
beïnvloeden ook de vorming, samenstelling en levensduur van wolken. Deze indirecte aerosoleffecten zijn erg belangrijk, want de mate van bewolking is bepalend voor het klimaat.

Omdat ozon en aerosolen een veel kortere verblijftijd in de atmosfeer hebben dan de langlevende broeikasgassen leiden deze tot een regionaalafhankelijke forcering. Op deze manier dragen veranderingen in luchtkwaliteit bij aan regionale klimaatverandering, soms ver weg van de bron.

## **| Klimateffecten van ozon**

Het is ten eerste van belang onderscheid te maken tussen stratosferisch en troposferisch ozon. Ozon tussen ongeveer 9 tot 16 en 50 kilometer boven het oppervlak (de stratosferische ozonlaag) is van cruciaal belang voor het leven op aarde, omdat het schadelijke uv-straling van de zon tegenhoudt. In de stratosfeer wordt ozon direct gevormd uit zuurstof onder invloed van zonlicht. De menselijke uitstoot van cfk's heeft een negatieve invloed op de ozonlaag en is de oorzaak van het jaarlijks ontstaan van het ozongat boven de Zuidpool. Omdat ozon een broeikasgas is, heeft dit een licht koelende werking op de atmosfeer. De stralingsforcering van stratosferisch ozon wordt door het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geschat op  $-0,05 \pm 0,10$  W/m<sup>2</sup> (IPCC, 2007). Na het ondertekenen van het internationale Protocol van Montreal in 1987 is de uitstoot van cfk's sterk afgenomen, en de verwachting is dat de stratosferische ozonlaag zich halverwege deze eeuw zal herstellen.

Veranderingen in de ozonconcentraties in de troposfeer (tot een hoogte van



Figuur 1: De relatieve bijdrage aan de wereldgemiddelde directe stralingsforcering in 2005 ten opzichte van omstreeks 1750 van de belangrijkste antropogene broeikasgassen. De percentages zijn gebaseerd op de beste schattingen van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). De kleine negatieve bijdrage van stratosferisch ozon is hier niet meegenomen.

ongeveer 9 km bij de polen tot 16 km in de tropen) spelen een belangrijke rol in opwarming van de aarde. Ozon wordt niet direct uitgestoten, maar wordt gevormd in de troposfeer door oxidatie van koolmonoxide (CO), methaan en andere vluchtige koolwaterstoffen in de aanwezigheid van stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) en zonlicht. De toename van de emissies van deze ozonpercursorgassen in de twintigste eeuw heeft de hoeveelheid ozon in de troposfeer sterk verhoogd. Vooral in de hogere troposfeer, waar de temperaturen laag zijn, is ozon een sterk broeikasgas.

Volgens figuur 1 is troposferisch ozon het belangrijkste antropogene broeikasgas na kooldioxide en methaan. Het percentage van 12 voor de relatieve bijdrage van troposferisch ozon aan de totale stralingsforcering door broeikasgassen is hier gebaseerd op de beste schatting van 0,35 W/m<sup>2</sup> zoals gerapporteerd door het IPCC. Omdat we niet goed weten hoe hoog de pre-industriële ozonniveaus zijn geweest, is de onzekerheid in deze schatting echter groot. Het IPCC geeft een 90%-betrouwbaarheidsinterval met een ondergrens van 0,25 W/m<sup>2</sup> en een bovengrens 0,65 W/m<sup>2</sup>. Ozon zou daarmee zelfs de plaats van methaan kunnen innemen als belangrijkste antropogene broeikasgas na kooldioxide. De stralingsforcering

door methaan wordt namelijk geschat op  $0,48 \pm 0,05$  W/m<sup>2</sup>. Hoe dan ook, troposferisch ozon levert een significante bijdrage aan de wereldwijde opwarming van de aarde.

Modelberekeningen laten zien dat het noordelijk halfrond ongeveer twee keer zo snel is opgewarmd door de toename van ozon in de troposfeer dan het zuidelijk halfrond (Mickley et al., 2004). In de periode 1890 tot 1990 heeft de toename van troposferisch ozon vooral sterk bijgedragen aan de opwarming van het Noordpoolgebied in de winter en de lente (ongeveer 0,4-0,5 °C) en van bepaalde vervuilde gebieden van het Noordelijk Halfrond in de zomer (lokaal meer dan 0,5 °C) (Shindell et al., 2004). In West-Europa is deze bijdrage in de zomer vrijwel overal minder dan 0,3 °C geweest en daarmee niet statistisch significant. In het noorden van Scandinavië en in delen van Oost-Europa is er wel sprake geweest van een significante opwarming ten gevolge van de toename van troposferisch ozon.

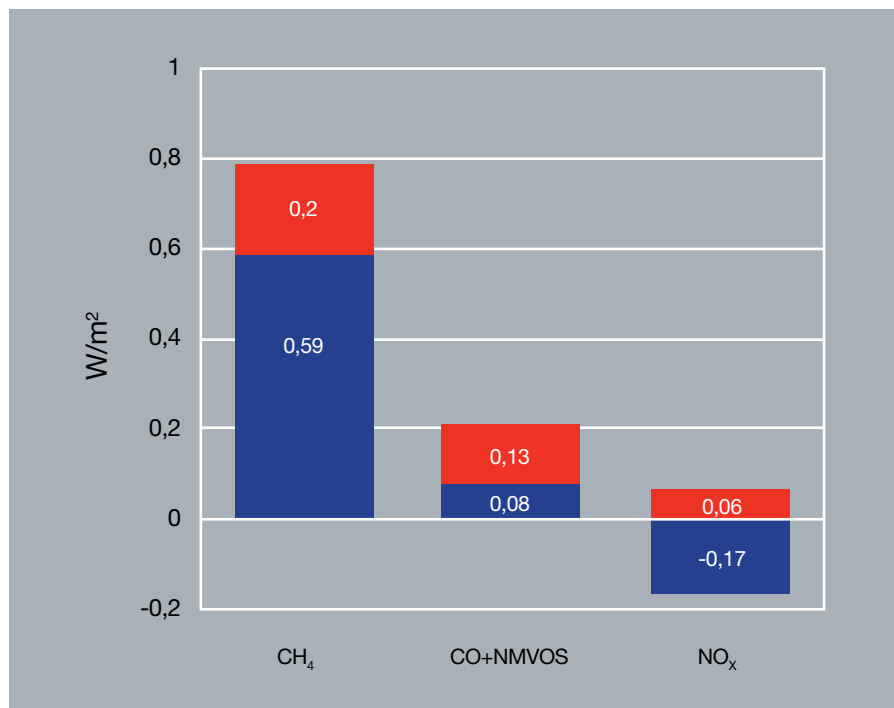
Naast de directe bijdrage van troposferisch ozon aan de opwarming van de aarde, beïnvloedt de ozonluchtkwaliteit het klimaat ook op indirecte wijze. Hoge ozonconcentraties nabij het aardoppervlak zijn slecht voor de gezondheid en leiden tot schade aan vegetatie en ver-

minderde landbouwopbrengsten. Hierdoor verstoort ozon de opname van CO<sub>2</sub> in de biosfeer. De stralingsforcering die samenhangt met de extra hoeveelheid CO<sub>2</sub> die zich hierdoor in de atmosfeer bevindt, wordt geschat op ongeveer 0,2 tot 0,4 W/m<sup>2</sup>. Dit is van vergelijkbare sterkte als de directe forcering door troposferisch ozon (Sitch et al., 2007).

#### Attributie aan emissies

Voor de ontwikkeling van klimaatbeleid is het belangrijk te weten in welke mate emissies van methaan en andere ozonpercursorgassen bijdragen aan de stralingsforcering door ozon en methaan. Op basis van modelberekeningen (Shindell et al., 2005) wordt de bijdrage van methaanbronnen door menselijke activiteit geschat op 0,79 W/m<sup>2</sup>. Dit is 26% van de geschatte totale stralingsforcering door broeikasgassen. Emissies van koolmonoxide (CO) en niet-methaan-vluchtige organische stoffen (NMVOS) leveren een forcering van 0,21 W/m<sup>2</sup> en emissies van stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) een negatieve forcering van -0,11 W/m<sup>2</sup> (zie figuur 2).

Een goed begrip van deze getallen vereist enige kennis van de chemie van ozon en methaan in de troposfeer. Het hydroxyl radicaal (OH) speelt hierin een centrale rol. De oxidatie van CO, methaan en NMVOS vindt namelijk plaats door reactie met OH in de troposfeer. In de aanwezigheid van stikstofoxiden wordt OH teruggevormd en ozon geproduceerd. De verblijftijd van methaan in de atmosfeer wordt primair bepaald door de hoeveelheid en de verdeling van OH in de troposfeer. Emissies van CO en NMVOS leiden daarom tot een toename van de hoeveelheid methaan in de atmosfeer, terwijl emissies van NO<sub>x</sub> de methaanconcentratie juist verlagen. Om dezelfde reden leidt een toename in de uitstoot van methaan tot een meer dan evenredige toename van de methaanconcentratie. Een af- of toename van de methaanconcentratie gaat gepaard met een wereldwijde af- of toename van de ozonconcentraties.



Figuur 2: De bijdragen van de antropogene emissies van methaan (CH<sub>4</sub>), van koolmonoxide (CO) plus niet-methaan-vluchtige organische stoffen (NMVOS) en van stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) aan de directe stralingsforcering door ozon (rood) en methaan (blauw), gebaseerd op de modelberekeningen van Shindell et al. (2005). De forcering door ozon komt in deze berekeningen uit op 0,39 W/m<sup>2</sup>. Niet weergegeven zijn de additionele bijdragen van emissies van CH<sub>4</sub> en CO+NMVOS aan de forcering door CO<sub>2</sub>.

Voor de emissies van alle precursorgassen met uitzondering van methaan is de bijdrage aan de forcering door ozon daarom de optelsom van een regionale component, die positief is zowel voor CO en NMVOS als voor NO<sub>x</sub>, en een mondiale component, die positief is voor CO en NMVOS en negatief is voor NO<sub>x</sub>. Voor alle precursorgassen geldt echter dat hun nettobijdrage aan de forcering door ozon positief is (zie figuur 2). Voor de antropogene emissies van NO<sub>x</sub> geldt tevens dat hun negatieve bijdrage aan de forcering door methaan de positieve bijdrage aan de forcering door ozon domineert. Emissies door vliegverkeer vormen een uitzondering op deze regel. Stikstofoxiden die op grote hoogte worden uitgestoten heb-

ben over het algemeen een opwarmend effect (Wild et al., 2001).

De uitstoot van methaan draagt sterker bij aan de opwarming van de aarde dan wordt gesuggereerd door de directe stralingsforcering van het methaan dat zich in de atmosfeer bevindt. De bijdrage van methaanemissies aan de methaanconcentratie wordt namelijk deels gecompenseerd door het effect dat de antropogene emissies van de andere precursorgassen hebben op de methaanconcentratie. Bovendien wordt de forcering door ozon voor ongeveer de helft veroorzaakt door antropogene emissies van methaan. Het reduceren van methaanemissies zou daarom een effectieve manier kunnen zijn om de

opwarming van de aarde tegen te gaan (Hansen et al., 2000). Door wereldwijde verlaging van de ozonconcentraties zou dit ook gunstige effecten hebben voor onze luchtkwaliteit. Volgens recente modelberekeningen levert een reductie van de methaanconcentratie met 10% een afname van de ozonconcentratie op grondniveau in Europa van ongeveer 2 µg/m<sup>3</sup> in de zomer (Carmichael et al., 2007).

De antropogene emissies van precursorgassen beïnvloeden het klimaat ook op andere, indirecte manieren. Stikstofdepositie, bijvoorbeeld, kan leiden tot vermisting of verzuring van de bodem en beïnvloedt daarmee de groei van vegetatie en dus de CO<sub>2</sub>-balans in de atmosfeer. Ook wordt de vorming van sulfaat- en nitraataerosolen mede gereguleerd door de uitstoot van ozonprecursorgassen (Unger et al., 2006).

#### Gevolgen van klimaatverandering voor ozon

Veranderingen in het klimaat hebben mogelijk grote gevolgen voor de ozonluchtkwaliteit. Bij de vorming van ozonsmog spelen vooral hoge temperaturen en sterke zonne-instraling een belangrijke rol. Als het warmer wordt, zullen piekniveaus van vervuiling tijdens smogepisodes hoger worden bij gelijkblijvende emissies. De snelheid van smogvorming wordt mogelijk ook beïnvloed door veranderingen in bewolgingsgraad.

Verder is de aan- en afvoer van ozon en precursorgassen onderhevig aan veranderingen in troposferische circulatiepatronen. In Nederland komt ozonsmog vooral voor in de zomer op warme, zonnige dagen bij zwakke wind uit oostelijke of zuidelijke richting. Onder deze weersomstandigheden is de atmosferische grenslaag slecht geventileerd,

## HET REDUCEREN VAN METHAANEMISSIONS ZOU EEN EFFECTIEVE MANIER KUNNEN ZIJN OM DE OPWARMING VAN DE AARDE TEGEN TE GAAN

waardoor vervuiling blijft hangen en ozon zich kan opbouwen. Bovendien wordt er dan vervuiling aangevoerd uit Duitsland of België. Indien dergelijke meteorologische condities, waarbij een hogedrukgebied de westelijke stroming blokkeert, in ons toekomstige klimaat vaker gaan voorkomen, zal dit de frequentie van smogepisodes kunnen doen toenemen.

De meeste klimaatmodellen voorspellen bovendien dat de opwarming van de aarde de grootschalige circulatie in de stratosfeer zal versterken. Deze Brewer-Dobson-circulatie transporteert ozon van de tropen, waar veel ozon wordt gevormd, naar hogere geografische breedtes en lagere delen van de stratosfeer, waar uitwisseling met de troposfeer plaatsvindt. In een opwarmend klimaat zal de instroom van ozon vanuit de stratosfeer daardoor hoogstwaarschijnlijk toenemen. Daar staat tegenover dat de afbraak van ozon in de troposfeer onder invloed van zonlicht, die vooral boven de tropische oceanen plaatsvindt, in de toekomst sneller zal verlopen door een hogere luchtvochtigheid.

Ook de frequentie en omvang van bosbranden, de natuurlijke emissies van methaan en andere precursorgassen, en de productie van stikstofoxiden in de hogere troposfeer door bliksem kunnen veranderen onder invloed van veranderingen in het mondiale klimaat, maar de uitwerkingen van deze koppe-

lingen zijn nog onvoldoende bekend.

Op het KNMI wordt momenteel gewerkt aan de ontwikkeling van EC-Earth, een klimaatmodel waarin reactieve broeikasgassen als ozon en methaan en ook verschillende typen aerosolen interactief kunnen worden gesimuleerd. Dit stuk gereedschap zal ons in staat stellen verschillende aspecten van de relatie tussen luchtkwaliteit en mondiale en regionale klimaatverandering, waarvan ik er een aantal in dit artikel heb besproken, beter in kaart te brengen.

### Literatuur

- Carmichael, G., Dentener, F. et al. (2007). Global and regional modelling, in: *Hemispheric Transport of Air Pollution 2007, Air Pollution Studies No. 16, Interim report prepared by the Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution acting within the framework of the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*, United Nations Economic Commission for Europe, Genève, Zwitserland.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lacis, A., Oinas, V. (2000). Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 97, 9875-80.
- IPCC (2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B.,

Tignor, M., Miller, H.L. (red.)], Cambridge University Press, Cambridge, Groot-Brittannië en New York, NY, Verenigde Staten.

- Mickley, L.J., Jacob, D.J., Field, B.D., Rind, D. (2004). Climate response to the increase in tropospheric ozone since pre-industrial times: A comparison between ozone and equivalent CO<sub>2</sub> forcings, *J. Geophys. Res.*, 109, D05106, doi:10.1029/2003JD003653.
  - Shindell, D.T., Faluvegi, G., Bell, N., Schmidt, G.A. (2005). An emissions-based view of climate forcing by methane and tropospheric ozone, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L04803, doi:10.1029/2004GL021900.
  - Shindell, D., Faluvegi, G., Lacis, A., Hansen, J., Ruedy, R., Aguilar, E. (2006). Role of tropospheric ozone increases in 20th-century climate change, *J. Geophys. Res.*, 111, D08302, doi:10.1029/2005JD006348.
  - Sitch, S., Cox, P.M., Collins, W.J., Huntingford, C. (2007). Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink, *Nature*, 448, 791-95.
  - Unger, N., Shindell, D.T., Koch, D.M., Streets, D.G. (2006). Cross influences of ozone and sulfate precursor emissions changes on air quality and climate, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 103, 4377-80.
  - Wild, O., Prather, M.J., Akimoto, H. (2001). Indirect long-term global radiative cooling from NO<sub>x</sub> emissions, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1719-22.
- \* Twan van Noije is werkzaam bij het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt.