



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Dossier

Dossier Ozon 2011

Ozon

*Een overzicht van de huidige stand van kennis over ozon
op leefniveau in Nederland*

2011

Dossier Ozon 2011

Een overzicht van de huidige stand van kennis
over ozon op leefniveau in Nederland

W.A.J. van Pul, P. H. Fischer, F.A.A.M. de Leeuw, R.J.M. Maas, D. Mooibroek, T.P.C. van Noije¹, M.G.M. Roemer²,
A. Sterkenburg

¹ KNMI

² TNO



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

TNO innovation
for life

Auteurs:

W.A.J. van Pul
P.H. Fischer
F.A.A.M. de Leeuw
R.J.M. Maas
D. Mooibroek
T.P.C. van Noije (KNMI)
M.G.M. Roemer (TNO)
A. Sterkenburg

Redactie: R.J.C. de Vos (Ecofys)

Contact:

W.A.J. van Pul
MEV/CMM
addo.van.pul@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu.

RIVM rapportnummer 680151001

© RIVM 2011

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave'.

Rapport in het kort

Ozon is een natuurlijke component in de atmosfeer, essentieel voor het leven op aarde. Maar ozonconcentraties veranderen onder invloed van menselijke activiteiten. Dat heeft diverse effecten op de mens en vegetatie, en ook op het klimaat. Dit Dossier Ozon 2011 beschrijft de wetenschappelijke kennis over niveaus van ozon op leefniveau en de effecten daarvan in Nederland.

Het is niet aannemelijk dat de hoge ozonconcentraties (piekconcentraties) of het gemiddelde ozonniveau in Nederland de komende jaren veel zullen dalen. Ten aanzien van de pieken is er twijfel over de effectiviteit van de emissiereductie van ozonvormende stoffen.

De directe broninvloed van Nederland zelf op de eigen ozonniveaus is beperkt. De belangrijkste component in de gemiddelde niveaus – de mondiale achtergrond – zal zonder aanvullend beleid alleen maar stijgen. Alleen Europese en mondiale afspraken helpen. Het belang van deze internationale focus wordt nog eens versterkt door de indirecte en directe effecten van ozon op het klimaat.

Ten aanzien van de effecten verschuift de aandacht van ozonpieken naar chronische belasting, maar over de effecten bestaat veel onzekerheid. Als blijkt dat ozon ook bij lagere niveaus significante effecten heeft, zou dat reden kunnen zijn om ook in te zetten op een daling van de mondiale achtergrondconcentratie.

Abstract

Ozone is a natural component of the atmosphere and essential for life on earth. However, ozone concentrations change caused by human activities. Ozone does have effects on humans and vegetation and also on climate. This *Dossier Ozon 2011* describes the scientific knowledge on surface ozone and its effects in the Netherlands.

The high ozone levels (peak concentrations) are not likely to decrease in the Netherlands in the coming years. About the ozone peaks there is doubt about the effectiveness of the emission reductions of the ozone precursors.

The influence of the Dutch emissions on its own ozone concentration level is limited. The global background, which forms a large part of the average concentration, will rise without additional measures. This can only be tackled in European and global frameworks. Moreover, the importance of international agreements on emission reductions is stressed by the direct and indirect influences that ozone has on climate.

The attention on the effects of ozone tends to shift from the effects of ozone peaks towards the long-term exposure of ozone. However, much uncertainty exists in this field. If it is clear that significant effects of ozone occur at lower levels than this may be reason to reduce also the global background concentration.

Inhoud

Samenvatting	7
1 Inleiding	9
Referenties	11
2 Ozonniveaus in de atmosfeer	13
2.1 Inleiding	13
2.2 De fotochemie van ozon	13
2.3 Waar komt ons ozon vandaan?	17
2.4 Conclusies	22
Referenties	23
3 Ozon en ozonvormende stoffen in Nederland	25
3.1 Ozonniveaus in Nederland en ons omringende landen	25
3.2 Ozonniveaus in ons omringende landen	32
3.3 Trends in ozonprecursors	33
3.4 Model versus metingen	38
3.5 Conclusies	38
Referenties	39
4 Ozon en klimaat	41
4.1 Effect van klimaatverandering op ozon	41
4.2 Ozon als klimaatgas	43
4.3 Conclusies	45
Referenties	46
5 Effecten van ozon	47
5.1 Effecten op de mens	47
5.2 Effecten op vegetatie	53
Referenties hoofdstuk 5.1	61
Referenties hoofdstuk 5.2	62
6 Ozonniveaus en beleid	65
6.1 Eerder beleid	65
6.2 Bestaand beleid	65
6.3 Evaluatie bestaand beleid	66
6.4 Verwachte trends tot 2020-2030 in Europa	67
6.5 Onzekerheden in scenario-uitgangspunten	71
6.6 Resume verwachting ozontrend tot 2020-2030	72
6.7 Conclusies	73
Referenties	74
7 Resumé	75
Begrippenlijst	81
Bijlage A	83
Bijlage B	85

Samenvatting

Ozon is een natuurlijke component in de atmosfeer, essentieel voor het leven op aarde. Maar ozonconcentraties veranderen onder invloed van menselijke activiteiten. Dat heeft diverse effecten op mens, dier en plant, en ook op het klimaat. Dit Dossier Ozon 2011 beschrijft de wetenschappelijke kennis in Nederland over niveaus van ozon op leefniveau en de effecten daarvan.

Ozonvorming

Ozon op leefniveau komt niet direct voort uit menselijke activiteiten, maar wordt vooral gevormd uit andere luchtverontreinigende emissies, zoals stikstofoxiden (NO_x) en vluchtige organische stoffen (VOS). Zonlicht speelt daarbij een belangrijke rol. Een kleiner deel is ook afkomstig van de ozonlaag in de stratosfeer.

Bij veel zon en hoge temperaturen ontstaat veel ozon. Omdat ozon een lange verblijftijd in de atmosfeer heeft, is dit niet alleen een lokaal verschijnsel. Als er weinig wind staat of ozonrijke lucht uit het continentale deel van Europa komt aanwaaien, kunnen de ozonconcentraties hoog oplopen. Bij deze piekniveaus spreken we van 'ozonsmog', waarover het publiek wordt ingelicht. De gemiddelde ozonniveaus in Nederland (en Europa) worden voor een groot deel mede bepaald door de mondiale emissies van de ozonvormende stoffen.

In de afgelopen eeuw zijn de ozonniveaus verdubbeld. Vooral op het noordelijk halfrond hebben toegenomen

menselijke activiteiten, zoals energieproductie, industriële processen, verkeer en biomassaverbranding, geleid tot meer uitstoot van de stoffen waaruit ozon wordt gevormd.

Effecten

De effecten van hoge ozonniveaus op mens en vegetatie zijn goed bekend. Bij de mens ontstaan luchtwegklachten en een verergering van hart- en vaatziekten. Jaarlijks sterven in Nederland naar schatting 1300 mensen vroegtijdig door hoge ozonniveaus. Bij planten veroorzaken pieken in ozon waarneembare bladschade en afname van de opbrengst van landbouwgewassen. De jaarlijkse schade aan gewassen in Nederland bedraagt naar schatting 150 miljoen euro.

Ozon is na CO_2 en methaan het belangrijkste broeikasgas dat door de mens in de atmosfeer wordt gebracht. De toename van ozon in de troposfeer (de onderste 10-12 km van de atmosfeer) sinds het begin van de industrialisatie heeft bijvoorbeeld sterk bijgedragen aan de opwarming van het Noordpoolgebied in de winter en de lente, en van een aantal industrieregio's in de zomer. Voor een groot deel van West-Europa – inclusief Nederland – was de opwarming door ozon echter relatief klein.

Ozon beïnvloedt het klimaat ook indirect. Hoge ozonconcentraties kunnen leiden tot verminderde groei van planten, en daarmee tot een kleinere opname van CO_2 . Dit indirect effect is mogelijk even groot als het direct effect

op het klimaat door ozon.

Trends

De *piekconcentraties* van ozon zijn de afgelopen dertig jaar gedaald, voornamelijk als gevolg van gericht beleid in Europa (Europese Unie, EU en United Nations Economic Commission for Europe, UNECE) om de emissies van NO_x en VOS te verlagen. In de laatste tien jaar daalden de ozonpieken niet meer duidelijk, terwijl de emissies nog wel afnamen. De oorzaak daarvoor is nog niet duidelijk.

De *gemiddelde* ozonniveaus in Nederland en Europa zijn de afgelopen decennia juist gestegen en volgen de mondiale trend. Dit is het gevolg van de wereldwijde toename in de door de mens veroorzaakte emissies van NO_x, VOS, CO en met name methaan (CH₄), en door een toename van ozontransport vanuit de hogere luchtlagen (stratosfeer). Voor Nederland en omliggende landen is er nog een reden voor de toename. In verstedelijkte gebieden veroorzaakt een reductie van de NO_x-emissies namelijk juist een stijging van de ozonconcentratie. Dit komt doordat dan minder ozon dicht in de buurt van bronnen weggevangen wordt door de daling in de NO-concentratie.

Overschrijdingen

De EU heeft regelgeving opgesteld om de effecten van hoge ozonniveaus op mens en planten te beperken. De EU-norm ter bescherming van de mens is over de afgelopen jaren in Nederland op een aantal plaatsen overschreden. De normen van de World Health Organization (WHO), die aanzienlijk strenger zijn, worden in Nederland op zeer ruime schaal overschreden.

Het is wetenschappelijk nog niet bewezen dat er een waarde voor ozon bestaat waaronder de mens geen enkel effect meer ondervindt. Als die drempelwaarde niet bestaat of als de huidige niveaus ver boven deze drempelwaarde liggen, zal elke daling in ozonniveaus ten goede komen aan de volksgezondheid.

De EU-normen voor ozonblootstelling van planten worden nergens in Nederland overschreden. Maar dat betekent nog niet dat er geen schade aan planten kan optreden. De UNECE bereidt nu een nieuwe indicator voor die beter rekening houdt met plantschade door ozon.

De toekomst

De aanstaande intensivering van het EU- en UNECE-beleid tot 2020 zal naar verwachting leiden tot een verdere daling van de emissies van NO_x en VOS. Of daarmee ook de hoge ozonconcentraties (*piekconcentraties*) zullen dalen is nog niet duidelijk.

In de stedelijke gebieden zal ook met dit beleid de jaargemiddelde ozonconcentratie verder stijgen, maar in

landelijke gebieden weinig tot niet. Voor het jaargemiddelde zijn vooral de emissies van NO_x, VOS, methaan en CO in de rest van de wereld van belang. Op basis van vastgesteld beleid zullen die stijgen, en dus bijdragen aan een stijging van de jaargemiddelde ozonconcentraties.

Om ook de risico's van langdurige blootstelling aan lagere ozonconcentraties te verminderen is het van belang de jaargemiddelde concentraties omlaag te brengen. Als de emissies van NO_x, VOS, methaan en CO in Europa en elders in de wereld worden gereduceerd volgens wat technisch maximaal haalbaar is, zullen zowel de piek- als jaargemiddelde ozonconcentraties in Europa aanzienlijk dalen. De emissiereductie van methaan is daarbij een zeer effectieve maatregel om klimaatverandering tegen te gaan, omdat zowel methaan als ozon broeikasgassen zijn. Emissiereductie van methaan in Azië is momenteel zelfs de meest kosteneffectieve manier om de achtergrondconcentratie van methaan – en daarmee van het uit methaan gevormde ozon – in Europa te verlagen.

Ozon heeft niet alleen invloed op het klimaat, maar veranderingen in het klimaat hebben ook invloed op de toekomstige ozonconcentraties. Het is aannemelijk dat bij opwarming ozonniveaus zullen stijgen, omdat de ozonvormende reacties bij hogere temperaturen sneller verlopen. Ook zullen de natuurlijke emissies toenemen. Er zijn echter ook processen die ozonniveaus juist doen afnemen. De huidige klimaatmodellen geven nog geen uitsluitsel of de meteorologische condities waarbij ozonsmog kan optreden in de toekomst vaker of minder vaak zullen voorkomen.

Conclusie

Het is niet aannemelijk dat de piekconcentraties of het gemiddelde ozonniveau in Nederland de komende jaren veel zullen dalen. Ten aanzien van de pieken is er twijfel over de effectiviteit van verdere NO_x- en VOS-emissiereductie.

De directe broninvloed van Nederland zelf op de eigen ozonniveaus is beperkt. De belangrijkste component in de gemiddelde niveaus – de mondiale achtergrond – zal zonder aanvullend beleid alleen maar stijgen. Alleen Europese en mondiale afspraken helpen. Het belang van deze internationale focus wordt nog eens versterkt door de indirecte en directe effecten van ozon op het klimaat.

Ten aanzien van de effecten verschuift de aandacht van ozonpieken naar chronische belasting, maar over de effecten bestaat veel onzekerheid. Als blijkt dat ozon ook bij lagere niveaus significante effecten heeft, is dat alle reden om in te zetten op een daling van de jaargemiddelde ozonconcentratie.

1

Inleiding

Ozon is een natuurlijke component van de atmosfeer en is essentieel voor het leven op aarde. In de stratosfeer, de laag in de atmosfeer tussen 10-12 en 50 km hoogte, bevindt zich de *ozonlaag*. In de ozonlaag wordt ozon continu gevormd en afgebroken. Vorming gebeurt na fotolyse (afbraak door zonlicht) van zuurstof. Afbraak vindt eveneens plaats door fotolyse, waarbij ozon UV-B-straling absorbeert. Ozon in de stratosfeer vormt zo een filter dat de mens en ecosystemen beschermt tegen schadelijke UV-straling van de zon.

In de troposfeer, de onderste 10-12 km van de atmosfeer, speelt ozon een veelzijdige rol. Als broeikasgas draagt het bij aan klimaatverandering. Ozon speelt een cruciale rol in fotochemische processen in de atmosfeer waarbij luchtverontreiniging verwijderd wordt. Zonder ozon zouden we na verloop van tijd stikken in de luchtvervuiling. Blootstelling aan ozon kan echter leiden tot ongewenste effecten bij mensen, vegetatie en materialen.

In tegenstelling tot bijvoorbeeld zwaveldioxide of ammoniak, wordt ozon niet rechtstreeks uitgestoten, maar uitsluitend gevormd in de atmosfeer. De stoffen die betrokken zijn bij de ozonvorming in de troposfeer, de zogenaamde ozonprecursors, zijn stikstofoxiden en vluchtige organische verbindingen. De bronnen van deze stoffen kunnen van natuurlijke of antropogene oorsprong zijn. Belangrijke natuurlijke bronnen zijn de emissies van vluchtige organische verbindingen als isopreen en

terpenen door bossen en methaan, dat onder meer vrijkomt bij rijstverbouw en voedselvertering door runderen. Energieproductie, industriële processen, verkeer en biomassaverbranding zijn grote antropogene bronnen. Ozon wordt ook gevormd bij bliksemontladingen maar dit vormt slechts een zeer klein deel van de hoeveelheid ozon die in de atmosfeer aanwezig is.

De troposferische ozonniveaus op het noordelijk halfrond zijn in de afgelopen eeuw ongeveer verdubbeld. Dit komt omdat de emissies van stoffen waaruit ozon gevormd worden sterk toegenomen zijn. De hoge ozonniveaus komen op ruime schaal voor in Europa, Noord-Europa en Azië, maar ook in Latijns-Amerika en Afrika. Dit maakt, samen met het feit dat ozon een belangrijk broeikasgas is, dat de ozonproblematiek een mondiale schaal kent. Het zijn met name de hogere ozonniveaus tijdens zomerepisodes, ook wel zomersmog genoemd, die voor merkbare en zichtbare effecten hebben gezorgd. De gevolgen bij de mens zijn voornamelijk effecten op de luchtwegen en een verergering van hart- en vaatziekten. Geschat wordt dat in Europa jaarlijks 21.400 mensen voortijdig sterven door ozon (EEA, 2007).¹ Het effect op vegetatie kan bij hoge ozonniveaus visueel waargenomen worden: er komen dan bijvoorbeeld gele vlekken op de bladeren. Niet direct zichtbaar, maar wel economisch merkbaar, is dat de hoge ozonniveaus ook lijden tot gewasderving. Het effect van ozon op landbouwgewassen op mondiale schaal zou in 2000 een economische schade van 14 tot 26 miljard dollar

hebben veroorzaakt.^{2,3} Voor de EU is dat geschat op 6,7 miljard euro.⁴

De huidige norm uit de Europese *Air Quality*-richtlijn ter bescherming van de mens worden in Nederland in het oosten en zuiden van het land met enige regelmaat overschreden. De WHO-norm, die aanzienlijk strenger is dan de EU-norm, wordt in Nederland op grote schaal overschreden. De EU-normen ter bescherming van vegetatie tegen ozon schade worden in Nederland niet overschreden. Er zijn geen EU-normen voor natuurlijke ecosystemen. De langetermijnstreefwaarden, gesteld in de EU-richtlijn voor bescherming van mens en vegetatie, worden beide gemiddeld genomen in Nederland overschreden.

De combinatie van het feit dat er in Nederland nog overschrijdingen zijn met het feit dat er geen daling in de ozonniveaus optreedt, werpt de vraag op wat de risico's zijn bij de huidige ozonniveaus. Een belangrijk aandachtspunt is wat het effect is van de langdurige belasting van mens en vegetatie aan de niet-afnemende gemiddelde ozonniveaus. Een andere vraag is hoe de ozonniveaus zich ontwikkelen bij het huidige en toekomstige beleid en wat de invloed van klimaatverandering is.

Vanuit het ministerie van Infrastructuur en Milieu, Directoraat Generaal Milieu, is de vraag gesteld aan het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) om de ozonproblematiek voor Nederland in kaart te brengen. Nadrukkelijk zij gesteld dat het hierbij gaat om een overzicht van de bestaande informatie. Er is geen nieuw onderzoek uitgevoerd.

De vragen en onderwerpen die in deze studie aan de orde komen zijn:

- Een algemene beschrijving van de ozonchemie en de herkomst van ozon, (Hoofdstuk 2)
- Wat zijn de Nederlandse niveaus van ozon en de ozonprecursors en hoe verhoudt zich dat tot het buitenland? (Hoofdstuk 3)
- Wat is het effect van klimaatverandering op ozon en wat is de invloed van ozon op het klimaat? (Hoofdstuk 4)
- Wat zijn de effecten van ozon op mens en vegetatie en hoe worden de risico's in beeld gebracht? (Hoofdstuk 5)
- Wat was en is het beleid op ozon en wat zijn de verwachte ozonniveaus in 2020 en verder? (Hoofdstuk 6)

In de hoofdstukken wordt dieper op de materie ingegaan. In Hoofdstuk 7 is een resumé van de hoofdstukken gegeven inclusief conclusies.

Voor een meer mondiale context van de ozonproblematiek wordt de lezer verwezen naar de overzichtsstudie die de Royal Society in 2008 heeft gemaakt (Ground-level

ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications).⁵

Deze studie is uitgevoerd door het RIVM in samenwerking met KNMI en TNO. De hoofdstukken zijn door referenten buiten deze instituten gereviewd (Hoofdstuk 5 Prof. Bert Brunekreeff, Universiteit Utrecht; Tom Dueck (WUR)), en het geheel exclusief Hoofdstuk 5 door Frank Dentener (Joint Research Centre, JRC te Ispra). De redactie is uitgevoerd door Rolf de Vos, journalist bij Ecofys.

Dankwoord

De auteurs bedanken hartelijk de referenten voor hun review en Rolf de Vos voor de redactie. Verder worden de Vlaamse Milieumaatschappij en het Landes Umweltamt Nordrhein-Westphalia bedankt voor het beschikbaar stellen van de meetgegevens uit hun meetnetten. Monique Wolters (RIVM) wordt zeer bedankt voor al haar inspanningen om van alle bijdragen een mooi dossier te maken. Gert Boer en Martin Middelburg (RIVM) worden bedankt voor de opmaak en druk van het dossier.

Referenties

- 1 EEA. Air Pollution in Europe 1990-2004. EEA Report 2/2007. 2007.
- 2 Wang X, Mauzerall DL. Characterizing distributions of surface ozone and its impact on grain production in China, Japan and South Korea: 1990 and 2020. *Atm Env.* 2004;38:4383-4402.
- 3 Van Dingenen R, Dentener FJ, Raes F, Krol MC, Emberson L, Cofala J. The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation. *Atm Env.* 2009;43:604-618.
- 4 Holland M, Kinghorn S, Emberson L, Cinderby S, Ashmoe M, Mills G, Harmens H. Development of a framework for probabilistic assessment of the economic losses caused by ozone damage to crops in Europe. Defra Contract No EPG 1/3205:2006.
- 5 RS. The Royal Society Policy document 15/08 Issued: October 2008 RS1276 ISBN:978-0-85403-713-1.

2

Ozonniveaus in de atmosfeer

2.1 Inleiding

Ozon is een natuurlijke component van de atmosfeer en is essentieel voor het leven op aarde. In de stratosfeer – tussen 10-12 en 50 km hoogte in de atmosfeer – bevindt zich de *ozonlaag*. Daar wordt ozon continu gevormd door fotolyse (afbraak door zonlicht) van zuurstof. Zuurstof (O_2) valt in twee losse zuurstofatomen uiteen; ieder atoom combineert met een zuurstofmolecule tot ozon (O_3). Omdat ozon UV-B-straling van de zon absorbeert wordt ozon ook weer afgebroken. Zo vormt ozon een filter voor schadelijke UV-straling.

In de troposfeer – de onderste 10-12 km van de atmosfeer – speelt ozon een veelzijdige rol. Als broeikasgas draagt het bij aan klimaatverandering (zie Hoofdstuk 4). Ozon speelt ook een cruciale rol in fotochemische processen in de atmosfeer waarbij luchtverontreiniging verwijderd wordt. Zonder ozon zouden we na verloop van tijd stikken in de luchtvervuiling.

2.2 De fotochemie van ozon

Introductie

In tegenstelling tot bijvoorbeeld zwaveldioxide of ammonia, wordt ozon niet rechtstreeks uitgestoten, maar uitsluitend gevormd in de atmosfeer. Ozon wordt gevormd en deels ook weer afgebroken tijdens fotochemische

processen, waarbij ook andere luchtverontreinigende stoffen betrokken zijn. Bij dit soort reacties vindt ook de afbraak van de luchtverontreinigende stoffen plaats.

De belangrijkste stoffen bij ozonvorming zijn stikstofoxiden (stikstofmonoxide NO en stikstofdioxide NO_2 , gezamenlijk weergegeven als NO_x), methaan (CH_4), koolstofmonoxide (CO) en vluchtige organische stoffen (VOS, of kortweg koolwaterstoffen). Methaan en CO zijn weliswaar veel minder reactief dan koolwaterstoffen, maar omdat ze in zulke grote concentraties voorkomen zijn ze zeer belangrijk. De koolwaterstoffen met uitzondering van methaan worden ook wel aangeduid met niet-methaan VOS of NMVOS. De rol van stikstofoxiden is bij ozonvorming van groot belang. Stikstofoxiden worden niet afgebroken noch gevormd bij ozonvorming, maar werken als katalysator.

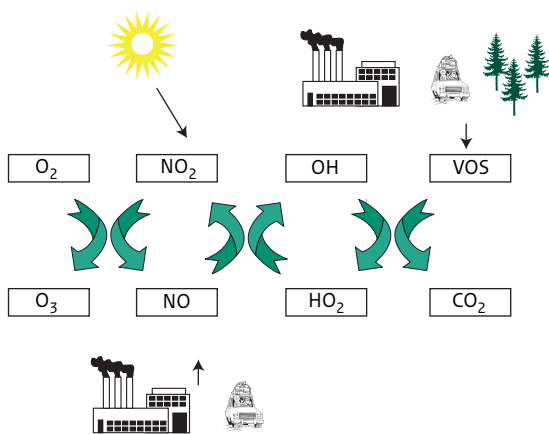
Ozon en luchtvervuiling

Het verkeer en de industrie zijn belangrijke bronnen van stikstofoxiden en vluchtige organische stoffen (VOS); ook de natuur zelf is verantwoordelijk voor een deel van de uitstoot van VOS. In dit hoofdstuk beschrijven we de chemische processen in de atmosfeer waarbij ozon gevormd en afgebroken wordt door het beschrijven van drie cycli die als tandwielen in elkaar grijpen (zie Figuur 2.1, van rechts naar links; zie ook Tekstbox 2.1 en 2.2).

1. Een koolwaterstof reageert met het zeer reactieve hydroxyl-radicaal (OH) en wordt via een groot aantal

- chemische reacties afgebroken tot stabiele eindproducten, of uiteindelijk tot CO₂ en H₂O. Het hydroxyl-radicaal wordt hierbij omgezet in het peroxy-radicaal (HO₂).
2. Peroxy-radicalen reageren met stikstofmonoxide (NO) waarbij stikstofdioxide (NO₂) ontstaat en het OH-radicaal wordt teruggevormd. Netto worden er in deze en cyclus 3 geen stikstofoxiden verbruikt of gevormd. Deze reactiecyclus fungeert als de 'motor' voor de tandwielen.
 3. NO₂ vormt onder invloed van zonlicht (fotolyse) ozon. Daarbij wordt NO teruggevormd, dat weer gaat meedoen aan cyclus 2. Daarmee blijven de tandwielen van de cycli draaien, onder de vorming van steeds meer ozon. In werkelijkheid gebeurt dit niet; er zijn allerlei reacties waardoor de ozonvorming geremd wordt. De tekstboxen geven verdere uitleg.

Figuur 2.1 Ozonvorming en de rol van koolwaterstoffen.



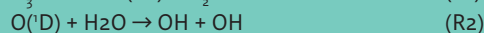
Bovenstaande drie cycli worden in deze paragraaf nader belicht.

Hydroxyl, het schoonmaakmiddel van de atmosfeer

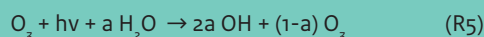
Radicalen zijn chemische verbindingen die zo reactief zijn dat ze maar kort leven. In chemische reacties fungeren ze als tussenproduct of 'intermediair'. In de atmosferische chemie spelen ze een grote rol. In de chemie van de atmosfeer is het belangrijkste radicaal het hydroxyl-radicaal (OH). De initiële stap in een keten van reacties, waarbij veel luchtvervuilende stoffen geoxideerd en daarmee uit de atmosfeer verwijderd worden, vindt veelal plaats door een reactie met OH. Mits voldoende stikstofoxiden aanwezig zijn kan aan het eind van de keten het OH-radicaal opnieuw gevormd worden, waardoor de oxidatiecyclus vele malen kan plaatsvinden (zie Tekstbox 2.1).

Tekstbox 2.1

De meeste OH-radicalen ontstaan in de troposfeer uit ozon. Onder invloed van UV-licht van de zon (met golflengten van 300-320 nanometer) valt ozon uiteen (reactie R1) in zuurstof (O₂) en één enkel elektronisch aangeslagen zuurstofatoom, O(¹D). Dit enkele zuurstofatoom reageert met waterdamp tot het hydroxyl-radicaal (R2). Als de aangeslagen toestand eerder verdween via een botsing met een willekeurig luchtmolecuul M (R3), kan het zuurstofatoom met een zuurstofmolecuul tot ozon reageren (R4), waarna de cyclus opnieuw kan beginnen.



Netto is de reactie:



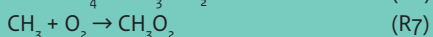
De hoeveelheid OH-radicalen die in deze reacties ontstaan – de factor *a* – hangt af van de onderlinge verhouding van de snelheden waarmee reactie R2 en R3 verlopen; temperatuur en de aanwezige hoeveelheid waterdamp zijn hierbij bepalend. Hoe droger de lucht is, des te minder kans heeft het aangeslagen zuurstofatoom O(¹D) om met water te reageren tot het hydroxyl radicaal. Dan zal de factor *a* klein zijn. Bij hogere temperaturen en luchtvochtigheid wordt relatief meer OH gevormd. Bij hogere temperaturen verlopen de meeste chemische reacties sneller, wat kan leiden tot een snellere vorming (en afbraak) van ozon. Enkele minder belangrijke bronnen van OH is de fotolyse van formaldehyde en salpeterigzuur (HONO) en de reactie van ozon met alkenen (onverzadigde koolwaterstoffen).

De afbraak van methaan

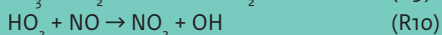
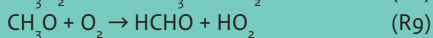
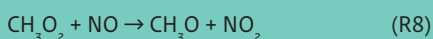
De afbraak van methaan illustreert goed de rol van koolwaterstoffen in de vorming van ozon en welke essentiële rol stikstofoxiden daarbij spelen (zie Tekstbox 2.2).

Tekstbox 2.2

In de eerste stap van het afbraakproces onttrekt het reactieve OH-radicaal een H-atoom aan het methaan waarbij het reactieve methylradicaal (CH_3) en water ontstaan (R6). Het methylradicaal reageert direct met zuurstof onder vorming van een methylperoxyradicaal (R7).

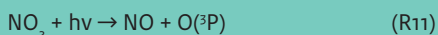


Als er voldoende stikstofoxide aanwezig is, zal het methylperoxyradicaal verder geoxideerd worden tot formaldehyde (HCHO) volgens:



Fotochemisch van groot belang is het feit dat in de laatste reactie het reactieve OH-radicaal weer wordt gevormd (R10), waardoor de reactiecyclus vanaf R6 met een volgende methaanmolecuul opnieuw kan beginnen.

Uit NO_2 dat in de reacties R8 en R10 wordt gevormd ontstaat ozon:



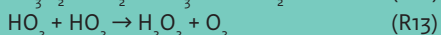
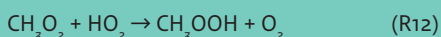
Netto krijgen we uit bovenstaande reacties:



Wat hierbij opvalt, is dat stikstofoxiden niet verbruikt worden in deze reacties. Zoals gezegd spelen ze een katalytische rol bij de omzetting van de peroxy-radicalen. Belangrijk is ook dat er bij deze reacties geen OH- en HO_2 -radicalen weggevangen worden, zodat de cyclus vele malen herhaald kan worden. Het aantal ozonmoleculen dat gevormd kan worden voordat een NO_x -molecuul geoxideerd wordt en zo uit de fotochemische cyclus verdwijnt, hangt sterk af van de NO_x -concentratie. Onder schone omstandigheden (zoals op het zuidelijk halfrond) worden 60-100 ozonmoleculen per NO_x -molecuul gevormd^{1,2}; onder typisch Europese omstandigheden worden 5-6 ozonmoleculen per NO_x gevormd.^{3,4} Onder stedelijke condities ligt de efficiëntie nog lager (2 ozonmoleculen per geoxideerd NO_x molecuul). Er is dus sprake van een terugkoppeling: bij een verlaging van de NO_x emissie (en concentratie) neemt het ozonvormend vermogen per NO_x -molecuul toe.

Mits voldoende stikstofoxide aanwezig is als katalysator, kan het formaldehyde (HCHO) verder oxideren tot CO_2 , via reactie met OH waarbij nog eens 2 ozonmoleculen worden gevormd. Een alternatieve afbraakroute begint met de fotolyse van formaldehyde, waarbij, afhankelijk van het reactiepad, 1 tot 3 ozonmoleculen en maximaal 2 OH-radicalen worden gevormd.

Als er geen stikstofoxide aanwezig is, dan verloopt het reactieproces vanaf R7 wat anders. De radicalen HO_2 en CH_3O_2 zullen dan reageren volgens:



In deze reacties ontstaan relatief stabiele producten, maar het fotochemische proces zal stoppen want de OH-radicalen worden niet teruggevormd. Het fotochemische proces zal dus stoppen, tenzij er opnieuw OH gevormd wordt door de fotolyse van ozon (R1-R2) of via de reactie R14:



In beide gevallen verdwijnt er een ozonmolecuul: bij zeer lage concentraties van stikstofoxiden is sprake van een fotochemische afbraak van ozon.

Tabel 2.1. De afbraak van methaan (CH₄)

NO _x - concentratie laag in orde ppt's	NO _x - concentratie in orde enkele tot tientallen ppb's	NO _x - concentratie hoog (tientallen ppb's)
OH + CH ₄ → CH ₃ + H ₂ O CH ₃ + O ₂ → CH ₃ O ₂ CH ₃ O ₂ + HO ₂ → CH ₃ OOH + O ₂ CH ₃ OOH + OH → HCHO + OH + H ₂ O	OH + CH ₄ → CH ₃ + H ₂ O CH ₃ + O ₂ → CH ₃ O ₂ CH ₃ O ₂ + NO → CH ₃ O + NO ₂ CH ₃ O + O ₂ → HCHO + HO ₂ HO ₂ + NO → NO ₂ + OH 2{ NO ₂ + hv → NO + O(³ P) } 2{ O(³ P) + O ₂ + M → O ₃ + M }	OH + CH ₄ → CH ₃ + H ₂ O CH ₃ + O ₂ → CH ₃ O ₂ CH ₃ O ₂ + NO → CH ₃ O + NO ₂ CH ₃ O + O ₂ → HCHO + HO ₂ HO ₂ + NO → NO ₂ + OH 2{ NO ₂ + OH → HNO ₃ }
Netto reactie:		
CH ₄ + OH + HO ₂ → HCHO + 2 H ₂ O	CH ₄ + 4 O ₂ → HCHO + 2 O ₃ + H ₂ O	CH ₄ + 2 O ₂ + 2 OH + 2 NO → HCHO + 2 HNO ₃ + H ₂ O
Geen ozonvorming	Ozonvorming, regeneratie van OH radicaal	Geen ozonvorming, verlies van stikstofoxiden

De rol van stikstofoxide als katalysator

Stikstofoxide (NO_x) is de katalysator voor het regenereren van OH. Bij zeer lage NO_x-concentraties stopt de fotochemische afbraak van luchtvervuiling, maar anderzijds stopt de fotochemische afbraak ook bij hoge NO_x-concentraties.

De gevormde hoeveelheden NO₂ remmen de motor van het hele afbraakproces af, omdat ze OH-radicalen wegvangen (onder de vorming van salpeterzuur):



De drie chemische regimes bij lage, gemiddelde en hoge NO_x concentraties zijn samengevat in Tabel 2.1. Er is dus sprake van een optimale NO_x-concentratie, waarbij de snelheid waarmee ozon gevormd wordt maximaal is. Hoe groot de optimale concentratie van NO_x is, hangt af van de lokale condities. Concentratie en reactiviteit van de aanwezige koolwaterstoffen zijn hierbij bepalend.

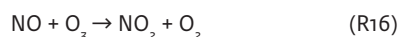
De oxidatie van niet-methaan koolwaterstoffen verloopt in principe niet veel anders dan die van methaan. Het hydroxyl-radicaal initieert steeds de afbraak, al zijn er vaak verschillende reactiepaden mogelijk. De fotolyse van onverzadigde koolwaterstoffen of de reactie van ozon met de dubbele binding in een onverzadigd koolwaterstof kunnen het afbraakproces initiëren.

Niet alle koolwaterstoffen zijn even reactief. Verbindingen met een *dubbele band* (alkenen, zoals propaan en ook het uit natuurlijke bronnen afkomstige isopreen) zijn zeer reactief en hebben een atmosferische verblijftijd van enkele uren, tot hooguit een dag. Aromatische verbindingen (xyleen, benzeen) en verzadigde koolwaterstoffen (alkanen) zijn in het algemeen minder reactief.

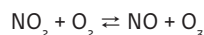
Dat heeft gevolgen voor de schaal waarop de koolwaterstoffen betekenis hebben. Isopreen bijvoorbeeld is slechts

op lokale schaal, tot op enkele tientallen kilometers van de bron, van belang voor ozonvorming. Benzeen met een verblijftijd van ongeveer zes dagen wordt verspreid op continentale schaal en CH₄ met een verblijftijd van 8-10 jaar op mondiale schaal (zie Figuur 2.2).

De uitstoot van stikstofoxiden bestaat voor 80-95% uit NO. Naast genoemde reacties, is het fotostationaire evenwicht bepalend voor de onderlinge verhouding van NO-, NO₂- en O₃-concentraties. In de volgende reactie wordt NO omgezet in NO₂, waarbij ozon wordt afgebroken:



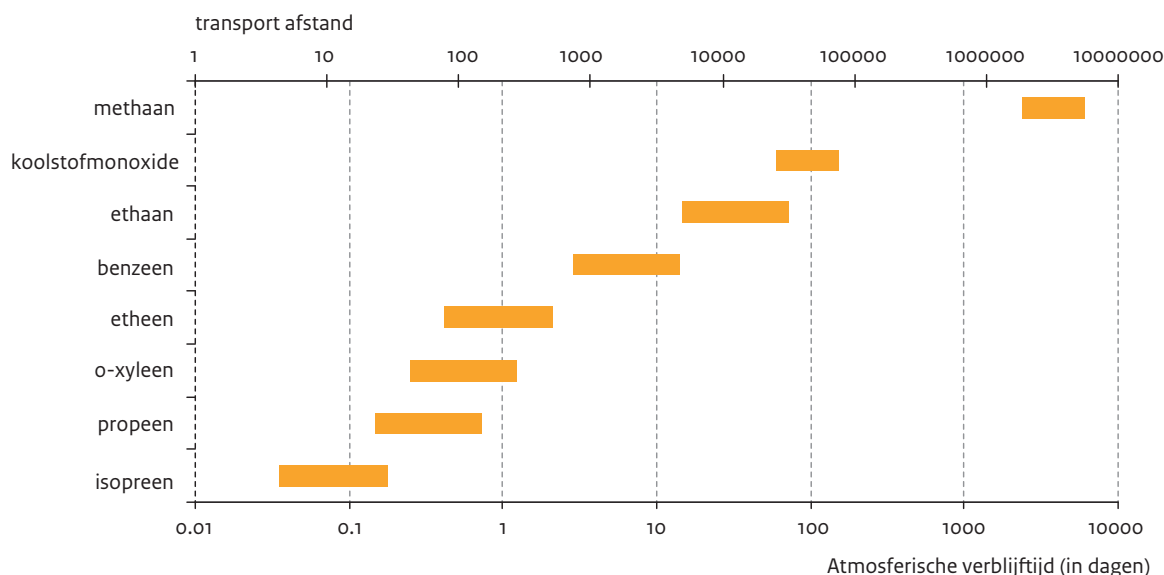
Dit is in feite het omgekeerde van de reacties R11 en R4. Netto kunnen deze drie reacties geschreven worden als het fotostationaire evenwicht:



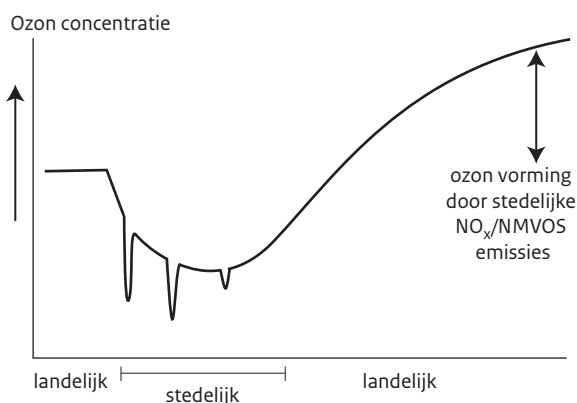
De reacties die het fotostationaire evenwicht beschrijven verlopen zeer snel. Instelling van het evenwicht vindt plaats binnen tientallen seconden tot minuten.

Dicht bij NO_x-bronnen, zoals in een stedelijke omgeving of in drukke straten, wordt een deel van het ozon snel weggevangen door de verse NO-uitstoot (R16); de ozonconcentratie is hier dan ook (tijdelijk) verlaagd (zie Figuur 2.3). Dit verschijnsel, ook wel NO_x-titratie genoemd, is goed te zien in de waarnemingen: ozonconcentraties zijn het laagst op straatstations en het hoogst op achtergrondstations (zie ook Hoofdstuk 3; bijvoorbeeld Figuur 3.8).

Figuur 2.2 De atmosferische verblijftijd van een aantal koolwaterstoffen en de ruimtelijke schaal waarop de stoffen getransporteerd worden. (Ter vergelijking: de omtrek van de aarde is 40.000 km).



Figuur 2.3 Verloop van de ozonconcentratie in een (denkbeeldig) luchtpakketje dat over een landelijk en een stedelijk gebied trekt. Bij het bereiken van de stad stijgt de concentratie van NO_x en koolwaterstoffen (VOS) in het luchtpakketje door de stedelijke emissies. Fotochemische vorming van ozon zal hier plaatsvinden, maar dat proces verloopt langzaam. De snelle aanpassing door het fotostationaire evenwicht verlaagt de ozonconcentratie boven de stad, en de hoge NO_x -niveaus in drukke straten verlagen het ozongehalte nog verder (de smalle dalen in de grafiek). Pas benedenwinds neemt het ozongehalte weer toe.



2.3 Waar komt ons ozon vandaan?

De hoeveelheid ozon in de troposfeer wordt voornamelijk bepaald door de snelheid van de chemische vorming en afbraak. Mondiaal wordt er ongeveer 10% meer ozon gevormd dan afgebroken: ruwweg 4.500 tegen 4.100 miljoen ton per jaar. Daarnaast zijn nog twee processen in

de troposfeer belangrijk: ozontransport vanuit de stratosfeer (naar schatting 540 miljoen ton per jaar) en de depositie op de bodem (ongeveer 1.000 miljoen ton per jaar).⁵

Op basis van metingen eind 19-de eeuw wordt de jaargemiddelde achtergrondconcentratie van ozon voor Noordwest-Europa geschat op ongeveer $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.⁶ Dit kan beschouwd worden als een schatting van de natuurlijke, biogene bijdrage aan ozon, van bosbranden en de bijdrage door transport van ozon vanuit de stratosfeer.

2.3.1 Transport vanuit de stratosfeer

In de stratosfeer, op grote hoogte, transporteert een grootschalige circulatie ozon vanuit de tropen (waar veel ozon wordt gevormd) naar hogere geografische breedtes en lagere delen van de stratosfeer. Daar vindt een netto-instroom van ozon naar de troposfeer plaats, die bijdraagt aan de ozonconcentraties aan de grond. Volgens schattingen varieert deze bijdrage aan de jaargemiddelde ozonconcentratie in onze regio $10\text{-}15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; in de zomer bedraagt dit $4\text{-}6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en in februari-maart wordt een maximale waarde van $20\text{-}30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ bereikt.⁷

Waarnemingen wijzen erop dat de huidige verhoogde ozonconcentratie op leefniveau op gematigde noordelijke breedtes en in het Noordpoolgebied voor een deel is toe te schrijven aan de toegenomen ozonconcentraties in de lagere stratosfeer sinds het midden van de jaren negentig van de vorige eeuw.⁸ De achterliggende oorzaak is een versterking van de stratosferische circulatie. Klimaatmodellen geven aan dat de stratosferische

circulatie verder zal versnellen onder invloed van klimaatverandering (zie sectie 4.1). Ook het verwachte herstel van de stratosferische ozonlaag zal de hoeveelheid ozon in de troposfeer in de komende decennia doen toenemen. Dit effect is het sterkst op het zuidelijk halfrond, waar de gemiddelde concentraties aan de grond van mei tot augustus hierdoor deze eeuw naar verwachting met zo'n 5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ zullen toenemen.⁹ Op het noordelijk halfrond zal het herstel van de ozonlaag een veel kleiner effect hebben op de ozonconcentraties aan de grond en is vooral de versterking van de circulatie van belang.

2.3.2 Depositie

Ozon is een reactief gas. Verwijdering aan het aardoppervlak vindt dan ook voornamelijk plaats doordat ozon reageert met materiaal aan het oppervlak, bijvoorbeeld vegetatie. Ozon wordt door planten via de huidmondjes opgenomen (zie Hoofdstuk 5). Meteorologische omstandigheden zijn daarbij van groot belang. Onder droge omstandigheden of bij hoge temperaturen – dan zijn ozonconcentraties juist vaak hoog – nemen planten beperkt ozon op. De ozondepositie is dan dus laag. Onder vochtige omstandigheden, wanneer huidmondjes openstaan, wordt er meer ozon opgenomen en is de ozondepositie juist relatief groot.

Ozon is slecht oplosbaar in water en de depositie is een orde van grootte kleiner dan op landoppervlak. Omdat 70% van het aardoppervlak water is, levert dit toch een substantiële bijdrage aan de depositie.

2.3.3 Intercontinentaal transport

De achtergrondconcentratie van ozon in Europa wordt voor een deel bepaald door ozon (en precursorgassen) vanuit Noord-Amerika en in mindere mate vanuit Azië.

De bijdrage aan het jaargemiddelde van ozon door antropogene emissies van NO_x , CO en NMVOS in Noord-Amerika, Azië en andere niet-Europese regio's wordt geschat op 6, 4,5 en 1,5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (zie Tekstbox 2.3). De Europese bijdrage wordt geschat op 15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Bij elkaar zorgen de antropogene emissies van NO_x , CO en NMVOS dus voor een bijdrage aan de jaargemiddelde ozonconcentratie in Europa van 27 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

De bijdrage van antropogene methaanemissies aan de ozonconcentratie in Europa wordt geschat op 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, waarbij circa 1,5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ door Europese methaanemissies zelf en 8,5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ door de andere niet-Europese regio's. Alle bijdragen samen leiden tot een antropogene bijdrage van 37 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ aan de jaargemiddelde concentratie in Europa.

In de ozonbalans voor Europa, als som van de natuurlijke achtergrond en de bijdragen van de antropogene bronnen, vormen de Europese antropogene emissies van methaan, NO_x , CO en NMVOS ongeveer een kwart van de bijdrage aan de jaargemiddelde ozonconcentratie. De andere antropogene bronnen uit niet-Europese regio's dragen ook ongeveer een kwart bij. Iets minder dan de helft van de jaargemiddelde ozonconcentratie in Europa wordt veroorzaakt door niet-antropogene bronnen, zijnde biogene emissies van methaan en VOS, door branden en door transport van ozon vanuit de stratosfeer. Tijdens zomerepisodes, waar ozonniveaus hoog kunnen oplopen, is de bijdrage van de Europese antropogene emissies van NO_x , CO en NMVOS daarentegen dominant en kan de bijdrage van deze emissies gemakkelijk drie vierde zijn.

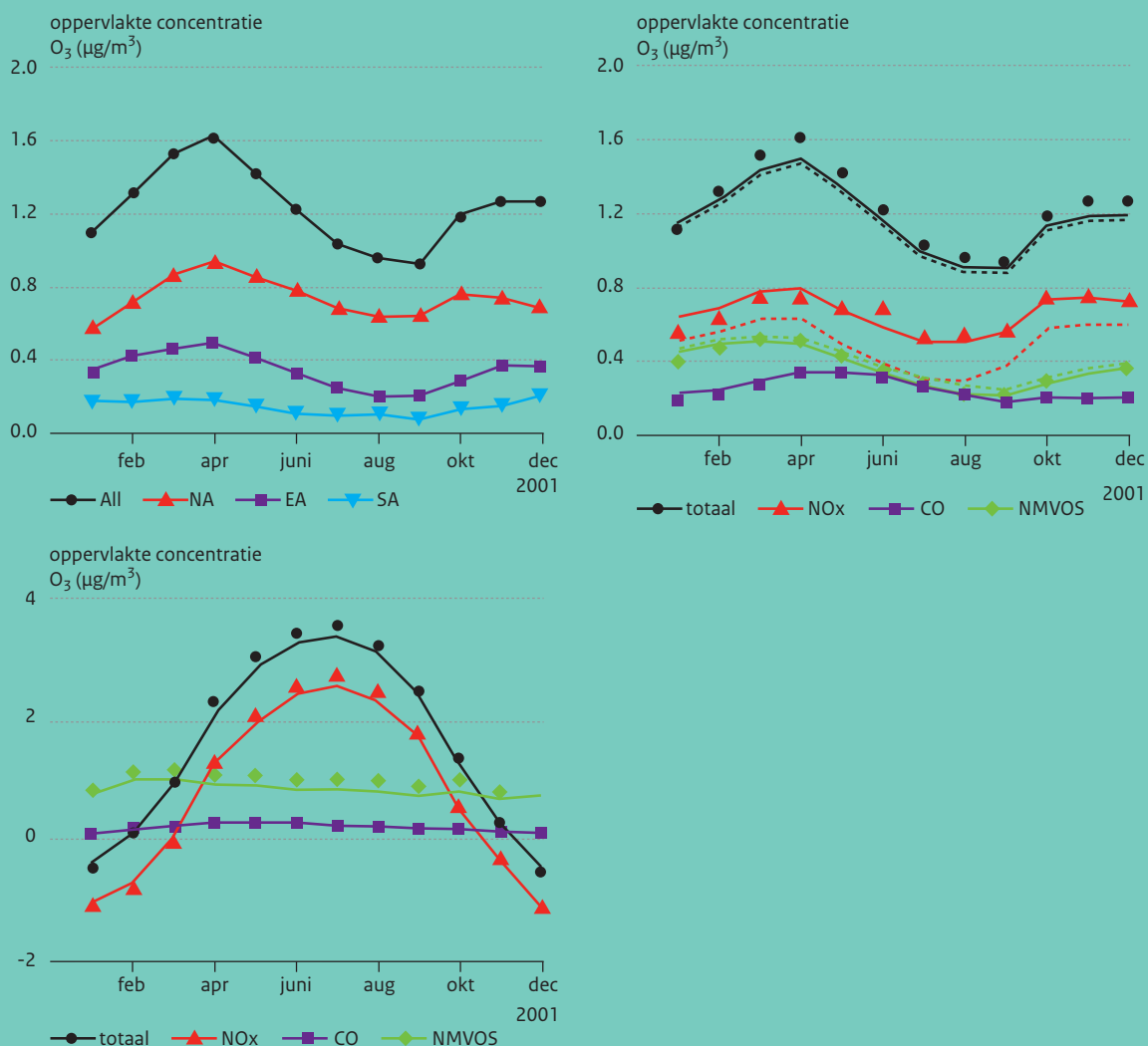
Tekstbox 2.3 Berekening van intercontinentale effecten

Een recente studie¹⁰ heeft op basis van 21 verschillende transportmodellen de bijdrage geschat van Europa, Zuid-Azië, Oost-Azië en Noord-Amerika aan elkaars ozonconcentratie. Die schatting is gemaakt door in de modellen een 20%-reductie te simuleren van de antropogene emissies van NO_x, CO en niet-methaan-vluchtige organische stoffen NMVOS.

Figuur 2.4 toont het effect van een 20%-reductie in de antropogene emissies in Noord-Amerika, Oost-Azië (China, Korea en Japan) en Zuid-Azië (India) op de maandgemiddelde ozonconcentraties in Europa. Een 20%-emissiereductie in Noord-Amerika resulteert in Europa in een afname van bijna 1 µg.m⁻³ in april. Het effect van een 20%-emissiereductie in Oost-Azië is ongeveer 0,4 µg.m⁻³.

De totale bijdrage van de antropogene emissies in NO_x, CO en NMVOS in de andere continenten op de ozonconcentratie in Europa is meer dan wordt verkregen door vermenigvuldiging van de effecten van de 20%-emissiereducties

Figuur 2.4. Afname van de maandgemiddelde oppervlakteconcentratie in Europa door een 20% reductie van antropogene emissies in de brongebieden Noord-Amerika (NA), Oost-Azië (EA), Zuid-Azië (SA) en Europa zelf. Boven: Effect van gecombineerde reducties in NO_x, NMVOS en CO in Noord Amerika (NA, rood), Oost-Azië (EA, donkerblauw), Zuid-Azië (SA, cyaan) en in deze drie brongebieden samen (ALL, zwart). Midden: Effect van een 20% reductie van de emissies in de regio's Noord Amerika, Zuid Azië en Oost Azië; afname in Europese ozonconcentraties afzonderlijk voor reducties in NO_x (rood), NMVOS (groen), CO (blauw) emissies en van deze stoffen gecombineerd (zwart). De getrokken en gestippelde lijnen zijn gebaseerd op een subset van het volledige ensemble van modellen (symbolen). In de gestippelde lijnen zijn de langetermijneffecten ten gevolgen van de geïnduceerde veranderingen in de methaanconcentratie ook meegenomen. Onder: de afname in ozon in Europa t.g.v. een 20% reductie in Europese emissies van NO_x (rood), NMVOS (groen), CO (blauw) en van de drie precursors gezamenlijk (zwart). (Bron: Fiore et al. 2009).¹⁰



in het bovenste paneel van Figuur 2.2 met een factor 5. Immers, bij lagere NO_x-concentraties verloopt de ozonvorming efficiënter en dus zal het effect bij een 100%-reductie groter zijn dan geschat uit 5 keer de 20%-bijdrage. Volgens de berekeningen van Wu et al. (2009)¹¹ kan het effect van een 100%-reductie in NO_x-emissies meer dan 10 keer zo groot zijn als het effect van een 20%-reductie. Voor reducties in NMVOS- en CO-emissies zijn de niet-lineaire effecten verwaarloosbaar klein. Het effect van een 100%-reductie in NO_x, NMVOS en CO tezamen ligt tussen de 5 en 10 keer het effect van een 20%-reductie in deze stoffen. Voor het gemak gaan we hier uit van een constante factor 7,5. Zodoende wordt de totale bijdrage van de antropogene emissies van NO_x, CO en NMVOS in Noord-Amerika, Oost- en Zuid-Azië op de jaargemiddelde ozonconcentratie in Europa geschat op respectievelijk 6, 3 en 1,5 µg.m⁻³.

De bijdrage van antropogene bronnen door andere niet-Europese regio's wordt geschat op 1,5 µg.m⁻³. De totale eigen Europese bijdrage wordt geschat op 15 µg.m⁻³.

De bijdrage van methaan (CH₄) aan de ozonconcentratie in Europa is berekend door de wereldwijde methaanconcentratie te reduceren met 20%.¹⁰ Dit komt overeen met een reductie van 25% in de antropogene methaanemissies. In Europa levert dit volgens de modellen een afname van de ozonconcentratie op grondniveau van ongeveer 4 µg.m⁻³ in de zomer en 2,4 µg.m⁻³ gemiddeld over het jaar. Omdat het effect van methaan op ozon nagenoeg lineair is, is de totale jaargemiddelde bijdrage van antropogeen methaan op de ozonconcentratie in Europa naar schatting 10 µg.m⁻³.

Alle bijdragen samen leiden tot een antropogene bijdrage van 37 µg.m⁻³ aan de jaargemiddelde concentratie in Europa. Dit is iets groter dan de natuurlijke achtergrond van Noord-Europa (van 30 µg.m⁻³).

2.3.4 Transport tussen Nederland en Europa.

Omdat de verblijftijd van ozon in de lagere delen van de troposfeer enkele dagen bedraagt, kan ozon zich over grote afstanden transporteren. Veel van de ozon in Nederland komt uit het buitenland, en andersom exporteert Nederland ozon en ozonprecursoren.

De gezamenlijke bijdrage van de EU-landen zonder Nederland is 6-8 maal zo groot als de eigen Nederlandse bijdrage aan de hogere ozonniveaus in Nederland (waarmee de blootstelling aan ozon in beeld gebracht wordt; zie Tekstbox 2.4). Daarbij zijn ook de NO_x-emissies van scheepvaart op de Noordzee van belang. Anderzijds is het effect van emissiereducties in Nederland op de ozonniveaus in het buitenland beperkt.

Lagere VOS-emissies leiden altijd tot een lagere ozonconcentratie, maar dat geldt niet voor lagere NO_x-emissies. Een NO_x-emissiereductie leidt dicht bij de bron juist tot een verhoogde ozonconcentratie als gevolg van de 'NO_x-titratie', maar leidt op grotere afstanden tot een lagere ozonconcentratie (zie bijvoorbeeld het verschil in teken van de bijdrage van NO_x-bronnen in België en Frankrijk op de AOT40 (zie bijlage A voor een verder uitleg van de ozon indicatoren) in Nederland, linkergrafiek in Figuur 2.5). In Hoofdstuk 6 worden het beleid op en de effecten van emissiereducties van NO_x en NMVOC beschreven.

Tekstbox 2.4 Het effect van de precursor-emissies in Nederland en Europa op de Nederlandse ozonconcentraties

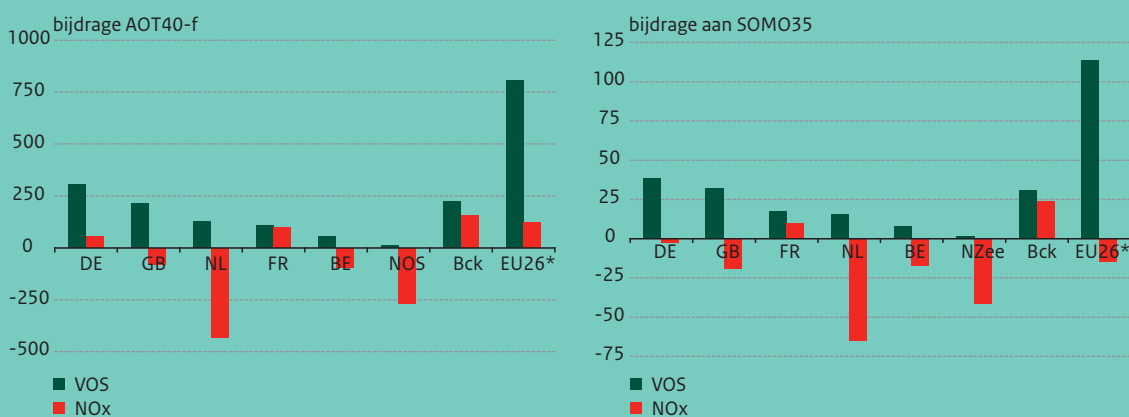
Met het EMEP-model¹² is berekend welke verandering de ozonconcentratie in het ene land ondergaat bij een 15%-vermindering in uitstoot van NO_x- of NMVOS-emissies in een ander land.

Voor Nederland zijn de veranderingen berekend voor twee verschillende ozonindicatoren (zie Figuur 2.5). Eén indicator sommeert alle uren waarin bosvegetatie is blootgesteld aan een concentratie boven 80 µg.m⁻³ gedurende het groeiseizoen: AOT40f (linkerplaatje in Figuur 2.5).

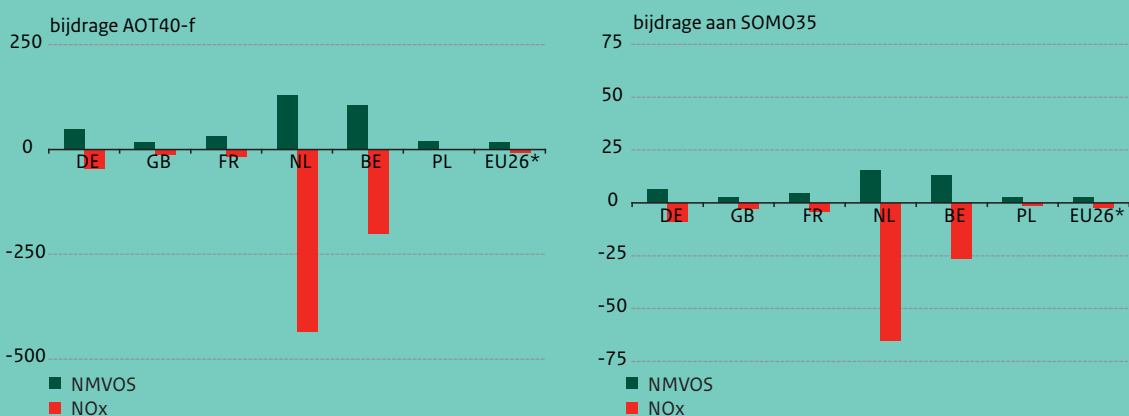
De andere indicator is de sommatie van de maximale 8-uursgemiddeldes per dag voor zover die concentraties hoger waren dan 70 µg.m⁻³ (SOMO35). Dit is een maat voor de effecten van ozon op de menselijke gezondheid (zie voor uitleg en gebruik ozonindicatoren Bijlage A).

In de buurlanden leidt een reductie van Nederlandse NO_x-emissies tot hogere concentraties (zie Figuur 2.6). Naarmate de afstand groter wordt neemt dit effect af. Een reductie van NMVOS-emissies in Nederland geeft een verlaging van de ozonniveaus in Nederland en omliggende landen.

Figuur 2.5 Verandering in de ozonniveaus in Nederland (links AOT40 voor bos, rechts, SOMO35) ten gevolge van een 15%- emissiereductie in het buitenland. EU26* is de bijdrage van emissies in de Europese Unie uitgezonderd de Nederlandse bijdrage; bijdragen op basis van modelberekeningen¹² voor 2007. Bck staat voor bijdragen van bronnen buiten het modelgebied (Bron: Benedictow et al., 2009¹³).



Figuur 2.6 Verandering in de ozonniveaus in het buitenland (links AOT40 voor bos, rechts, SOMO35) ten gevolge van een 15% emissiereductie in Nederland. EU26* is verandering in de gemiddelde concentratie in de overige 26 lidstaten van de Europese Unie; bijdragen op basis van modelberekeningen¹² voor 2007 (Bron: Benedictow et al., 2009¹³).

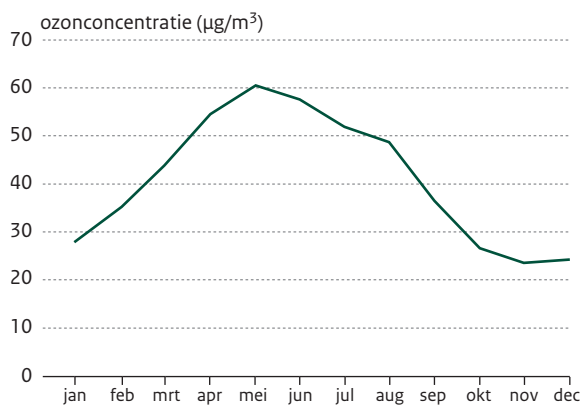


In een recente studie door Curci et al. (2009)¹³ zijn de effecten van de biogene emissies isopreen en terpenen op ozon onderzocht. De bijdrage van Europese isopreen- en terpeen-emissies aan de gemiddelde zomerse dagmaximum ozonconcentraties in Nederland is 4-10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ waarbij de boven- en ondergrens een indicatie geven van de verschillen tussen een slechte zomer (2000: 4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) en een zeer goede zomer (2003: 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). In Nederland is de bijdrage door isopreen iets groter dan die door terpenen.

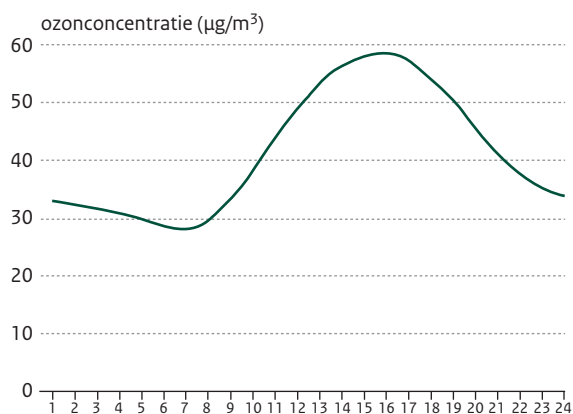
2.3.5 Ozon in Nederland

De verschillende processen in de ozonbalans leiden ertoe dat de ozonconcentratie verschillende patronen in de tijd vertoont. Zo is duidelijk te zien in het jaarverloop dat de maandgemiddelde ozonniveaus tijdens het voorjaar en de zomer het hoogst zijn (zie Figuur 2.7). Dat komt door een grotere stratosferische bijdrage van ozon in het voorjaar en doordat in de zomermaanden de weersomstandigheden gunstig zijn voor ozonvorming.

Figuur 2.7. De maandgemiddelde ozonconcentraties in Nederland. Data van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit 1997-2009.



Figuur 2.8. Verloop van de ozonconcentratie gedurende de dag. Data van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit 1997-2009.



Het concentratieverloop van ozon gedurende de dag vertoont een maximum later in de middag en een minimum rond zonsopkomst (zie Figuur 2.8). Dit dagelijks patroon is het gevolg van de toenemende ozonvorming met toenemende zinstraling gedurende de dag en afnemende concentraties gedurende de avond en nacht tengevolge van chemische afbraak en verwijdering van ozon door droge depositie aan het aardoppervlak.

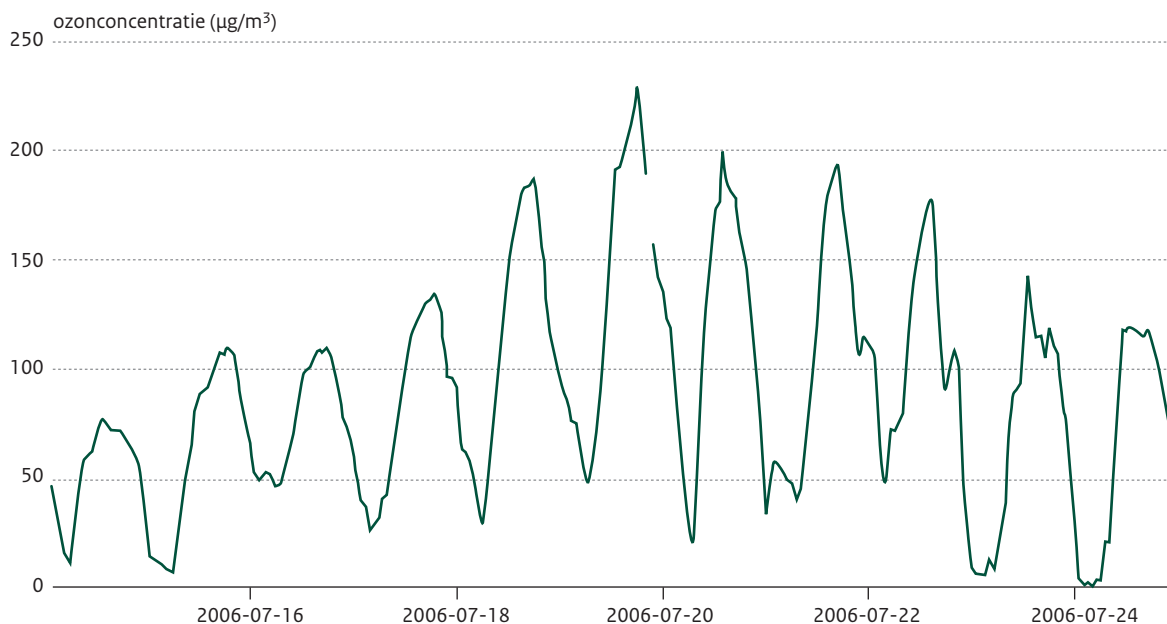
Dat de concentratie aan het begin van de dag sterk stijgt is ook een gevolg van het invangen van ozon die in de hogere luchtlagen (boven de inversie die zich 's nachts boven het afkoelend aardoppervlak vormt) is blijven hangen. Dat ozon zich op kan hopen en elke dag wederom ingevangen wordt, verklaart mede waarom ozonconcentraties heel hoog kunnen worden. Zie Hoofdstuk 3 voor meer informatie over de ozonniveaus in Nederland.

Hoge ozonconcentraties doen zich in het algemeen voor in Nederland als de weersituatie ertoe leidt dat de lucht in Nederland uit het continentale deel van Europa komt. Vaak treedt dit op bij stagnerende weersystemen tijdens de zomer, zoals een hogedrukgebied boven Europa, waar met veel zon en bij hoge temperaturen veel ozon gevormd wordt. De ozon hoopt zich dan op en kan naar Nederland getransporteerd worden. Tijdens deze episodes, waarbij sprake kan zijn van ozonsmog of zomersmog (zie Figuur 2.9 en Hoofdstuk 3), komt het merendeel van de ozon dus uit het buitenland en komen de hoge ozonniveaus op grote schaal in Nederland en Europa voor.

2.4 Conclusies

- Ozon op leefniveau ontstaat door een reeks atmosferisch-chemische reacties uit stikstofoxiden en koolwaterstoffen onder invloed van zonlicht.
- De ozon in Nederland wordt voor een klein deel gevormd in Nederland zelf en komt voor het overgrote deel uit het buitenland. Nederland exporteert ook ozon en ozonvormende stoffen naar het buitenland.
- De gemiddelde ozonniveaus in Noordwest-Europa worden voor ongeveer een kwart bepaald door Europese antropogene bronnen van ozonvormende stoffen, voor ongeveer een kwart door niet-Europese antropogene bronnen en voor de helft door biogene emissies.

Figuur 2.9. Ozonconcentratie gedurende juli 2006 waarbij frequent de ozonconcentratie boven de waarschuwingdrempel van 180 $\mu\text{g m}^{-3}$ kwam (LML Station Hellendoorn). Duidelijk is te zien dat de ozonconcentratie zich opbouwt voor de piek van 19 juli.



- Ozonconcentraties in Nederland kunnen hoog oplopen bij warm weer en hoge zinstraling waarbij de lucht uit het continentale deel van Europa aangevoerd wordt. De hoge ozonconcentraties worden dan voornamelijk veroorzaakt door Europese antropogene en biogene emissies.
- De niveaus van stikstofoxiden in Nederland (en omstreken) zijn zodanig hoog dat ten gevolge van de atmosferisch-chemische reacties bij een daling van de stikstofoxiden-emissies eerst een stijging van de ozonniveaus plaatsvindt. Reducties in koolwaterstoffen leiden altijd tot een verlaging van de ozonniveaus.

Referenties

- 1 Liu SC, Trainer M, Fehsenfeld FC, Parrish DD, Williams EJ, Fahey DW, Hubler G, Murphy PC. Ozone production in the rural troposphere and the implications for regional and global ozone distributions. *J Geophys Res.* 1987;92:4191–4207.
- 2 Wang Y, Jacob DJ. Anthropogenic forcing on tropospheric ozone and OH since preindustrial times. *J Geophys Res.* 1998;103:31123–31135.
- 3 Volz-Thomas A, Flocke F, Garthe HJ, Geiss H, Gilje S, Heil T, Kley D, Klemp D, et al. Photooxidants and Precursors at Schauinsland, Black Forest – A contribution to subproject TOR. In: Borrell P, Borrell PM, Seiler W (redactie). *Photo-Oxidants: Precursors and Products.* EUROTRAC Symposium. Garmisch-Partenkirchen:SPB Academic Publishing;1993:98-103.
- 4 Derwent RG, Davies TJ. Modelling the impact of NO_x or hydrocarbon control on photochemical ozone in Europe. *Atmos Environ.* 1994;28:2039–2052.
- 5 Wu S, Mickley LJ, Jacob DJ, Logan JA, Yantosca RM, Rind D. Why are there large differences between models in global budgets of tropospheric ozone? *J Geophys Res.* 2007;112(D05302).
- 6 Volz A, Kley D. Evaluation of the Montsouris series of ozone measurements made in the nineteenth century. *Nature.* 1988;332:240-242.
- 7 Collins WJ, Derwent RG, Garnier B, Johnson CE, Sanderson MG, Stevenson DS. Effect of stratosphere-troposphere exchange on the future tropospheric ozone trend. *J Geophys Res.* 2003;108(D12):8528.

- 8 Van Noije T, Eskes H, Verver G, Van der A R.
Troposferisch ozon en het klimaat. In: Kattenberg A.
(redactie.). De toestand van het klimaat in Nederland
2008. De Bilt:KNMI:2008.
- 9 Zeng G, Morgenstern O, Braesicke P, Pyle JA. Impact of
stratospheric ozone recovery on tropospheric ozone
and its budget. *J Geophys Res.* 2010;37:L09805:
doi:10.1029/2010GL042812.
- 10 Fiore AM, Dentener FJ, Wild O, Cuvelier C, Schultz MG,
Hess P, Textor C, Schulz M, et al. Multimodel estimates
of intercontinental source-receptor relationships for
ozone pollution. *J Geophys Res.* 2009;114:D04301:
doi:10.1029/2008JD010816.
- 11 Wu S, Duncan BN, Jacob DJ, Fiore AM, Wild O. Chemical
nonlinearities in relating intercontinental ozone
pollution to anthropogenic emissions. *Geophys Res
Lett.* 2009;36: L05806:doi:10.1029/2008GL036607.
- 12 Benedictow A, Fagerli H, Gauss M, Jonson JE, Nyiri A,
Simpson D, Tsyro S, Valdebenito A, et al. Transboundary
Acidification, Eutrophication and Ground Level Ozone
in Europe 2007. EMEP Status Report 1/2009.2009.
- 13 Curci G, Beekmann M, Vautard R, Smiatek G,
Steinbrecher R, Theloki J, Friedrich R. Modelling study
of the impact of isoprene and terpene biogenic
emissions on European ozone levels. *Atmospheric
Environment.* 2009;43:1445-1455.

3 Ozon en ozonvormende stoffen in Nederland

Dit hoofdstuk beschrijft de ontwikkeling van ozonconcentraties en de emissies en concentraties van ozonvormende stoffen (ozonprecursors) in Nederland. Ook wordt een beeld gegeven van de ons omringende landen. Een verklaring van de waargenomen trends wordt slechts in kwalitatieve zin gegeven. Er zijn geen atmosferisch-chemische verspreidingsmodellen gebruikt voor het doorrekenen van precursoremissies naar ozonconcentraties. Aan het eind van het hoofdstuk wordt kort een aantal internationale modelstudies bediscussieerd, waarin geprobeerd is de waargenomen trends in ozon te verklaren.

3.1 Ozonniveaus in Nederland en ons omringende landen

3.1.1. Ozonindicatoren en de EU-richtlijn

De ozonconcentraties in Nederland worden gemeten in het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit (LML) van het RIVM.^{1 a} Op basis van de metingen stelt het RIVM in voorkomende gevallen (pers)berichten op die de hoge ozonniveaus melden. Deze berichten informeren het publiek, waarschuwen voor de hoge ozonniveaus en kunnen daarmee helpen acute klachten te voorkomen. Daarnaast zijn de metingen de basis voor de berekening van de indicatoren voor ozon, waarvoor EU-normen bestaan (zie Tekstbox 3.1).

^a Op 1 april 2011 zijn in het LML de ozonmonitoren vervangen door nieuwe monitoren. Bij deze vervanging is gebleken dat de nieuwe monitoren circa 10 % hogere concentraties aangeven dan de oude. Uit andere vergelijkingen blijkt dat resultaten van de nieuwe monitor meer plausibel zijn. Dit betekent dat de meetresultaten uit de periode 1992-2010 mogelijk met 10 % onderschat zijn. Of dit voor de gehele periode geldt wordt op dit moment uitgezocht. Bij de weergave en interpretatie van de EU-ozonindicatoren in dit dossier is aangegeven wat de gevoeligheid is voor een mogelijke aanpassing met maximaal 10 %. Voor de overige indicatoren is dit niet significant en is deze gevoeligheidsanalyse niet expliciet uitgevoerd.

Tekstbox 3.1 Europese richtlijn (2008)

Op 28 maart 2008 hebben het Europese Parlement en de Europese Raad een nieuwe richtlijn (2008/50/EC)² aangenomen voor het verbeteren van de luchtkwaliteit. Deze Air Quality-richtlijn, die per 11 juni 2010 in werking is getreden, vereenvoudigt de regelgeving en heeft nieuwe beleidsinzichten verwerkt. De nieuwe richtlijn heeft de bestaande streefwaarden en langetermijndoelstellingen voor ozon ongewijzigd gelaten en ook de datum waarop de streefwaarden gehaald zouden moeten worden is ongewijzigd. Voor de langetermijndoelstellingen is geen datum meer vastgesteld.

Onderwerp	Middelingstijd	Streefwaarde	Deadline voor de streefwaarde *
Bescherming van de menselijke gezondheid	Hoogste 8-uurgemiddelde van een dag	120 $\mu\text{g.m}^{-3}$ max, gemiddeld over drie jaar, niet vaker dan 25 dagen per kalenderjaar worden overschreden.	1-1-2010
Bescherming van de vegetatie	Mei tot en met juli	AOT40 (berekend op basis van uurwaarden) 18.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ uur gemiddeld over 5 jaar	1-1-2010
Bescherming van de menselijke gezondheid	Hoogste 8-uurgemiddelde van een dag gedurende een kalenderjaar	120 $\mu\text{g.m}^{-3}$	Niet bepaald
Bescherming van de vegetatie	Mei tot en met juli	AOT40 (berekend op basis van uurwaarden) 6.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ uur gemiddeld over 5 jaar	Niet bepaald

* Vanaf deze datum zal worden beoordeeld of de streefwaarden worden nageleefd. 2010 zal dus het eerste jaar zijn waarvan de gegevens worden gebruikt bij het beoordelen van de naleving tijdens de volgende drie, respectievelijk vijf jaar.

Voor de bescherming van natuur wordt de indicator AOT40 gebruikt. AOT staat voor *Accumulated Ozone above Threshold of 40 ppb* en is de som van de per uur gemeten hoeveelheid ozon boven 40 ppb (circa 80 $\mu\text{g.m}^{-3}$) gedurende de maanden mei-juli (zie Bijlage A).

Informatie en alarmprempe

De richtlijn bepaalt ook dat lidstaten bij overschrijding van bepaalde drempels stappen nemen om de bevolking via de radio, televisie, kranten of het internet in te lichten. De informatiedrempel is vastgesteld op een gemiddelde waargenomen uurwaarde van 180 $\mu\text{g.m}^{-3}$ ('matige smog'). Een lidstaat moet een ozonalarm uit laten gaan als de ozonconcentratie gemeten over een uur gemiddeld groter is dan 240 $\mu\text{g.m}^{-3}$ ('ernstige smog').

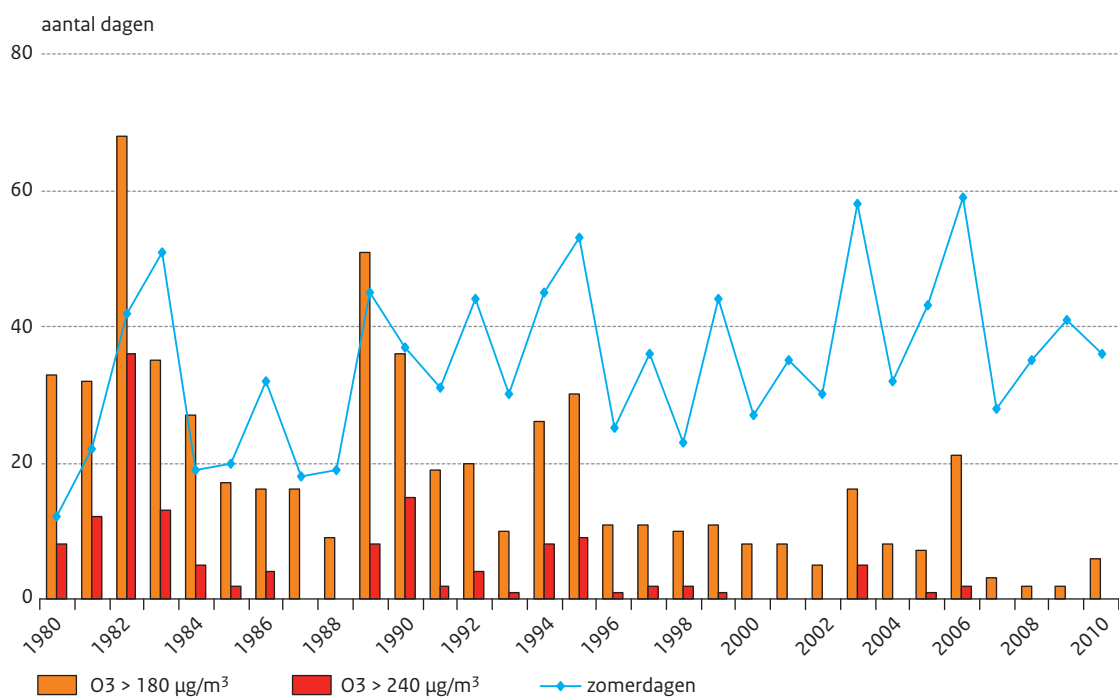
Bij een (verwachte) overschrijding van de informatie- of alarmprempe informeert het RIVM, bij mandaat van de provincies, de bevolking. Deze informatieverstrekking vindt onder meer plaats via persberichten, via teletekst (pagina 711) en via internet (<http://www.lml.rivm.nl>).

Het aantal dagen waarbij de informatiedrempel (aangeduid met matige smog; ozonconcentratie boven de 180 $\mu\text{g.m}^{-3}$) en waarbij de alarmprempe (aangeduid met ernstige smog; ozonconcentratie boven de 240 $\mu\text{g.m}^{-3}$) worden overschreden en het aantal zomerse dagen, staan weergegeven in Figuur 3.1.

Er is een grote variabiliteit in het optreden van ozonpieken over de jaren. Het optreden van ozonpieken hangt sterk af van de meteorologische omstandigheden gedurende dat

jaar. Jaren met veel zomerse dagen leiden in het algemeen tot hogere ozonniveaus. Het aantal smogdagen is vanaf de jaren tachtig van de vorige eeuw afgenomen, maar sinds eind jaren negentig neemt het aantal niet meer af, ook niet als gecorrigeerd wordt voor de variabele weersomstandigheden.³ In het zuiden en oosten van het land treden de meeste smogdagen op. Dit komt door de gemiddeld hogere temperaturen en de aanvoer van ozonrijke lucht uit het zuidelijk en oostelijk deel van Europa.

Figuur 3.1 Het aantal dagen met matige en ernstige smog en het aantal zomerse dagen.



Indien bij evaluatie de ozonconcentraties 10% hoger blijken (dit is de maximale inschatting), dan is het aantal dagen met matige en ernstige smog over 1992-2010 aanzienlijk hoger geweest.

Het aantal dagen waarop de 8-uursgemiddelde ozonconcentratie van 120 µg.m⁻³ is overschreden lag de afgelopen tien jaar rond de tien (zie Figuur 3.2). Dat is lager dan de norm van 25 dagen, gemiddeld over drie jaar, die in 2010 bereikt moet zijn. Na een aanvankelijke daling tot circa 1998 is er geen trend meer waarneembaar.

Er zijn duidelijke regionale verschillen in overschrijding. Zo zijn er in het zuiden en het oosten van het land vaker overschrijdingen van de 8-uursgemiddelde ozonconcentratie van 120 µg.m⁻³ en worden op een aantal stations ook over de afgelopen jaren de norm van meer dan 25 dagen overschreden. De langetermijndoelstelling van de EU is om op den duur geen overschrijdingen meer te hebben.

Indien bij evaluatie de ozonconcentraties 10% hoger blijken (dit is de maximale inschatting) dan wordt het aantal dagen waarop de 8-uursgemiddelde ozonconcentratie van 120 µg.m⁻³ overschreden wordt aanzienlijk groter. Het landelijk (driejaar)gemiddelde zou dan de afgelopen 10 jaar tussen de 15-20 dagen overschrijding zitten. Hetgeen nog onder de EU-norm van 25 is. In een aantal individuele jaren is de omvang van de overschrijdingen veel groter en wordt voor heel Nederland de 25 dagen

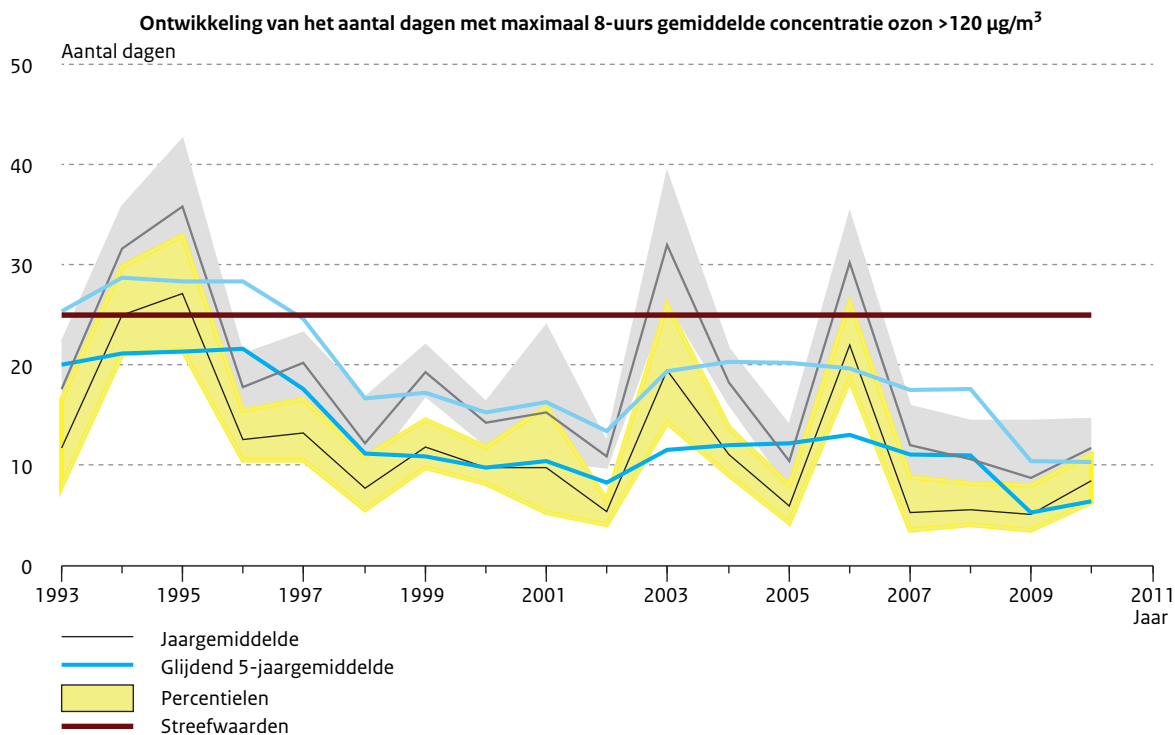
overschreden (in 2003 en 2006), maar daar hoeft niet op getoetst te worden.

De ozonconcentraties blijven al sinds begin jaren negentig ruim onder de EU-streefwaarde voor de bescherming van de vegetatie (AOT₄₀, zie Tekstbox 3.1) van 18.000 µg.m⁻³ uur (zie Figuur 3.3). Opvallend is dat 2006 zeer duidelijk naar voren komt, maar dat 2003 (de warmste zomer van de laatste decennia) nauwelijks opvalt. Dat komt doordat in 2003 de meest ernstige ozonepisoden in augustus voorkwamen en dus niet meetellen in de AOT₄₀.

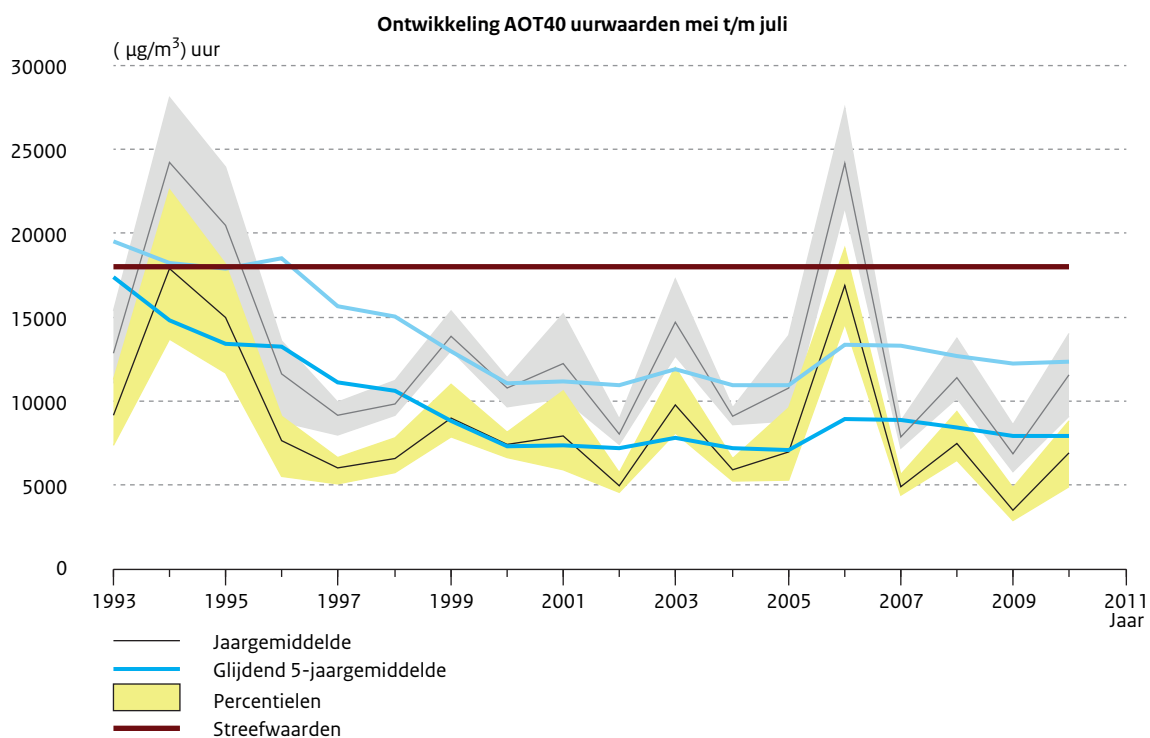
Voor de AOT-waarde wil de EU ook hier naar een aanscherping en wel naar een langetermijndoelstelling van 6.000 µg.m⁻³.uur. De AOT-waarde voor Nederland zit hier boven. Ook voor de AOT-indicator geldt dat de hoogste niveaus in het zuiden en oosten van het land plaatsvinden.

Indien bij evaluatie de ozonconcentraties 10% hoger blijken (dit is de maximale inschatting) dan zou de AOT₄₀ een factor 1,5-2 hoger liggen. De AOT₄₀-waarden liggen daarmee de afgelopen tien jaar echter nog steeds onder de EU-norm van 18.000 µg m⁻³ uur. De aangepaste AOT₄₀-waarden zitten aanzienlijk hoger dan de langetermijndoelstelling van 6.000 µg.m⁻³ uur.

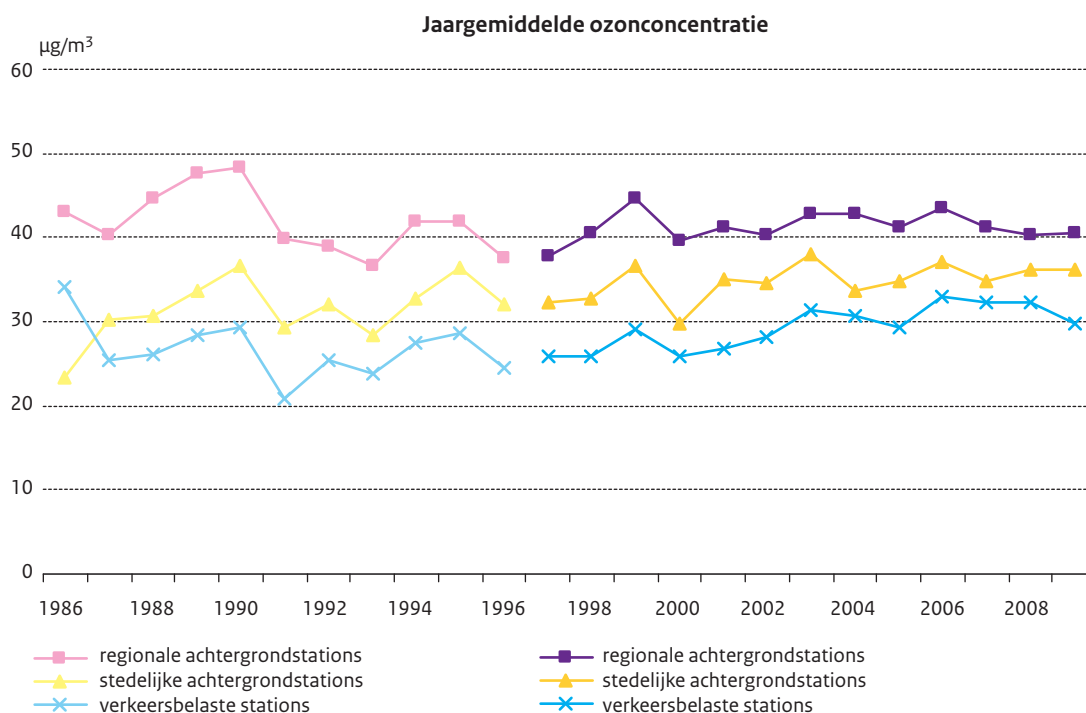
Figuur 3.2 Het aantal dagen met de dagelijkse 8-uurs gemiddelde ozonconcentratie van groter dan $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ gemiddeld over Nederland. Met geel zijn de 10- en 90-percentielen aangegeven, dat wil zeggen 80% van Nederland ligt in de gele band. Het glijdend 3-jaargemiddelde is het gemiddelde over drie jaar: het huidige jaar en de twee voorgaande jaren. Dit dempt de grote variabiliteit door meteorologische verschillen van jaar tot jaar. In grijs tinten is hetzelfde weergegeven, maar dan indien de ozonconcentraties 10% naar boven toe gecorrigeerd zijn.



Figuur 3.3 AOT40 gemiddeld over Nederland. Met geel zijn de 10- en 90-percentielen aangegeven, dat wil zeggen 80% van Nederland ligt in de gele band. Het glijdend 5-jaargemiddelde is het gemiddelde over vijf jaar: het huidige jaar en de vier voorgaande jaren. Dit dempt de grote variabiliteit door meteorologische verschillen van jaar tot jaar. In grijs tinten is hetzelfde weergegeven, maar dan indien de ozonconcentraties 10% naar boven toe gecorrigeerd zijn.



Figuur 3.4 Verloop van de jaargemiddelde ozonconcentraties voor Nederland voor regionale stations, stedelijke stations en de verkeersbelaste (straat)stations. Data zijn gesplitst in twee sets, omdat deze op verschillende stationsconfiguraties betrekking hebben.



3.1.2 Jaargemiddelde ozonconcentraties

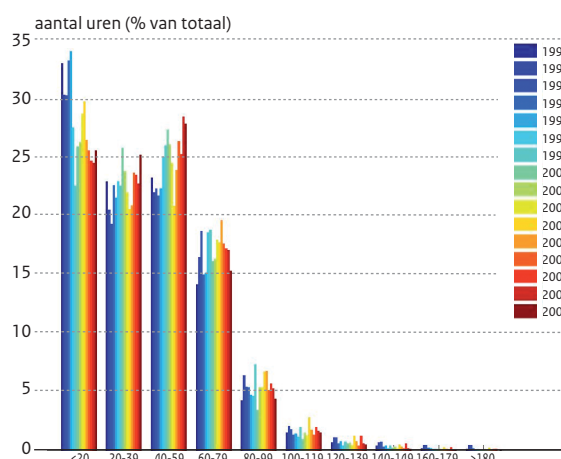
De jaargemiddelde ozonconcentratie (zie Figuur 3.4), gemeten op regionale stations, vertoont geen eenduidige trend. Over de periode 1986-2009 daalde de ozonconcentratie met circa $1,8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, ofwel met circa $0,08 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ per jaar. Deze daling is echter niet statistisch significant ($P < 0.05$). Deze reeks is niet gebaseerd op steeds dezelfde stations. In de periode 1997 tot en met 2009 is de meetconfiguratie nagenoeg gelijk gebleven. In de periode 1997-2009 is de concentratie licht gestegen met circa $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, een stijging van circa $0,09 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ per jaar. Ook hiervoor geldt dat de stijging niet statistisch significant is.

Op stedelijke en verkeersbelaste stations is wel een statistische significante stijgende trend over de periode 1986-2009 waarneembaar. Ook hiervoor geldt dat de periode 1986-1996 niet gebaseerd is op een constante stationsstelling. Voor de periode 1997-2009 is de trend niet significant op de stedelijke stations, voor de verkeersbelaste stations is er wel een significante stijgende trend van circa $7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ over deze periode.

De voornaamste reden voor deze stijging is de reductie van de NO_x -emissies en de afname van het aandeel NO daarin. Deze afnemende 'NO_x-titratie' (zie Hoofdstuk 2) zorgt ervoor dat lagere ozonconcentraties minder vaak voorkomen (zie Figuur 3.5). Dit is een belangrijk deel van de verklaring voor de stijging van de gemiddelden, vooral in

de stedelijke gebieden. De verdeling van ozon is in de loop van de tijd dus vlakker geworden: lage én hoge concentraties komen minder vaak voor dan 15 jaar geleden.

Figuur 3.5 Verloop van de ozonconcentraties ingedeeld in concentratieklassen van 1993-2008. Duidelijk is te zien dat in de loop van de tijd minder ozonniveaus voorkomen in bijvoorbeeld de klasse $< 20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en een duidelijke stijging in het aantal uren, waarbij de concentraties tussen de 20-39 en $40-59 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ liggen en in mindere mate bij niveaus tussen $60-79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Bij de hogere concentratieklassen zijn de trends minder duidelijk, alhoewel bij de hoogste klassen ($> 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) deze hoge concentraties begin jaren negentig vaker voorkwamen.

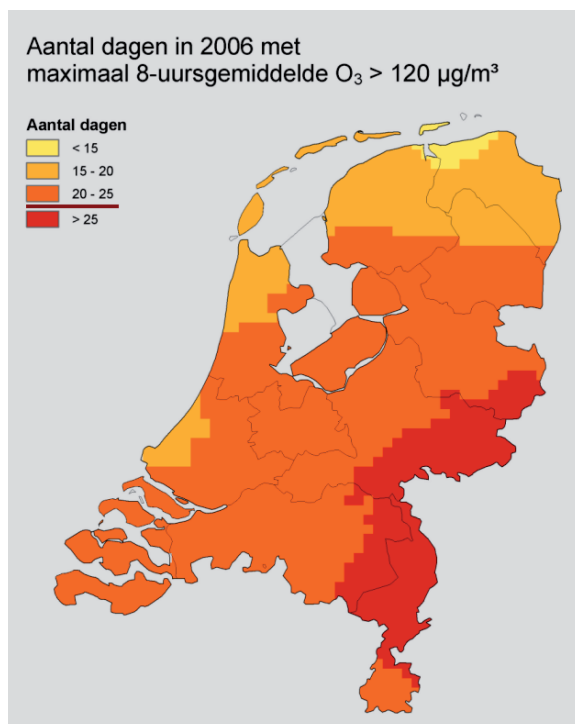


De stijging van de concentraties zou voor een (klein) deel ook kunnen worden toegeschreven aan een stijging in de achtergrondconcentraties van ozon voor Europa en het noordelijk halfrond (zie Paragraaf 3.1.4).

3.1.3 Ruimtelijke patroon ozonconcentratie

De ozonconcentraties verschillen per regio en vertoont voor hogere ozonniveaus een ander patroon dan voor het jaargemiddelde. In het zuiden en oosten van Nederland is de temperatuur gemiddeld hoger en wordt meer ozonrijke lucht uit het zuiden en oosten aangevoerd. Daardoor komen daar vaker hogere ozonniveaus voor, zoals te zien is aan het aantal dagen overschrijding van de 8-uursnorm van $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (zie Figuur 3.6).

Figuur 3.6 Ruimtelijke verdeling van het aantal dagen met overschrijding van de EU-streefwaarde voor kortdurende bevolkingsblootstelling (maximale 8-uursgemiddelde boven $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) in 2006, een jaar met relatief veel overschrijdingen, zie Figuur 3.1.



Het jaargemiddelde van de ozonconcentraties over Nederland vertoont minder regionale verschillen (zie Figuur 3.7a). De jaargemiddelde ozonconcentratie bedroeg in Nederland in 2007 tot en met 2009 circa $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, waarbij omstreeks 90% van alle metingen tussen de 30 - $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ liggen. De Randstad en Centraal-Nederland zijn daarbij relatief laag vanwege het titratie-effect. De hoogste waarden van ozon komen in het zuidwesten en het noorden voor, waar dit effect minder sterk optreedt en de niveaus meer de achtergrond weergeven.

Bij de jaargemiddelde concentratie van oxidant (O_x), dat is de som van de ozon en de stikstofdioxideconcentratie, is het effect van titratie per definitie niet aanwezig, omdat daarbij ozon omgezet wordt in NO_2 (zie Figuur 3.7b). Wel is directe uitstoot van NO_2 van invloed. Vandaar dat de oxidantniveaus in stedelijke gebieden en langs snelwegen zijn verhoogd (tot meer dan $9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ extra). In het noorden en oosten van Nederland is de oxidantconcentratie circa $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, waarvan een klein deel door de directe uitstoot van NO_2 . Op basis van de gemiddelde NO_x -concentratie in dit deel van Nederland van circa $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en een direct percentage NO_2 -uitstoot van 20% komt het aandeel van directe NO_2 -uitstoot op $4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, waaruit volgt dat de jaargemiddelde ozonconcentratie in dit deel van Nederland zonder titratie-effect circa $56 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ zou zijn.

3.1.4 Achtergrondconcentratie

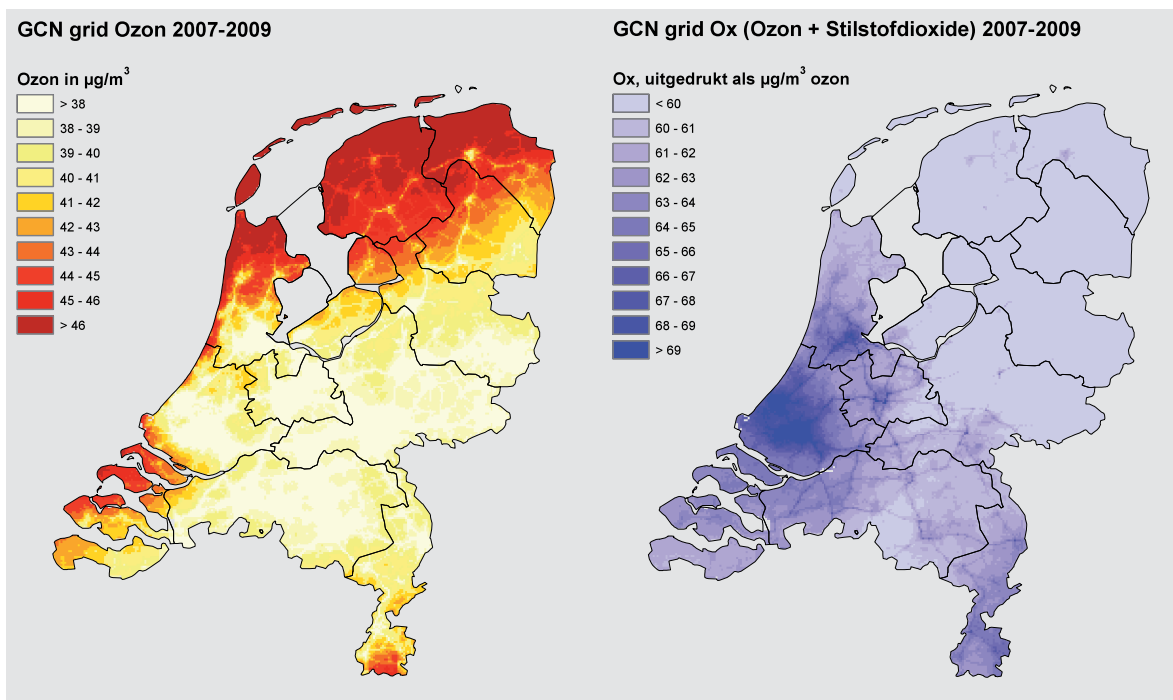
De Nederlandse meetpunten geven geen representatief beeld van de Europese ozonachtergrond, daarvoor is er teveel beïnvloeding door lokale bronnen. Het Ierse station Mace Head meet voor het grootste gedeelte van de tijd lucht die ongestoord van de Atlantische Oceaan afkomt. Dit station is een goed voorbeeld van een achtergrondstation in Europa. De ozonconcentratie in Mace Head is gemiddeld $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, wat niet alleen veel hoger is dan de gemiddelde ozonconcentratie in Nederland, maar ook hoger dan de oxidantconcentratie in Nederland. Dat de oxidantconcentratie in Nederland lager is dan in Mace Head is een gevolg van de droge depositie van ozon boven land en in mindere mate boven zee.

Dat lokale effecten overal in Nederland aanwezig zijn, illustreert het weekverloop van de ozonconcentratie (zie Figuur 3.8). Daarin is de concentratie in het weekend – met minder verkeer, dus minder NO en dus een verminderd titratie-effect – overal hoger dan op werkdagen. Weliswaar is op de verkeersbelaste stations dit weekendeffect sterker aanwezig, maar het effect is ook duidelijk waarneembaar op de regionale stations.

Over de trend van achtergrondconcentratie van ozon bestaat geen eenduidige informatie. Diverse publicaties^{6,7} geven wel een geleidelijke stijging van de achtergrondconcentraties van ozon aan. Meetreeksen van vooral kuststations, zoals Mace Head (Ierland), tonen een stijging van de achtergrondconcentratie met circa $4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ per decennium sinds 1980.⁸

Een stijging in de achtergrondconcentratie van ozon is te wijten aan sterk toegenomen emissies in Azië. Satellietmetingen laten zien dat de hoeveelheid stikstofdioxide (NO_2) in de troposfeer boven China tussen 1996 en 2005 is verdubbeld, wat overeenkomt met gemiddeld 7%-groei per jaar.⁹ Als aangenomen wordt dat CO en NMVOS in hetzelfde tempo zijn toegenomen en dit ook

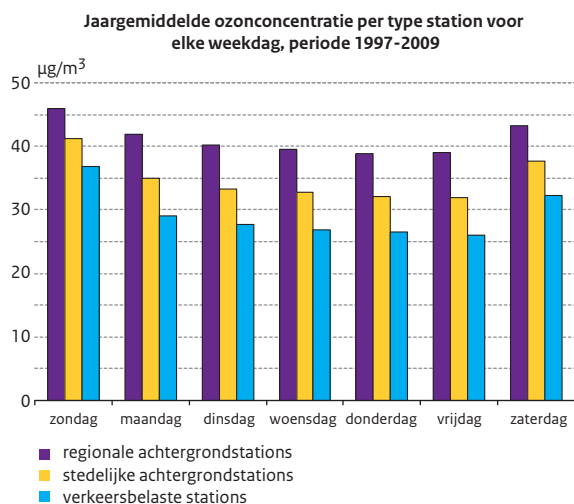
Figuur 3.7 De gemiddelde concentratie ozon(a) en oxidant(b) over Nederland voor 2007-2009. Kaart is gebaseerd op metingen uit het LML en modelberekeningen (bron Velders et al, 2009).⁴ Let op: de schaal is hier zeer gedetailleerd weergegeven; per 1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.



geldt voor India, dan komt het totale effect in Europa uit op ongeveer $0,2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ per jaar. Door veranderingen in grootschalige weerpatronen gedurende de laatste 40 jaar zou de ozonconcentratie circa $0,12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ per jaar toegenomen zijn.¹⁰ De methaanconcentratie is in de jaren negentig met ongeveer 2% toegenomen en sinds 1999

vrijwel constant gebleven tot 2007. Methaanvariatiën hebben daarom nauwelijks bijgedragen aan de recente trend in ozon. De laatste jaren is de concentratie weer gaan stijgen. De verwachting is dat de methaanconcentratie in de toekomst verder zal blijven stijgen door een toename van de emissies. Dit zal bijdragen aan een verdere stijging van de ozonconcentraties.

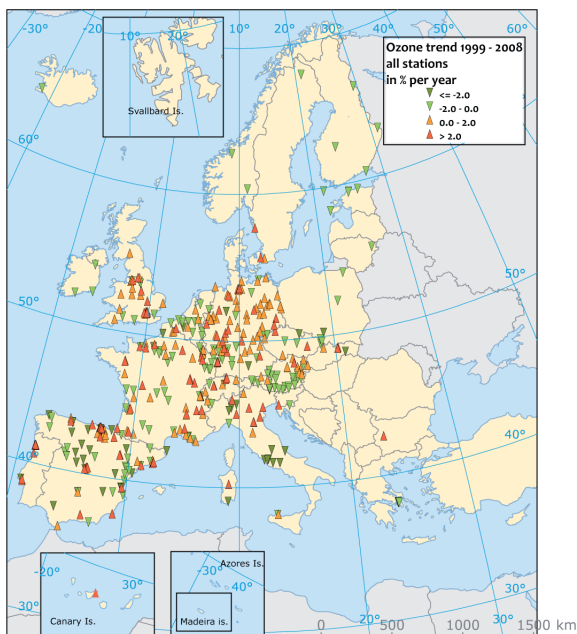
Figuur 3.8 Gemiddeld weekverloop van de ozonconcentraties op regionale, stedelijke achtergrond en verkeersbelaste stations. Door 20-30% minder verkeer en een betere spreiding in het weekend verwijderd NO minder ozon en stijgt de ozonconcentratie. Dat is meetbaar op alle type meetpunten.



Maar er zijn ook stations waar deze stijging niet of minder optreedt. De bergstations Wank en Zugspitze in de Duitse Alpen tonen vanaf 2003 een daling in de jaargemiddelde concentraties, op de Hohenpeissenberg, (Alpen) is de trend in de tien jaar voor 2007 (na jarenlange stijging) nul.^{11,12} Kislovodsk in de Kaukasus geeft een neerwaartse trend over de gehele periode.¹³

Het Europese Milieuagentschap (EEA) concludeert dat er geen duidelijke trend waarneembaar is van de ozonconcentratie in Europa (zie Figuur 3.9). Het gaat hier echter wel om alle type stations, dus een deel van de stijgende trends wordt verklaard door het afnemende titratie-effect in stedelijk gebied. Er wordt wel geconcludeerd dat in Scandinavië, de Baltische staten en de hoger gelegen rurale gebieden er een dalende trend te zien is.

Figuur 3.9. Trend in de ozonconcentratie op stations over Europa (Bron EEA 2010¹⁴).



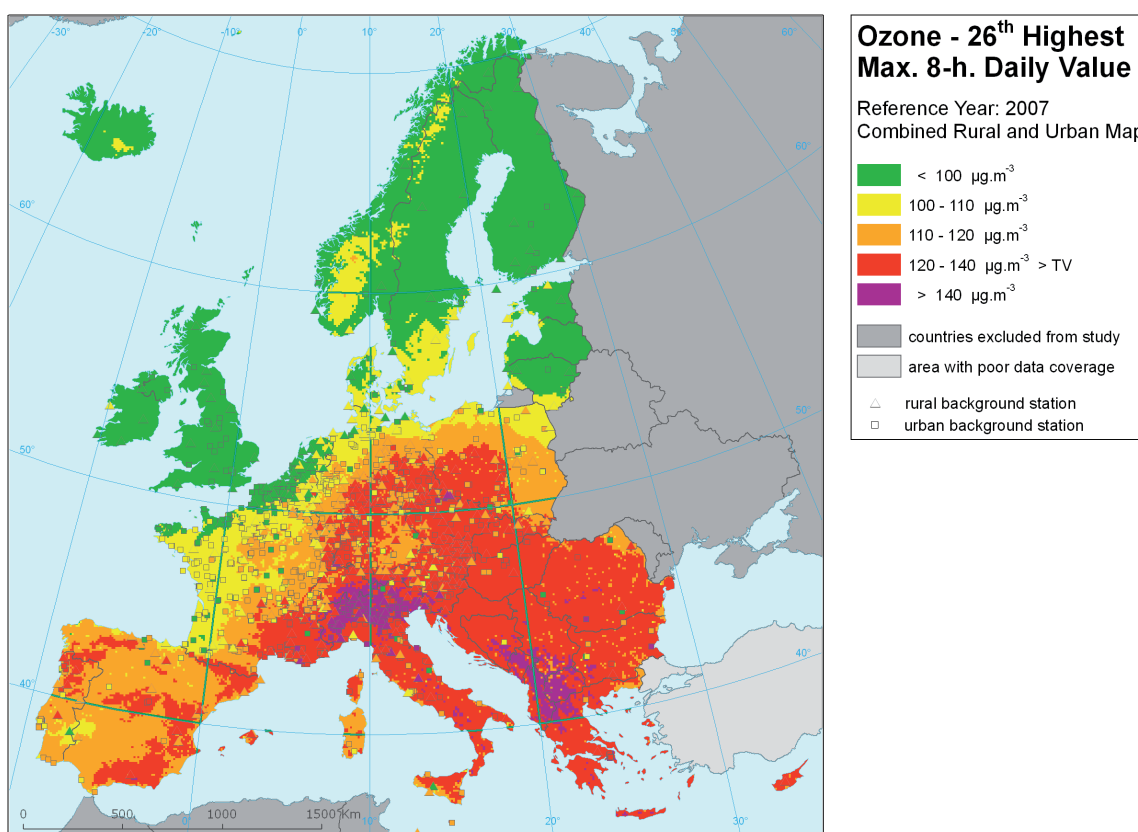
3.2 Ozonniveaus in ons omringende landen

De ozonconcentraties in Europa vertonen een grote variatie. Zo zijn de ozonniveaus in Zuid-Europa aanzienlijk hoger dan in Noordwest-Europa. In 2007 is de streefwaarde voor kortdurende blootstelling in het noorden van Europa niet of nauwelijks overschreden, maar verder naar het zuiden steeds vaker (zie Figuur 3.10). Dat de ozonniveaus in Zuid-Europa aanzienlijk hoger zijn komt voornamelijk omdat de klimatologische omstandigheden daar gunstig zijn voor ozonvorming.

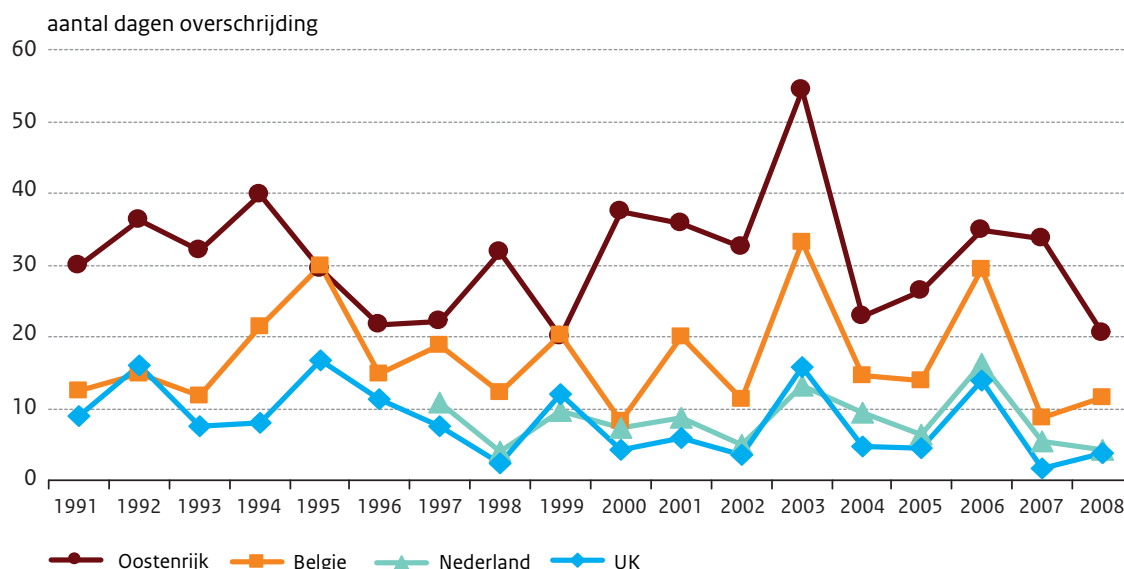
Nederland behoort met de meeste andere landen uit Noordwest-Europa tot de landen met de minste overschrijdingen (zie Figuur 3.10 en 3.11). Net als voor Nederland geldt dat ook in het Verenigd Koninkrijk en België over de periode na 1997 geen trend waargenomen wordt in het aantal overschrijdingsdagen.

In zowel Nederland als het Verenigd Koninkrijk zijn de ozonpieken over de periode 1990-2005 gedaald, vooral

Figuur 3.10. Op-25-na hoogste maximum van de 8-uur lopend-gemiddelde ozonconcentratie in een etmaal. Als deze waarde hoger dan $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ is, betekent dit dat het de 8-uurgemiddelde ozonconcentratie van $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ al op 25 dagen is overschreden (Bron EEA 2009).¹⁵



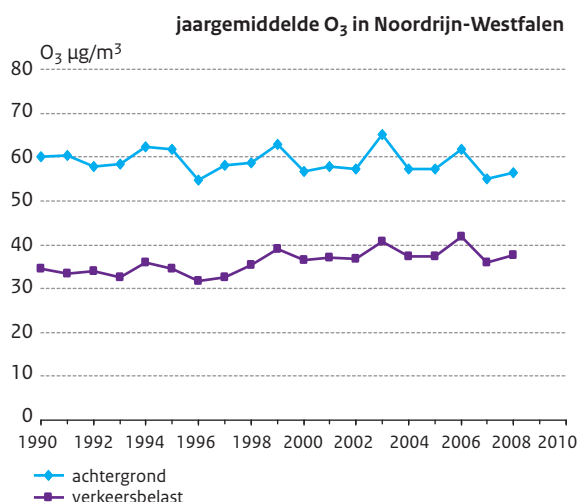
Figuur 3.11 Ontwikkeling van het gemiddeld aantal dagen overschrijding van de maximale 8 uur gemiddelde ozonconcentratie boven de $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, in een aantal landen.¹⁶ Voor Nederland komen de getallen door een andere selectie van stations niet precies overeen met die in Figuur 3.2. Ook kunnen de Nederlandse data hoger komen te liggen na evaluatie van de ozondata tussen 1992-2010 (zie Paragraaf 3.1.1). Bron: EEA, 2009¹⁶



door de dalende ozonconcentraties in de eerste helft van de jaren negentig. Vanaf ongeveer 1996 dalen de ozonpieken vrijwel niet meer. Deze trend geldt ook voor Duitsland.

De jaargemiddelde ozonconcentratie op belaste stations in Noordrijn-Westfalen volgt het stijgende verloop van de ozonconcentratie op de verkeersbelaste en stedelijke achtergrondstations in Nederland (zie Figuur 3.4 en 3.12). Op het achtergrondstation (Eifel) is de concentratie over de jaren heen redelijk constant.

Figuur 3.12 Jaargemiddelde ozonconcentraties op basis van enkele stations in Noordrijn-Westfalen. 'Belast' is het gemiddelde van 6 stations, te weten: Bielefeld, Borken, Huerth, Nettetel, Rodenkirchen en Wesel. 'Achtergrond' is het station Eifel.



3.3 Trends in ozonprecursors

Deze paragraaf beschrijft de trends in de emissies en concentraties van de ozonvormende stoffen (ozonprecursors) vanaf 1990. Ook in het Europese beleid en in de emissiedoelstellingen (National Emission Ceilings Directive) is 1990 als referentiejaar gekozen.

3.3.1. Trends in emissies^b

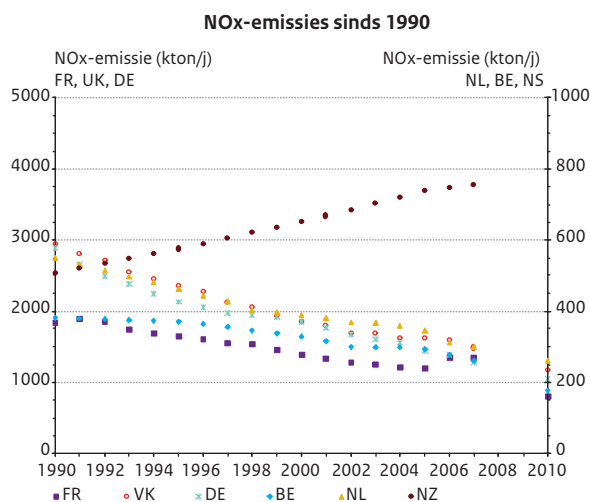
Stikstofoxiden (NO_x)

De totale NO_x -emissies in Nederland en omliggende landen (inclusief de Noordzee) zijn sinds 1990 sterk gedaald (zie Figuur 3.13).

De emissies van stikstofoxiden in Nederland daalden tussen 1990 en 2007 met 45%. Buurlanden vertonen soortgelijke reducties, variërend van 55% (Duitsland) tot 31% (Frankrijk). De EU-27 als geheel haalde 39%. De emissies van de internationale zeescheepvaart op de Noordzee en op andere zeeën zijn sinds 1990 echter fors gestegen, met circa 50%. De NO_x -emissies op de Noordzee zijn nu groter dan de emissies van Nederland en België bij elkaar.

^b Bron: EMEP ('national reported emissions used for modelling', www.emep.int). Deze emissies wijken op een aantal punten licht (niet significant voor deze analyse) af van de EEA-data (EEA, 2009b)⁷, waarin voor een aantal landen de emissies van de eerste jaren na 1990 ontbreken.

Figuur 3.13 Verloop van de NO_x-emissies (kton/jr) sinds 1990, inclusief de EU- doelstellingen (NEC) voor 2010. Let op: de waarden voor Nederland, België en de Noordzee (NZ) verwijzen naar de rechteras.

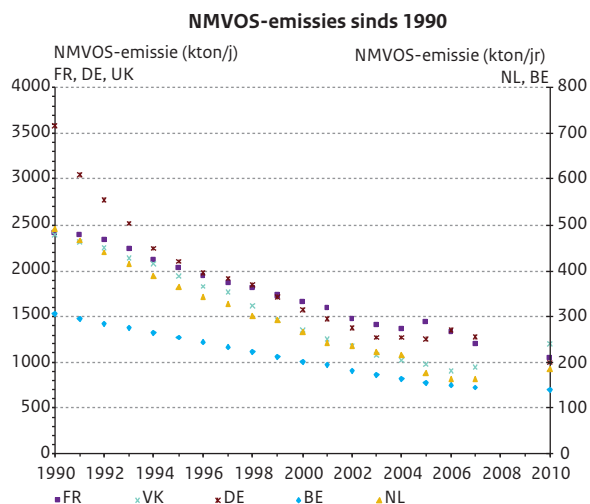


Nederland en elk van de omliggende landen hebben hun EU-doelstelling voor 2010 echter nog niet gehaald. De verwachting is dat Nederland met de geplande maatregelen de doelstelling gaat halen, dat Duitsland en het Verenigd Koninkrijk aanvullende maatregelen nodig hebben en dat België en Frankrijk hun doelen ook met aanvullende maatregelen niet realiseren.¹⁷

Niet-methaan vluchtige organische stoffen (NMVOS)

De emissies van NMVOS in Nederland en omliggende landen zijn in de periode 1990-2007 nog sterker gedaald dan bij NO_x (zie Figuur 3.14). In Nederland, het Verenigd

Figuur 3.14 Verloop van de NMVOS-emissies (kton/jr) sinds 1990, inclusief de EU-doelstellingen (NEC) voor 2010. Let op: de waarden voor Nederland en België verwijzen naar de rechteras.



Koninkrijk en Duitsland was de reductie bijna tweederde, in België en Frankrijk zijn de emissies gehalveerd, in de EU-27 was de reductie 49%. Nederland en het Verenigd Koninkrijk hebben hun emissiedoelstelling voor 2010 al in 2007 bereikt, terwijl Duitsland, België en Frankrijk dat met de geplande maatregelen in 2010 ook zullen halen.

De emissies van NMVOS op zee zijn sinds 1990 met de helft toegenomen, maar zijn relatief zeer laag (niet weergegeven in Figuur 3.14).

Biogene NMVOS

NMVOS worden niet alleen door antropogene activiteiten geëmitteerd, maar ook door natuurlijke processen, de zogenaamde biogene uitstoot. De twee belangrijkste vertegenwoordigers in deze groep zijn isopreen (C₅H₈) en de terpenen (C₁₀H₁₆). Terpenen komen in verschillende vormen van samenstelling voor. Isopreen wordt voornamelijk door de bladeren van loofbomen uitgestoten. Terpenen worden grotendeels door naaldbomen geëmitteerd.

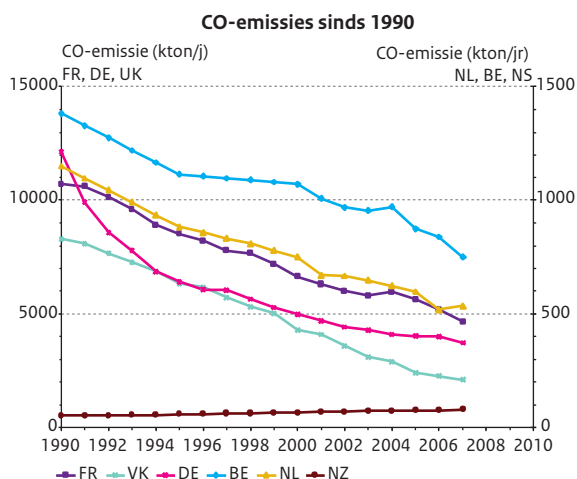
De uitstoot van zowel terpenen als isopreen hangt uiteraard af van het areaal aan bos en het type bos. Daarnaast spelen temperatuur en licht een belangrijke rol. De emissie van isopreen hangt exponentieel van de temperatuur af, waarbij een maximum optreedt bij circa 40 °C. Door Guenther et al. (1995)¹⁸ zijn relaties gelegd tussen de isopreen- en terpeen-emissies als functie van meteorologische condities, type vegetatie, et cetera. In atmosferische verspreidingsmodellen waarin isopreen (en soms ook terpeen) vanwege de invloed op ozon gemodelleerd wordt, worden de emissies vaak volgens de methode van Guenther berekend. Voor Europa heeft Simpson (Simpson et al, 1995¹⁹) modificaties aanbevolen. In laatstgenoemde studie worden de totale Europese isopreen-emissies op circa 4.500 kton/jr geschat. Ter vergelijking: de totale antropogene NMVOS emissie in de EU-27 bedraagt voor 2010 naar verwachting circa 8.000 kton/jr.¹⁷ De onzekerheden in de isopreen- en terpeen-emissies zijn echter aanzienlijk. Simpson et al. (1995)¹⁹ schatten deze zelfs tot een factor 5.

In een recente studie door Curci et al. (2009)²⁰ zijn de effecten van isopreen en terpeen op ozon onderzocht. Naast de eerdergenoemde methode van Guenther en Simpson is ook een methode door Steinbrecher et al. (2008)²¹ ingezet. Deze methode resulteert in een halvering van de Europese isopreen-emissies ten opzichte van die volgens Guenther-Simpson en in een verschuiving van de verdeling. Voor de terpenen zijn er weinig verschillen.

CO

Het Verenigd Koninkrijk en Duitsland rapporteren met respectievelijk 74% en 69% de grootste reducties van CO-emissies over de periode 1990-2007 (zie Figuur 3.15).

Figuur 3.15 Verloop van de CO-emissies (kton/jr) sinds 1990. Let op: de waarden voor Nederland, België en de Noordzee (NZ) verwijzen naar de rechteras.



Nederland, België en Frankrijk halen ongeveer 50%, de EU-27 gezamenlijk 55%. Voor CO heeft de EU geen EU-emissieplafonds gedefinieerd.

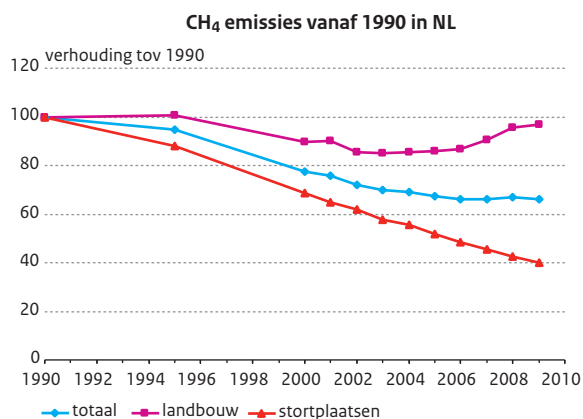
De CO-emissies op de Noordzee zijn laag vergeleken met de uitstoot op land, maar ook in dit geval zijn de emissies fors gestegen.

CH₄

Methaan wordt door zowel natuurlijke als antropogene bronnen uitgestoten, waaronder: drassige gebieden, moerassen, oceanen, rijstvelden, voedselvertering door runderen, stortplaatsen, productie en distributie van fossiele brandstoffen, en verbranding van biomassa. De mondiale emissie wordt op circa 580 Tg/jr geschat²² en het aandeel van menselijke activiteiten bedraagt circa 60%. Wereldwijd stijgen de methaanemissies door toedoen van vooral de Aziatische landen, terwijl een aantal landen in Europa en Noord-Amerika een daling van de emissies laten zien.²³

Voor Nederland zijn stortplaatsen, voedselvertering door runderen en productie en distributie van fossiele brandstoffen belangrijke antropogene bronnen. De belangrijkste natuurlijke bronnen zijn "wetlands" (drassige gebieden). In de periode 1990-2008 is de methaanemissie in de EU-27 met 31% gedaald, waarbij de daling tamelijk gelijkmatig verlopen is.²⁴ In Nederland was de daling over dezelfde periode 33%.^{24,25} De daling in Nederland is grotendeels in de eerste tien jaar gerealiseerd, vooral door de sterke daling van de emissies uit stortplaatsen (zie Figuur 3.16). In Nederland wordt het aandeel biogeen voornamelijk door voedselvertering en wetlands bepaald. Het aandeel biogeen in de Nederlandse emissies is in de periode 1990-2010 gestegen van ongeveer 40% naar 60%.

Figuur 3.16 Ontwikkeling van de methaanemissies ten opzichte van die in 1990 met onderverdeling naar de twee belangrijkste brongroepen. (Bron gegevens: CBS 2010²⁵).



3.3.2 Trends in concentraties

De trends in de concentraties van de precursors kunnen gebruikt worden om de trend in de gerapporteerde emissies te verifiëren. Dit kan slechts op een kwalitatieve manier plaatsvinden door te kijken of de daling van de emissies weerspiegeld wordt in een relatief vergelijkbare daling van de gemeten concentraties.

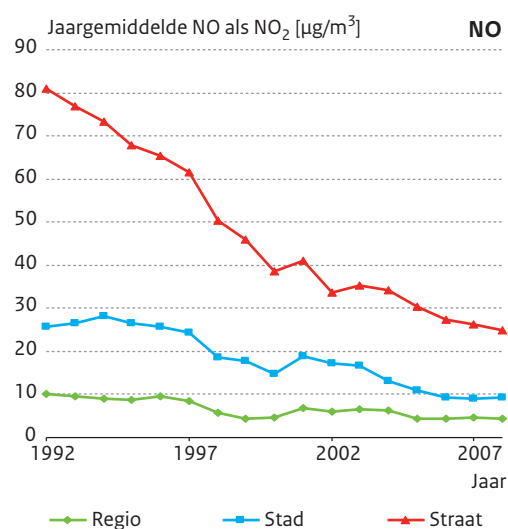
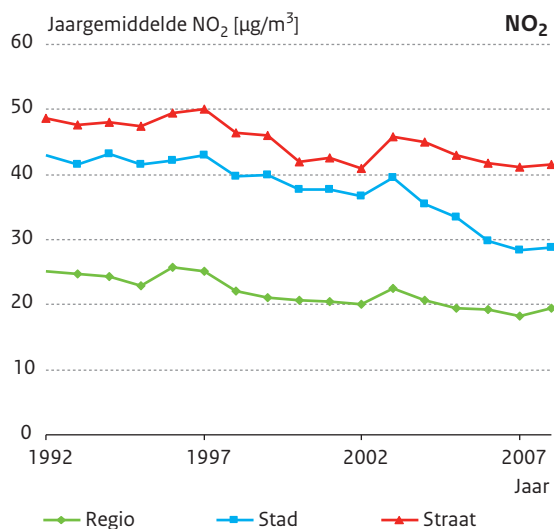
NO_x

In Nederland is de concentratie NO en in mindere mate NO₂ fors gedaald (zie Figuur 3.17). Bij stations in de stedelijk gebied is die daling groter dan bij de stations in de regio. Op straatstations is de reductie 43% over de periode 1992-2008, op verkeersbelaste stations circa 37% en op regiostations 30%.

Bij verkeersbelaste stations en stedelijke achtergrondstations volgt de NO_x-concentratie vrijwel exact de Nederlandse NO_x-emissies: een reductie met 45% over de periode 1990-2007. Dat de trend in de regiostations iets achterblijft komt door het grotere aandeel van buitenlandse bronnen, en doordat die buitenlandse bronnen minder dalen (België) dan de Nederlandse, of zelfs stijgen (Noordzee).

Wel blijft de trend in NO₂-concentraties iets achter op de trend in NO. Dat heeft twee oorzaken. Ten eerste leidt de atmosferische chemie in het grootste deel van Nederland ertoe dat reducties eerst te zien zijn in NO en veel minder in NO₂. Daarnaast is het relatieve aandeel van NO₂ in verkeersemissies toegenomen van circa 5% (midden jaren tachtig) tot circa 15% twintig jaar later door de introductie van de driewegkatalysator en door een toename van het gebruik van diesel.²⁶

Figuur 3.17 Het verloop van de jaargemiddelde stikstofdioxide en stikstofmonoxide-concentratie op de regionale en stedelijke achtergrondstations en de verkeersbelaste stations.



De Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) rapporteert voor de periode 1990-2000 een halvering van de stedelijke NO-concentraties en een afname met 20% van de NO₂-concentraties. Over de periode 2000-2007 vlakt de daling af. Voor de landelijke stations laat de periode 1990-2000 een reductie zien van 40-45% in NO en circa 20% in NO₂, terwijl daarna vrijwel geen trend meer te zien is.²⁷ Deze ontwikkeling in concentraties is in lijn met de ontwikkeling van de NO_x-emissies in Vlaanderen, Wallonië en omliggende landen.

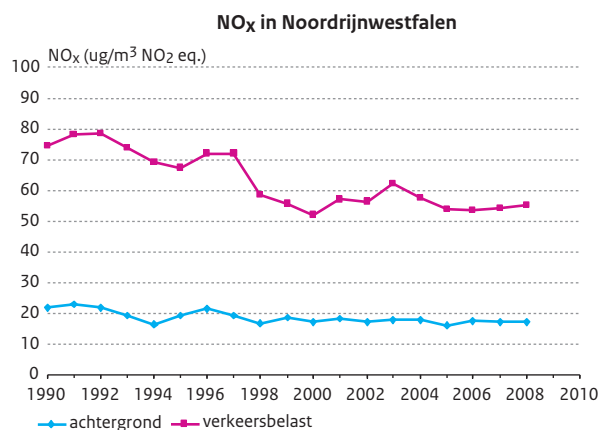
Ook in Noordrijn-Westfalen is de daling in NO_x-concentraties op de verkeerbelaste stations in de jaren negentig sterker dan daarna (zie Figuur 3.18). Een studie over alle meetstations in Duitsland bevestigt dit beeld.²⁸ De neerwaartse trend in NO is ook hier veel sterker dan de neerwaartse trend in NO₂.

NMVOS

NMVOS-metingen van alkanen, gechloroerde alkanen en aromaten laten alle sterke dalingen zien over de meetperiode van 1997-heden (Jaaroverzicht 2009).¹ Voor de ozonniveaus in Nederland zijn de koolwaterstoffen met een reactietijd van hooguit enkele uren het meest relevant. Die reactieve stoffen zitten vooral in de subgroep Zeer Vluchtige Organische Stoffen (ZVOS). Alkenen en in mindere mate aromaten zijn het belangrijkste.

ZVOS-concentraties in Nederland worden gemeten op een beperkt aantal stations, waarvan slechts enkele met een meetreeks van langer dan 10 jaar.

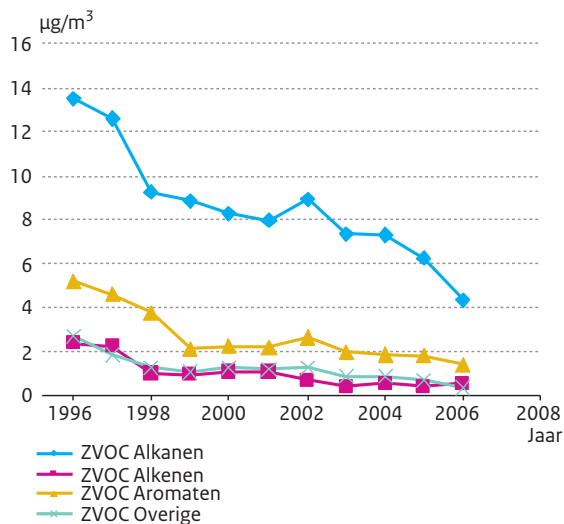
Figuur 3.18 Jaargemiddelde NO_x-concentraties in Noordrijn-Westfalen. 'Belast' is het gemiddelde van zes stations, te weten: Bielefeld, Borlen, Huerth2, Nettetel, Rodenkirchen en Wesel; 'achtergrond' is het station Eifel.



De ZVOS-concentraties in de buitenlucht zijn in de tweede helft van de jaren negentig sterk gedaald, en daarna wat minder sterk. De daling is overigens al langer geleden ingezet. Een oudere meetreeks in Moerdijk laat een daling zien vanaf 1985 en een halvering van de concentraties over de periode 1981-1999.²⁹ Dit komt goed overeen met de gerapporteerde reductie van 60% in de Nederlandse verkeersemissies over dezelfde periode.

Hoewel de ZVOS-concentraties niet alle NMVOS dekken, valt op dat zowel de NMVOS-emissies (zie Figuur 3.14.) als

Figuur 3.19 ZVOS-concentraties in Nederland.



de ZVOS-concentraties in de buitenlucht (zie Figuur 3.19.) een zeer forse daling laten zien (60-70%), vooral in de metingen tot aan circa 2000.

Voor België en Duitsland ontbreken meetreeksen van ZVOS. Van het Verenigd Koninkrijk is bekend dat de concentraties van benzeen tussen 1994 en 2008 met 60-80% zijn gedaald, met een lichte afvlakking in de

laatste jaren.³⁰ Dit komt goed overeen met de reductie van benzeenemissies met circa 65% over dezelfde periode.

CO

De CO-concentratie op de regionale achtergrondstations wordt niet alleen door de emissies uit Nederland en omringende landen bepaald, maar ook door emissies op grotere afstand. De CO-concentraties in Nederland zijn sinds 1992 (en ook al eerder) aanzienlijk gedaald (zie Figuur 3.20). De daling van de totale Nederlandse CO-emissie met circa 40% in deze periode komt goed overeen met de daling op de stedelijke achtergrondstations. De trend op de regionale stations blijft daarbij iets achter vanwege de bijdrage van een hoge hemisferische achtergrond.

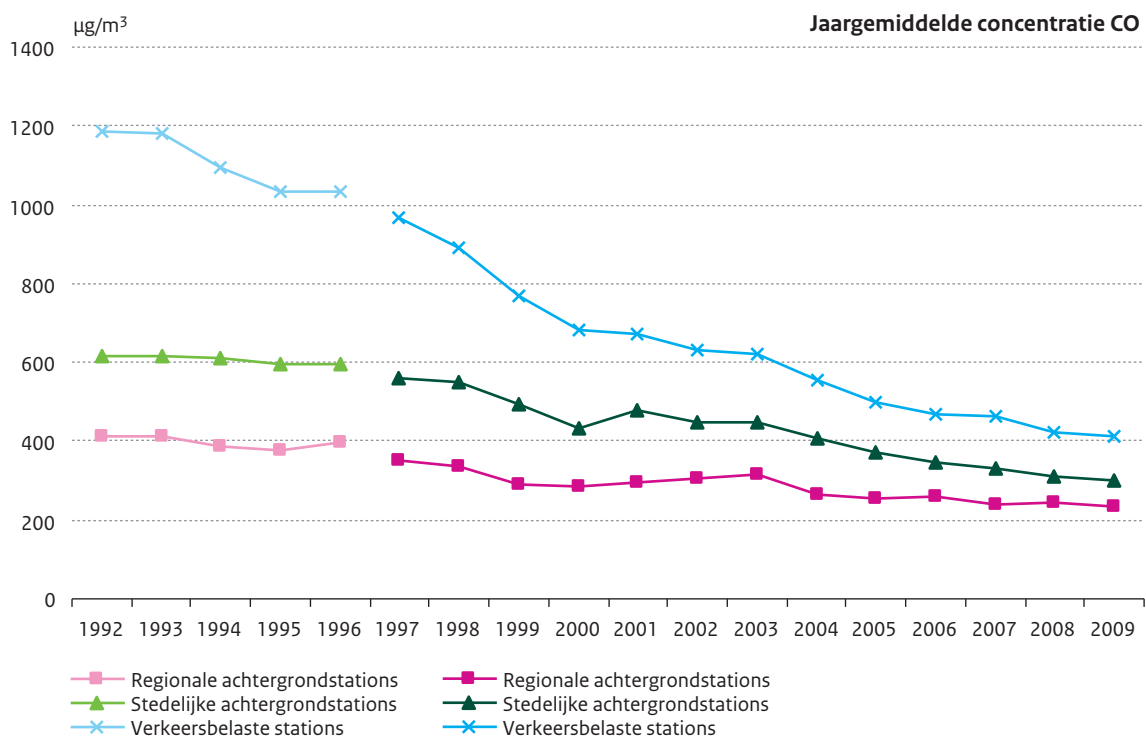
In het buitenland worden vergelijkbare reducties in de concentratie gevonden als in Nederland.

CH₄

Sinds 20-30 jaar wordt op een groot aantal plaatsen in de wereld methaan gemeten. De langste meetreeksen op uurbasis in Europa zijn die van Mace Head (Ierland, sinds 1987) en Kollumerwaard in Nederland (sinds 1991).

Door de lange verblijftijd van methaan in de atmosfeer (circa 10 jaar) zijn de concentraties buiten de nabijheid van bronnen gelijkmatig verdeeld. In 2009 was de gemiddelde concentratie op de Zuidpool 1750 ppb en was de Europese

Figuur 3.20 Ontwikkeling van de jaargemiddelde CO concentratie vanaf 1997 voor drie type stations in Nederland.



achtergrond (Atlantische Oceaan) 1880 ppb.³¹ De mondiale methaanconcentraties zijn tot begin jaren negentig met een kleine 1% per jaar gestegen. Deze stijging is sindsdien langzaam afgevlakt, en de concentraties zijn van 2000 tot 2007 nauwelijks gestegen. De laatste drie jaar is er weer sprake van een stijging, de oorzaak daarvan is nog niet bekend.³¹

De jaargemiddelde concentratie in 2009 in Kollumerwaard bedroeg 2.190 ppb, dus bijna 300 ppb hoger dan de Europese achtergrond. Iets meer dan de helft van deze verhoging is het gevolg van bijdragen van lokale bronnen (binnen een straal van circa 50 km) en de andere helft is afkomstig van bronnen in Nederland en buurlanden.³²

De jaargemiddelde concentraties zijn in Kollumerwaard vanaf 1992 vrijwel stabiel gebleven door twee tegengestelde bewegingen. De achtergrondconcentraties zijn over de periode 1992-2000 licht gestegen met zo'n 4-5 ppb/jr, wat overeenkomt met de stijging op stations als bijvoorbeeld Mace Head over dezelfde periode. Door filtering van de meetgegevens kan de bijdrage van Nederland en omliggende landen eruit gedestilleerd worden. Over de periode 1992-2000 is de bijdrage van Nederland met circa 25% gedaald, wat goed in overeenstemming is met de daling volgens de Emissieregistratie.³³

Eenzelfde analyse is voor de periode na 2000 (nog) niet uitgevoerd. Wel blijkt dat over de periode 2000-2009 de jaargemiddelde concentraties, afgezien van jaarlijkse fluctuaties, vrijwel op hetzelfde niveau zijn gebleven.

3.4 Model versus metingen

Verschillende modelstudies geven aan dat dalende emissies van de precursors van ozon gepaard gaan met stijgende jaargemiddelde ozonconcentraties in NO_x-rijke gebieden, zoals Nederland, en met een daling van de hoge ozonconcentraties.^{34,35}

De stijging in jaargemiddelden lijkt redelijk te worden bevestigd, al is dat niet kwantitatief onderzocht. Ook is die stijging niet uniform op alle stations in Europa aanwezig. Wel komen er minder lagere ozonconcentraties voor, zoals verwacht wordt door de modellen in NO_x-rijke gebieden. Analyse van de Nederlandse trends leert dat de stijging van de jaargemiddelde ozonconcentratie grotendeels voortkomt uit een daling van de NO_x-concentratie.

De voorspelde gestage verlaging van de hoge ozonconcentraties wordt niet bevestigd door metingen, want sinds midden jaren negentig is er geen duidelijke neerwaartse trend. Daarvoor is nog geen duidelijke verklaring. Ozonbevorderende weercondities, zoals een hogere temperatuur, langdurige droge omstandigheden en een stagnerende stroming, maskeren mogelijk de daling door emissiereducties.

Analyse van de extreem warme zomer van 2003, waarin ook zeer hoge ozonconcentraties werden waargenomen, liet zien dat een sterke reductie van de droge depositie (door aanhoudende droogte) een belangrijke factor was in het oplopen van de ozonconcentraties.^{35,36} Uit een studie waarin het effect van veranderingen in meteorologische condities verdisconteerd werd bleek echter dat, ook na correctie voor een meteorologisch effect, de hoge ozonconcentraties in Nederland niet noemenswaardig gedaald waren sinds 1996.³

3.5 Conclusies

- De afgelopen drie decennia zijn de hoge ozonconcentraties (ozonpieken) sterk gedaald. De laatste tien jaar is echter geen sprake meer van een duidelijke daling.
- De daling is een gevolg van het succesvolle reductiebeleid voor emissies van NO_x, NMVOS en CO in Europa. De reductie in de emissies wordt bevestigd door metingen van de concentraties van NO_x, NMVOS en CO.
- De norm ter voorkoming van nadelige effecten op de volksgezondheid, de 8-uursnorm van 120 µg.m⁻³ van de EU^c, wordt in Nederland nog op enkele plaatsen met enige regelmaat overschreden.
- Het jaargemiddelde ozonniveau over Nederland is in de afgelopen decennia gestegen, maar de laatste jaren is er geen duidelijke stijging meer. In stedelijk gebied stijgen de ozonniveaus nog steeds.
- De stijging van het jaargemiddelde ozonniveau in stedelijk gebied in Nederland is voornamelijk het gevolg van een afname van de NO_x-emissies en daarmee een afname van de titratie van ozon. Dat de achtergrondniveaus van ozon in Europa niet significant dalen is een gevolg van de mondiale toename van ozon door de hogere methaan- en CO-emissies en door een toename van het transport van ozon uit de stratosfeer.
- Het is niet duidelijk waarom na circa 2000 er geen verdere daling in de ozonpieken optreedt, terwijl de emissies van NO_x, NMVOS en CO wel verder afgenomen zijn.

^c In de EU-Luchtkwaliteitsrichtlijn (2008) staat dat dit niet vaker dan 25 dagen per jaar mag optreden.

Referenties

- 1 Mooibroek D, Beijck R, Hoogerbrugge R. Jaaroverzicht Luchtkwaliteit 2009. Rapport nr. 680704011. Bilthoven:RIVM:2009 of website www.lml.rivm.nl.
- 2 Europese Parlement en de Europese Raad een nieuwe richtlijn (2008/50/EC).
- 3 Roemer M. Are observed ozone trends in line with emission changes? Presented at EEA-EIONET workshop Brugge:29-30 september 2008.
- 4 Velders GJM, Aben JMM, Blom WF, Diederik HSMA, Geilenkirchen GP, Jimmink BA, Koekoek AF, Koelemeijer RBA, et al. Concentratiekaarten voor grootschalige luchtverontreiniging in Nederland. Rapportage 2009, PBL 500088005. Bilthoven:Planbureau voor de Leefomgeving:2009.
- 5 Beijck R, Mooibroek D, Hoogerbrugge R. Jaaroverzicht Luchtkwaliteit 2008. Rapportnummer 680704008. Bilthoven:RIVM:2008.
- 6 Logan J. Trends in Vertical Distribution of Ozone: A Comparison of Two Analyses of Ozone Sonde Data. *Journal of Geophysical Research*. 1999;104:26373-26399.
- 7 Derwent RG, Stevenson DS, Doherty RM, Collins WJ, Sanderson MG, Johnson CE. Radiative forcing from surface NOx emissions: spatial and seasonal variations. *Climatic Change*. 2008;88(3):385-401:doi 10.1007/s10584-007-9383-8.
- 8 Simmonds P, Derwent RG, Manning AL, Spain G. Significant growth in surface ozone at Mace Head, Ireland, 1987-2003. *Atmospheric Environment*. 2004;38(28):4769-4778.
- 9 Van der A RJ, Eskes HJ, Boersma KF, Van Noije TPC, Van Roozendael M, De Smedt I, Peters DHMU, Meijer EW. Trends, seasonal variability and dominant NOx source derived from a ten year record of NO2 measured from space. *J Geophys Res*. 2008;113, D04302, doi:10.1029/2007JD009021.
- 10 Andersson C, Langner J, Bergstrom R. Interannual variation and trends in air pollution over Europe due to climate variability during 1958-2001 simulated with a regional CTM coupled to the ERA40 reanalysis. *Tellus*. 2006;59B:77-98.
- 11 Scheel HE. Ozone Trends at the Mountain Sites Zugspitze and Wank. Presentation at the Tropospheric Ozone Changes Workshop Boulder (US):2009.
- 12 Claude H, Gilge S, Plass-Dülmer C, Fricke W. Long-term changes of ozone in the free troposphere and at the surface: Hohenpeissenberg and other European sites. Presentation at the Tropospheric Ozone Changes Workshop Boulder (US):2009.
- 13 Tarasova OA, Senik IA, Sosonkin MG, Cui J, Staehelin J, Prévôt ASH. Surface ozone at the Caucasian site Kislovodsk High Mountain Station and the Swiss Alpine site Jungfraujoch: data analysis and trends (1990-2006). *Atmos Chem Phys*. 2009;9:4157-4175.
- 14 Mol, W.J.A., van Hooydonk, P.R. and de Leeuw, F.A.A.M. The state of the air quality in 2008. 2010. ETC/ACC Technical paper 2010/1.
- 15 Solberg S, Horalek J, Jonson JE, Larssen S, De Leeuw F. Assessment of ground-level ozone in EEA member countries, with a focus on long-term trends. Technical report No 7/2009. EEA:2009. In: http://air-climate.eionet.europa.eu/reports/EEA_TR_7_2009_ozone_assessment
- 16 EEA. Air pollution by ozone across Europe during summer 2008 Overview of exceedances of EC ozone threshold values for April-September 2008. EEA Technical Report 2/2009. Copenhagen:Denmark:2009a.
- 17 EEA. NEC Directive status report 2008. Reporting by the Member States under Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants. EEA Technical Report 11/2009. Copenhagen:Denmark:2009b.
- 18 Guenther A, Hewitt CN, Erickson D, Fall R, Geron C, Graedel T, Harley P, Klinger L, et al. A global model of natural volatile organic compound emissions. *Journal of Geophysical Research*. 1995;100(D5):8873-8892.
- 19 Simpson D, Guenther A, Hewitt C, Steinbrecher R. Biogenic emissions in Europe 2. Estimates and uncertainties. *Journal of Geophysical Research*. 1995;vol.100(D11):22,875-22,890.
- 20 Curci G, Beekmann M, Vautard R, Smiatek G, Steinbrecher R, Theloki J, Friedrich R. Modelling study of the impact of isoprene and terpene biogenic emissions on European ozone levels. *Atmospheric Environment*. 2009;43:1445-1455.
- 21 Steinbrecher R, Smiatek G, Köble R, Seufert G, Theloke J, Hauff K, Ciccioli P. VOC emissions from natural and semi-natural vegetation for Europe and neighbouring countries in the East and South: Intra-/Inter-annual variability. *Atmospheric Environment*. 2008;43:1380-1391.
- 22 Denman KL, Brasseur G, Chidthaisong A, Ciais P, Cox PM, Dickinson RE, Hauglustaine D, Heinze C, et al. Couplings between changes in the climate system and biochemistry. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (redactie). *Climate Change 2007: the Physical Science Basis*. UK Cambridge: Cambridge University Press:2007.
- 23 RS. The Royal Society Policy document 15/08 Issued: October 2008 RS1276 ISBN:978-0-85403-713-1.
- 24 EEA. EEA Data Viewer. 2010. In: <http://dataservice.eea.europa.eu/PivotApp/pivot.aspx?pivotid=475>.
- 25 CBS. 2010. In: <http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?VW=T&DM=SLNL&PA=70946NED&D1=a&D2=0-4,10-15&D3=a&HD=100707-1452&HDR=G2&STB=T,G1>

- 26 Keuken M, Roemer M, Van den Elshout S. Trend analysis of urban NO₂ concentrations and the importance of direct NO₂ emissions versus ozone/NO_x equilibrium. *Atmospheric Environment*. 2009;43:4780–4783.
- 27 VMM. Luchtkwaliteit in het Vlaamse Gewest Jaarverslag. Immissiemeetnetten Kalenderjaar 2007. Erembodegem, België:2008.
- 28 UBA. Entwicklung der Luftqualität in Deutschland. Umwelt Bundesamt Deutschland. 2009.
In: <http://www.umweltbundesamt.de/luft/immissionssituation/idaten-hist.htm>
- 29 Roemer M. In search for trends of ozone and precursors. Rapport nr. R2001/100. Utrecht, Nederland:TNO:2001.
- 30 NPL. UK Non-Automatic Hydrocarbon Network: Annual Report for 2008. NPL REPORT AS44. Teddington, Middlesex, United Kingdom:National Physical Laboratory:2009.
- 31 WDCGG. Greenhouse gases and other atmospheric gases. WMO WDCGG Data Summary. Japan Meteorological Agency. 2010;WDCGG no.34, GAW Data vol 4.
- 32 Roemer M, Van Loon M, Boersen G. Methane emission verification on a national scale. Rapport nr. R/2000/308. Utrecht:TNO:2000.
- 33 Roemer M, Thijsse T, Van Der Meulen T. Verificatie van methaanemissies. Arena.2006.
- 34 Jonson J, Simpson D, Fagerli H, Solberg S. Can we explain the trends in European ozone levels? *Atmos Chem and Phys*. 2006;6:51–66.
- 35 Solberg S, Hov Ø, Søvde A, Isaksen I, Coddeville P, De Backer H, Foster C, Orsolini Y, Uhse K. European surface ozone in the extreme summer 2003. *Journal of Geophysical Research*. 2008;113, D07307:16 pp.
- 36 Vautard R, Honoré C, Beekmann M, Rouil L. Simulation of ozone during the August 2003 heat wave and emission control scenarios. *Atmospheric Environment*. 2005;39(16):2957–2967.

4 Ozon en klimaat

Het klimaat heeft invloed op ozon, ozon heeft invloed op het klimaat. Dit hoofdstuk beschrijft deze onderlinge wisselwerking.

4.1 Effect van klimaatverandering op ozon

Veranderingen in het klimaat kunnen gevolgen hebben voor ozon, maar veel gevolgen zijn nog onzeker.

Bij de vorming van ozonsmog spelen 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 smogvorming wordt mogelijk ook beïnvloed door veranderingen in de bewolking.

Ook is de aan- en afvoer van ozon en van de precursors van ozon afhankelijk van circulatiepatronen in de troposfeer die kunnen veranderen. In Nederland komt ozonsmog vooral voor op warme, zonnige dagen, bij zwakke wind uit oostelijke of zuidelijke richting en een blokkade van de westelijke stroming. Vervuiling blijft dan hangen en ozon kan zich ophopen, mede door aanvoer van vervuiling uit Duitsland of België. Als zulke weercondities vaker voorkomen, zullen ook smogepisodes vaker voorkomen. De huidige klimaatmodellen kunnen echter nog niet met

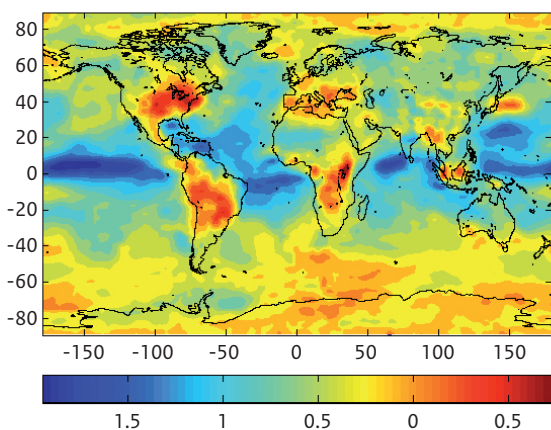
zekerheid zeggen of zulke blokkades vaker of juist minder vaak zullen voorkomen.

De meeste klimaatmodellen voorspellen dat de opwarming van de aarde de grootschalige circulatie in de stratosfeer zal versterken. Dan zal hoogstwaarschijnlijk ook de instroom van ozon vanuit de stratosfeer toenemen, wellicht met ongeveer 25% in de loop van de eeuw, ofwel een toename met ongeveer $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ozon in februari-maart.¹

Daar staat tegenover dat de afbraak van ozon in de troposfeer onder invloed van zonlicht – vooral boven tropische oceanen – sneller zal verlopen door een hogere luchtvochtigheid.

Het gecombineerde effect van de genoemde veranderingen op de ozonconcentratie aan het aardoppervlak (zie Figuur 4.1) vertoont nog relatief grote onderlinge verschillen tussen modellen. De schattingen van deze effecten zijn dus nog onzeker.

Figuur 4.1 Verandering in de jaargemiddelde ozonconcentratie (ppb; $1 \text{ ppb} \approx 2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) aan het oppervlak ten gevolge van klimaatverandering in 2030 ten opzichte van 2000. De kaart toont het gemiddelde resultaat van een groot aantal mondiale modellen, waarin de natuurlijke emissies constant zijn gehouden. Bron: Ellingsen et al., 2008.^{1,2}



¹ In deze studie zijn de modellen gedraaid met voorgeschreven methaanconcentraties. Om het effect van de versnelde methaanafbraak door hogere luchtvochtigheid en temperatuur in rekening te brengen is de methaanconcentratie met 3,6% verlaagd ten opzichte van de berekening zonder klimaatverandering.

Klimaatverandering heeft ook indirect invloed op ozon, bijvoorbeeld doordat de biogene emissies van NMVOS (zoals isopreen en terpenen) door bomen en planten veranderen, en ook de emissie van NO_x uit de bodem en de NO_x -productie in de hogere troposfeer door bliksem.

Klimaatverandering volgens het IPCC-A2-scenario³ zou tussen 2000 en 2100 een forse invloed kunnen hebben op de emissies van koolwaterstoffen als isopreen (+60%) en terpenen (+100%) en op NO_x -emissies uit de bodem (+22%).³ In onze regio zouden ozonconcentraties in juni-augustus hierdoor kunnen oplopen met $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Dit is meer dan het effect van klimaatverandering zonder veranderingen in biogene emissies, dat wordt geschat op maximaal $16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in West-Europa (zie Figuur 4.2).

Deze cijfers uit mondiale modellen worden bevestigd door regionale modellen voor Europa die het gecombineerde effect beschrijven van klimaatverandering en toename van biogene uitstoot van NMVOS. Regionale modellen hebben een hogere ruimtelijke resolutie en zijn daarom beter in staat om de kleinschalige processen te beschrijven die een rol spelen bij de vorming van ozonsmog in industriële gebieden.

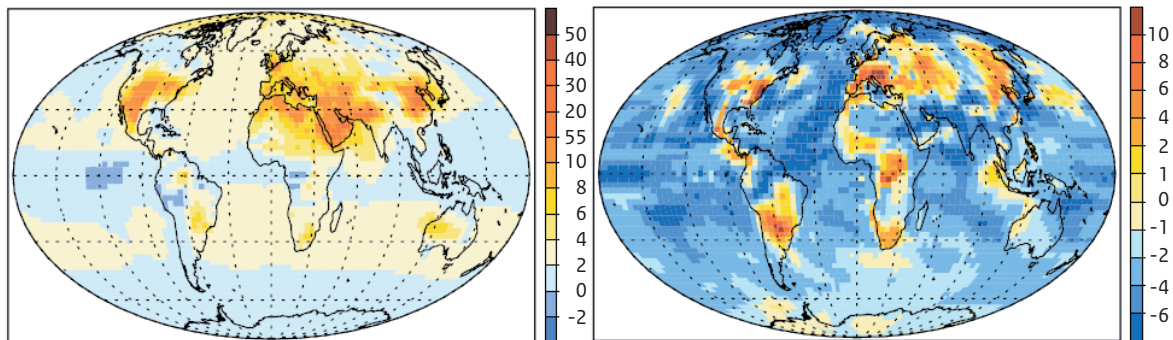
Recent⁴ zijn de regionale Europese ozonconcentraties berekend voor de laatste decennia van de eeuw. Op basis van hetzelfde IPCC-A2-scenario als hierboven gebruikt, zouden de zomerse piekwaarden in Nederland toenemen met maximaal ongeveer $32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Bij een alternatief IPCC-B2-scenario komt de groei uit op $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (zie Figuur 4.3). Die groei wordt in beide gevallen vooral toegeschreven aan de toenemende biogene emissies van isopreen. Ook de afname van de bewolgingsgraad boven grote delen van Europa en een toename van de temperatuur in de atmosferische grenslaag zullen ozonvorming in de zomer versnellen. Deze conclusies worden bevestigd door een eerdere regionale modelstudie.⁵

De modelstudies nemen tot dusverre echter niet het effect van de veranderende CO_2 -concentratie mee. Door een toename van de CO_2 -concentratie zullen de emissies van isopreen en waarschijnlijk ook die van andere koolwaterstoffen minder snel toenemen of mogelijk zelfs kunnen afnemen. De mondiale isopreen-emissies zouden door CO_2 -toename volgens het IPCC-A2-scenario zelfs kunnen halveren, wat opgeteld bij het klimaateffect netto neerkomt op een lichte afname van isopreen-emissies (-14%).⁶ Voor West-Europa betekent dit maximaal $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ozon minder, gemiddeld over de maand juli.

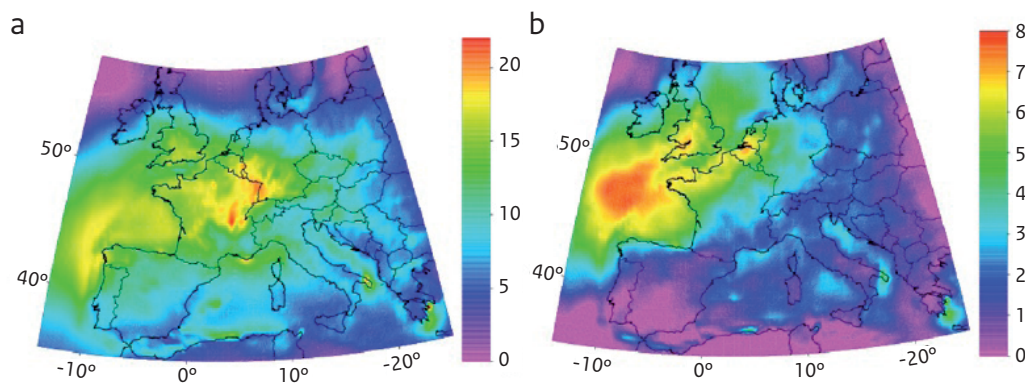
Klimaatverandering kan ook leiden tot een afname van de droge depositie van ozon. De snelheid waarmee ozon door vegetatie kan worden opgenomen neemt namelijk af door een gebrek aan bodemwater in perioden van droogte (zie ook Paragraaf 5.2.2). In Nederland zou een verminderde depositie ten gevolge van klimaatverandering (IPCC-A2-scenario) in deze eeuw kunnen leiden tot een toename van maximaal $2-4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in de dagelijkse ozonmaxima gemiddeld over de zomer.⁷ Tijdens perioden van extreme droogte kan het effect van een verminderde depositie groter zijn. Zo heeft een verminderde depositie waarschijnlijk bijgedragen aan de extreem hoge ozonconcentraties in Europa tijdens de hittegolf van augustus 2003.⁸ Een bovengrens voor dit effect is geschat door in een model de droge depositie helemaal uit te zetten in een groot deel van het Europese domein. Hierdoor namen de maximale ozonconcentraties tijdens de hittegolf toe met gemiddeld $34 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.⁹ In werkelijkheid zal het effect niet zo groot zijn, omdat een deel van de droge depositie van ozon niet via de huidmondjes van planten plaatsvindt en de depositie dus nooit helemaal zal stilvallen. Ten slotte kunnen ook de frequentie en omvang van bosbranden en natuurlijke methaanemissies veranderen. Ook de impact van deze koppelingen is nog onvoldoende bekend.

³ Zie voor beschrijving IPCC-scenarios Bijlage B.

Figuur 4.2. Verandering in de ozonconcentratie (ppb; 1 ppb ≈ 2 µg.m⁻³) in juni-augustus in 2100 ten opzichte van 2000 ten gevolge van veranderingen in biogene uitstoot (links) en ten gevolge van klimaatverandering met een 50%-toename in NO_x-productie door bliksem maar zonder veranderingen in biogene emissies (rechts). Bron: Hauglustaine et al., 2005.³



Figuur 4.3. Verschil in de gemiddelde dagelijkse piekwaarden in de ozonconcentratie aan de grond (ppb; 1 ppb ≈ 2 µg.m⁻³) in de maanden juni-september ten gevolge van klimaatverandering in 2071-2100 ten opzichte van 1961-1990: (a) Verschil tussen het A2-scenario en het huidige klimaat; (b) Verschil tussen de IPCC-A2- en -B2-scenario's. Bron: Meleux et al., 2007.⁴



4.2 Ozon als klimaatgas

Ozon werkt op twee niveaus in op het klimaat. In de *stratosfeer* heeft de mens via uitstoot van chloorfluorkoolwaterstoffen (cfk's) een negatieve invloed op de hoeveelheid ozon. Zo ontstaat jaarlijks het ozongat boven de Zuidpool. Ook heeft de afnemende ozonconcentratie in de stratosfeer een licht koelende werking op de atmosfeer. Dat komt enerzijds doordat de stratosfeer minder zonlicht absorbeert, waardoor zonlicht meer vrije doorgang heeft. De lagere stratosfeer wordt daardoor iets koeler en dan ontstaat een tweede effect: minder thermische infraroodstraling richting troposfeer.

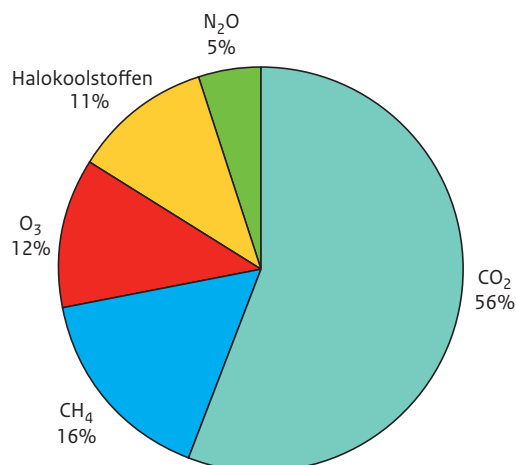
De sterkte van het effect op het klimaat geven onderzoekers aan met de term 'stralingsforcering': de verandering in de netto-instraling op de grens van troposfeer en stratosfeer (de 'tropopause'). Het meest recente rapport van het Intergovernmental Panel on Climate Change¹⁰ schat dat de netto-instraling (zon plus infrarood) door de

afname van stratosferisch ozon is gedaald met 0,05 Watt per m², met een onzekerheidsmarge van 0,10 W.m⁻². Overigens heeft het internationale Protocol van Montreal uit 1987 de uitstoot van cfk's zo ver teruggebracht dat de stratosferische ozonlaag zich naar verwachting halverwege deze eeuw zal hebben hersteld.

In de *troposfeer* neemt de ozonconcentratie juist toe, en ook dat speelt een belangrijke rol in de opwarming van de aarde. Vooral in de hogere troposfeer, waar de temperaturen laag zijn, is ozon een sterk broeikasgas.

Na kooldioxide en methaan is troposferisch ozon het belangrijkste antropogene broeikasgas (zie Figuur 4.4). Het IPCC schat de relatieve bijdrage van troposferisch ozon aan de totale stralingsforcering op 0,35 W.m⁻², ofwel 12% van het totaal. Omdat deze waarde gebaseerd is op modelberekeningen en omdat de pre-industriële ozonniveaus niet goed bekend zijn, is de onzekerheid in deze schatting echter groot. Het IPCC geeft aan dat de waarde

Figuur 4.4 De relatieve bijdrage aan de wereldgemiddelde directe stralingsforcering in 2005 ten opzichte van omstreeks 1750 van de belangrijkste antropogene broeikasgassen: kooldioxide (CO₂), methaan (CH₄), troposferisch ozon (O₃), lachgas (N₂O) en halokoolstoffen op basis van beste schattingen van het IPCC.



voor 90% betrouwbaar ligt tussen 0,25 W.m⁻² en 0,65 W.m⁻². Met die bovenwaarde zou ozon zelfs vóór methaan (0,48 ± 0,05 W.m⁻²) het belangrijkste antropogene broeikasgas na kooldioxide zijn.

In tegenstelling tot de andere broeikasgassen in Figuur 4.4, hangt de concentratie van troposferisch ozon sterk af van de locatie op het aardoppervlak, dus is de forcering van het klimaat ook regionaal afhankelijk. Modelberekeningen laten zien dat ozon het noordelijk halfrond ongeveer twee keer zo snel heeft opgewarmd als het zuidelijk halfrond.¹¹ 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, met 0,4 tot 0,5 °C. Dat komt omdat ozon daar dan slechts langzaam wordt afgebroken en vanuit Noord-Amerika, Europa en Azië wordt aangevoerd.

In bepaalde vervuilde gebieden van het noordelijk halfrond is de opwarming in de zomer lokaal meer dan 0,5 °C.¹² Dit is bijvoorbeeld het geval in delen van Noord-Amerika, in het noorden van Scandinavië en in delen van Oost-Europa en Centraal- en Oost-Azië. Vrijwel overal in West-Europa wordt de bijdrage in de zomer echter geschat op minder dan 0,3 °C, maar dit is statistisch niet significant.

Indirecte effecten

Naast deze directe bijdrage beïnvloedt ozon het klimaat ook indirect. Hoge ozonconcentraties nabij het aardoppervlak leiden namelijk tot schade aan vegetatie en tot

verminderde landbouwopbrengsten (zie Hoofdstuk 5). Daarmee verstoort ozon de opname van CO₂ in de biosfeer. De stralingsforcering door de extra hoeveelheid CO₂ die zich hierdoor in de atmosfeer bevindt wordt geschat op 0,2 tot 0,4 W.m⁻², wat vergelijkbaar is met het directe effect van troposferisch ozon.¹³

Klimaat en emissies

Voor het klimaatbeleid is het relevant te weten hoe de klimaatverandering door ozon en methaan uiteindelijk te herleiden is naar antropogene emissies. Zowel bij ozon als methaan is de stralingsforcering een optelsom van chemische reacties in de atmosfeer (zie Hoofdstuk 2).

Methaanemissies veroorzaken een wereldwijde toename van de methaanconcentratie en bevorderen daardoor de vorming van ozon op mondiale schaal. Emissies van de andere precursorgassen (CO, NO_x en NMVOS) leiden tot ozonvorming op regionale schaal, maar beïnvloeden ozon ook op mondiale schaal door hun effect op methaan. Emissies van CO en NMVOS vertragen de afbraak van methaan (door OH) in de troposfeer en verhogen daardoor de methaanconcentratie, wat leidt tot extra ozonvorming op mondiale schaal. Emissies van NO_x hebben een tegenovergesteld effect op methaan en brengen de ozonvorming op mondiale schaal juist omlaag.

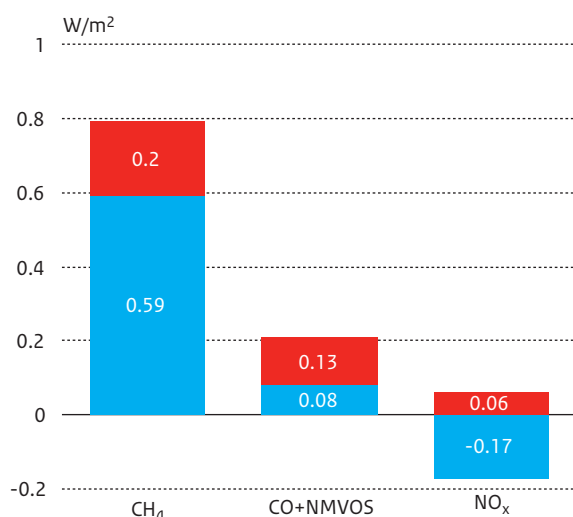
De bijdrage van CO, NMVOS en NO_x aan de stralingsforcering door ozon bestaat dus uit een positieve regionale component en een mondiale component, die positief is voor CO en NMVOS, maar negatief voor NO_x. Voor alle precursorgassen geldt echter dat hun nettobijdrage aan de wereldgemiddelde forcering door troposferisch ozon positief is (zie Figuur 4.5).

De bijdrage aan de stralingsforcering door methaan is positief voor methaan, CO en NMVOS, maar negatief voor NO_x. Deze negatieve bijdrage van NO_x aan de forcering door methaan is sterker dan de positieve bijdrage van NO_x aan de forcering door ozon (zie Figuur 4.5). Dit is het geval voor alle antropogene bronnen van NO_x behalve voor NO_x-emissies van vliegverkeer, die in hogere luchtlagen plaatsvinden.¹⁴

Antropogene emissies van methaan dragen dus sterker bij aan de opwarming van de aarde dan de directe stralingsforcering door de toegenomen hoeveelheid methaan in de atmosfeer suggereert. De invloed van antropogeen methaan wordt voor een deel gemaskeerd door de andere precursorgassen en wordt de helft van de stralingsforcering door ozon veroorzaakt door antropogeen methaan.

Concluderend schatten modelberekeningen¹⁵ de totale stralingsforcering ten gevolge van antropogene methaanemissies op 0,79 W.m⁻² (zie Figuur 4.5). Dit is 26% van de

Figuur 4.5 De bijdragen van de antropogene emissies van methaan, koolmonoxide en NMVOS en van stikstofoxiden aan de directe stralingsforcering door ozon (rood) en methaan (blauw). De totale stralingsforcering door ozon bedraagt hier $0,39 \text{ W.m}^{-2}$.¹⁵



geschatte totale stralingsforcering door broeikasgassen. Emissies van CO en NMVOS leveren samen een forcering van $0,21 \text{ W.m}^{-2}$ en emissies van NO_x een negatieve forcering van $0,11 \text{ W.m}^{-2}$.

Hieruit blijkt dat emissiereductie van methaan een effectieve manier is om de opwarming van de aarde tegen te gaan.¹⁶

Ten slotte beïnvloeden de antropogene emissies van deze gassen het klimaat ook op indirecte manieren. Stikstofdepositie bijvoorbeeld leidt tot vermisting of verzuring van de bodem en beïnvloedt daarmee de groei van vegetatie en dus de CO_2 -balans in de atmosfeer. Methaan versterkt de productie van waterdamp in de stratosfeer, wat de broeikaswerking versterkt. Sommige ozonprecursorgassen reguleren de vorming van sulfaat- en nitraataerosolen, die zowel het zonlicht direct weerkaatsen als de vorming van wolken beïnvloeden.^{17,18}

4.3 Conclusies

Klimaatverandering en ozon

- Voor Nederland is het aannemelijk te veronderstellen dat de ozonpieken zullen stijgen ten gevolge van klimaatverandering. De ozonvorming neemt namelijk toe bij hogere temperaturen, doordat de chemische reacties die leiden tot ozonvorming efficiënter verlopen en bomen en omdat planten meer isopreen gaan uitstoten. Klimaatverandering kan ook leiden tot een afname van de depositie van ozon door een minder

efficiënte opname door vegetatie tijdens perioden van droogte.

- Op basis van de huidige klimaatmodellen is niet met zekerheid te zeggen of de meteorologische condities die de vorming van ozonsmog bevorderen, in de toekomst vaker dan wel minder vaak zullen voorkomen.
- Ook is nog onzeker hoe de frequentie en omvang van bosbranden zullen veranderen en wat het gevolg daarvan is op de ozonconcentraties.
- De toename in de isopreen-emissies ten gevolge van klimaatverandering wordt gedeeltelijk of geheel gecompenseerd door de stijgende CO_2 -concentratie. Het netto-effect is niet goed bekend.

Ozon als broeikasgas

- Ozon is een belangrijk klimaatgas. Van alle antropogene broeikasgassen draagt troposferisch ozon na CO_2 en methaan het meest bij aan de opwarming van de aarde.
- De toename van troposferisch ozon sinds het begin van de industrialisatie heeft vooral sterk bijgedragen aan de opwarming van het Noordpoolgebied in de winter en lente en een aantal geïndustrialiseerde regio's in de zomer. In een groot deel van West-Europa (inclusief Nederland) is de bijdrage van ozon aan de opwarming relatief klein geweest.
- De klimaatforcering door ozon wordt voor ongeveer de helft veroorzaakt door antropogene emissies van methaan. Aangezien methaan zelf een belangrijk broeikasgas is, is het reduceren van methaanemissies daarom een effectieve manier om de opwarming van de aarde tegen te gaan.

Referenties

- 1 Collins WJ, Derwent RG, Garnier B, Johnson CE, Sanderson MG, Stevenson DS. Effect of stratosphere-troposphere exchange on the future tropospheric ozone trend. *J Geophys Res.* 2003;108(D12):8528.
- 2 Ellingsen K, Gauss M, Van Dingenen R, Dentener FJ, Emberson L, Fiore AM, Schultz MG, Stevenson DS, et al. Global ozone and air quality: a multi-model assessment of risks to human health and crops. *Atmos Chem Phys Discuss.* 2008;8:2163-2223.
- 3 Hauglustaine DA, Lathière J, Szopa S, Folberth GA. Future tropospheric ozone simulated with a climate-chemistry-biosphere model. *Geophys Res Lett.* 2005;32:L24807, doi:10.1029/2005GL024031.
- 4 Meleux F, Solmon F, Giorgi F. Increase in summer European ozone amounts due to climate change. *Atmos Environ.* 2007;41:7577-7587.
- 5 Langner J, Bergström R, Foltescu V. Impact of climate change on surface ozone and deposition of sulphur and nitrogen in Europe. *Atmos Environ.* 2005;39:1129-1141.
- 6 Young PJ, Arneth A, Schurgers G, Zeng G, Pyle JA. The CO₂ inhibition of terrestrial isoprene emission significantly affects future ozone projections. *Atmos Chem Phys.* 2009;9:2793-2803.
- 7 Andersson C, Engardt M. European ozone in a future climate: Importance of changes in dry deposition and isoprene emissions. *J Geophys Res.* 2010;115:D02303, doi:10.1029/2008JD011690.
- 8 Vautard R, Honoré C, Beekmann M, Rouil L. Simulation of ozone during the August 2003 heat wave and emission control scenarios. *Atmos Environ.* 2005;39:2957-2967.
- 9 Solberg S, Hov Ø, Søvde A, Isaksen ISA, Coddeville P, De Backer H, Foster C, Orsolini Y, Uhse K. European surface ozone in the extreme summer 2003. *J Geophys Res.* 2008;113: D07307, doi:10.1029/2007JD009098.
- 10 IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (redactie). Groot-Brittannië en New York, NY, Verenigde Staten:Cambridge:Cambridge University Press:2007.
- 11 Mickley LJ, Jacob DJ, Field BD, Rind D. Climate response to the increase in tropospheric ozone since preindustrial times: A comparison between ozone and equivalent CO₂ forcings. *J Geophys Res.* 2004;109:D05106, doi:10.1029/2003JD003653.
- 12 Shindell D, Faluvegi G, Laci A, Hansen J, Ruedy R, Aguilar E. Role of tropospheric ozone increases in 20th-century climate change. *J Geophys Res.* 2006;111:D08302, doi:10.1029/2005JD006348.
- 13 Stitch S, Cox PM, Collins WJ, Huntingford C. Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink. *Nature.* 2007;448:791-794.
- 14 Wild O, Prather MJ, Akimoto H. Indirect long-term global radiative cooling from NO_x emissions. *Geophys Res Lett.* 2001;28:1719-1722.
- 15 Shindell DT, Faluvegi G, Bell N, Schmidt GA. An emissions-based view of climate forcing by methane and tropospheric ozone. *Geophys Res Lett.* 2005;32:L04803, doi:10.1029/2004GL021900.
- 16 Hansen J, Sato M, Ruedy R, Laci A, Oinas V. Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario. *Proc Natl Acad Sci.* 2000;97:9875-9880.
- 17 Unger N, Shindell DT, Koch DM, Streets DG. Cross influences of ozone and sulfate precursor emissions changes on air quality and climate. *Proc Natl Acad Sci.* 2006;103:4377-4380.
- 18 Shindell DT, Faluvegi G, Koch DM, Schmidt GA, Unger N, Bauer SE. Improved attribution of climate forcing to emissions. *Science.* 2009;326:716, doi:10.1126/science.1174760.

5 Effecten van ozon

Ozon heeft sterk oxiderende chemische eigenschappen, vandaar dat ozon effect heeft op mens, vegetatie en materialen. De effecten kunnen acuut zijn, zoals ademhalingsklachten bij de mens of necrose van bladeren bij hoge ozonconcentratie, maar ook bij chronische blootstelling aan lagere concentraties kunnen gevolgen optreden. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van effecten, van zowel acute als chronische blootstelling aan ozon op mens en vegetatie. Over de effecten van ozon op materialen is weinig (kwantitatieve) informatie beschikbaar, daarom zijn deze effecten hier verder niet beschouwd.

5.1 Effecten op de mens

Het onderzoek naar de gezondheidseffecten van luchtverontreiniging maakt meestal onderscheid tussen blootstelling aan tijdelijk verhoogde concentraties van luchtverontreiniging, op een tijdschaal van uren, dagen of weken, en jarenlange blootstelling aan verhoogde concentraties van luchtverontreiniging. In het eerste geval wordt gekeken naar acute effecten op ziekte en sterfte, in het laatste naar chronische effecten.

Door de aard en snelheid waarmee ze optreden laten de acute effecten zich relatief eenvoudiger onderzoeken. In de wetenschappelijke literatuur zijn dan ook meer onderzoeken beschikbaar naar de acute gezondheidseffecten dan naar effecten door langdurige blootstelling. Dat

geldt ook voor ozon, waar relatief weinig wetenschappelijke kennis bestaat over de gevolgen van langdurige blootstelling.¹

Het toeschrijven van gezondheidseffecten aan één specifieke component in een mengsel van luchtverontreinigende stoffen is meestal lastig. Onder invloed van het weer stijgen en dalen de concentraties van de afzonderlijke componenten vaak min of meer tegelijk. Dat maakt het moeilijk om de afzonderlijke acute invloeden van componenten statistisch te onderscheiden. Bij ozon ligt dit echter iets anders. Ozon wordt in de atmosfeer gevormd onder invloed van zonlicht en hoge temperatuur, en daarom hangen veranderingen in het ozonniveau meestal minder sterk samen met veranderingen in de concentratie van andere componenten. Effecten van ozon kunnen daardoor sneller worden onderscheiden. Daarnaast leent ozon zich beter dan bijvoorbeeld fijn stof voor experimenten in een laboratorium om het causale verband tussen ozon en gezondheid te onderzoeken. Uit het laboratorium weten we nu dat ozon en fijn stof verschillende reacties oproepen en in sommige gevallen elkaar versterken bij aantasten van de gezondheid.²

5.1.1 Acute effecten

Ademhaling

Van oudsher staan de luchtwegen centraal in het onderzoek naar acute effecten van ozon. Sinds het toxicologi-

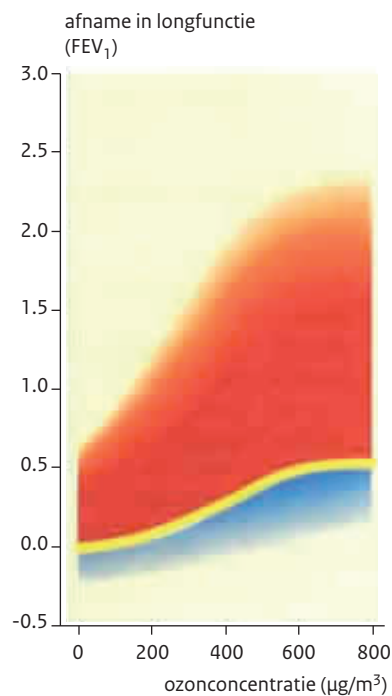
sche en klinische onderzoek bij mensen in de jaren 70 en 80 van de vorige eeuw weten we dat ozon een sterk oxidatief gas is dat tijdelijke schade kan veroorzaken aan de luchtwegen van proefdieren en vrijwilligers. De toegepaste ozonconcentraties in deze onderzoeken weken niet veel af van de concentraties die in de buitenlucht daadwerkelijk kunnen optreden. Effecten werden niet alleen gevonden bij mensen met gevoelige luchtwegen, zoals astmapatiënten. Dat wil niet zeggen dat iedereen even gevoelig is: sommige mensen blijken juist sterker te reageren op ozon dan anderen, maar dat hangt dus niet samen met het hebben van astma of andere aandoeningen. Verder bleek voor sommige effecten, zoals een tijdelijke vermindering van de longfunctie, na herhaalde blootstelling adaptatie op te treden. Maar voor ontstekingsreacties in de longen is dit niet gevonden. Experimenteel onderzoek laat bovendien zien dat ozon invloed heeft op stoffen die de bloeddruk reguleren.³ Wel geldt dat er andere deeltjes aanwezig moeten zijn om dit effect te veroorzaken.⁴ Nader epidemiologisch onderzoek naar de acute cardiovasculaire effecten van ozon zou dit effect kunnen bevestigen.

Als vervolg op dit onderzoek onder laboratoriumomstandigheden ontstond in de jaren tachtig van de vorige eeuw steeds meer aandacht voor het epidemiologisch onderzoek naar effecten van ozon onder natuurlijke omstandigheden bij zowel gezonde mensen als mensen met luchtwegaandoeningen. Vooral het zogenaamde panelonderzoek heeft veel kennis opgeleverd. Daarbij hielden deelnemers dagboekjes bij over luchtwegklachten en werden dagelijks de longfuncties gemeten.

Ook onder natuurlijke omstandigheden leiden verhoogde ozonconcentraties tot een tijdelijke afname van de longfunctie. Omdat dit effect sterk verschilt van persoon tot persoon, ondervindt de een wel en de ander geen klachten bij gelijke blootstelling (zie Figuur 5.1). Zoals vermeld zijn personen met bestaande luchtwegaandoeningen niet per se gevoeliger voor ozon dan gezonde personen⁵, maar door de reeds slechtere longwerking loopt deze groep wel meer risico's.

Veel epidemiologisch onderzoek in dit kader is uitgevoerd in de Verenigde Staten (VS), maar ook in Nederland is in de jaren 80 en 90 veel onderzoek gedaan, vooral onder groepen schoolkinderen en in een enkel geval bij leden van een sportvereniging.^{5,7} De Nederlandse onderzoeken bevestigden de acute gezondheidseffecten door ozon in de buitenlucht. Uit toxicologisch onderzoek bleek verder dat mensen die een specifiek detoxificatie-enzym missen gevoeliger kunnen zijn voor ozon. Ook bleek dat een nakomeling van een moeder die gevoelig is voor ozon, zelf ook enigszins gevoeliger is.

Figuur 5.1: Variabiliteit van de individuele longfunctierespons na ozonblootstelling. Longfunctierespons is uitgedrukt in Forced Expiratory Volume in één seconde (FEV₁): de in de eerste seconde na maximale inademing zo snel mogelijk uitgeademde hoeveelheid lucht; dit is een maat voor luchtwegvernauwing. Gemiddeld is er sprake van een afname in de longfunctie bij hogere ozonniveaus, maar de respons varieert van sterk (rode gebied) tot zwak (blauw). (Bron: Devlin et al, 1997).⁶



Onder andere Nederlands onderzoek⁸ beschrijft ook dat het aantal spoedopnames in ziekenhuizen voor vooral respiratoire aandoeningen na dagen met relatief hoge ozonconcentraties toeneemt.

Hart- en vaatziekten

Er zijn nog niet veel studies gedaan naar acute effecten van ozon op hart- en vaatziekten en naar ziekenhuisopnames wegens hart en bloedvaten, eenduidige conclusies zijn dan ook nog niet mogelijk. Ook de meest recente studies op dit gebied laten geen eenduidige conclusie toe over een duidelijke relatie tussen blootstelling aan ozon en effecten op het hart- en vaatsysteem.⁹

Sterfte

De eerste studies naar het verband tussen ozon en dagelijkse sterfte vonden plaats vanaf begin jaren negentig van de vorige eeuw. Dit soort onderzoek voor ozon was aanvankelijk beperkt, want de aandacht in de wetenschappelijke literatuur ging destijds veel meer uit naar de relatie tussen fijn stof en sterfte. Omdat die kennis nu redelijk aanwezig is, krijgt ozon de laatste jaren weer meer aandacht.¹⁰

Tabel 5.1 Geschatte aantal sterfgevallen door ozon en PM10 in Nederland tijdens de zomers 2000, 2002 en 2003¹⁴

Periode	Geschatte aantal sterfgevallen door ozon	95% betrouwbaarheidsinterval	Geschatte aantal sterfgevallen door PM ₁₀	95% betrouwbaarheidsinterval
Juni – augustus 2000	990	700 - 1260	1290	640 - 1930
Juni – augustus 2002	1140	820 - 1460	1380	690 - 2060
Juni – augustus 2003	1400	1000 - 1780	1460	730 - 2180
Extra 2003 vs 2000	410	380 - 450	160	70 - 260
Extra 2003 vs 2002	250	220 - 290	80	-20 - 180

Opvallend is dat dagelijkse concentraties ozon niet alleen verband houden met sterfte door aandoeningen aan de luchtwegen, maar ook met sterfte door aandoeningen aan hart en bloedvaten. Dit effect is ook gevonden bij deeltjesvormige luchtverontreiniging. Dit heeft geleid tot het inzicht dat effecten van luchtverontreiniging zich niet beperken tot de luchtwegen, maar dat ook andere organen kunnen worden aangetast.

Sterfte door ozon tijdens een hittegolf

Tijdens een hittegolf blijkt het effect van luchtverontreiniging op sterfte sterker dan op andere zomerse dagen. Zo werd in Griekenland tijdens de hittegolf in 1987 een sterk verband gevonden tussen luchtverontreiniging ('smoke', zwaveldioxide en ozon) en mortaliteit op dagen met temperaturen boven 30 °C.¹¹ Dat gold ook voor ozon en sterfte in België in 1994, vooral bij mensen ouder dan 65 jaar.^{12,13} Het is speculatief, maar een verslechterde conditie ten gevolge van de hittestress zou bij vooral ouderen een oorzaak kunnen zijn.

De laatste hittegolven in Europa waren in 2003 en 2006. Volgens het CBS waren er in Nederland in de periode juni–augustus 2003 ongeveer 1.000 tot 1.400 meer sterfgevallen dan in dezelfde periode in zomers zonder een hittegolf. CBS schreef de extra sterfte volledig toe aan hoge temperaturen. Tijdens een hittegolf nemen echter ook de concentraties ozon en fijn stof (PM₁₀) toe. RIVM en IRAS schatten destijds dat 30% van de oversterfte in 2003 aan de verhoogde luchtverontreiniging toegeschreven zou kunnen worden, in het bijzonder aan ozon (zie Tabel 5.1).¹⁴ Deze schatting is vergelijkbaar met een soortgelijke berekening voor Engeland en Wales, die 21–38% van de oversterfte tijdens de hittegolf toeschreef aan luchtverontreiniging.¹⁵

Deze bevindingen rechtvaardigen maatregelen en gedragsadviezen om blootstelling aan luchtverontreiniging te verminderen, vooral tijdens hittegolven en bij ouderen.

5.1.2 Effecten na langdurige blootstelling aan ozon

Ziekte

Herhaalde en langdurige blootstelling aan hoge ozonniveaus kan leiden tot onherstelbare longschade. Ook kan chronische hoge blootstelling leiden tot een vorm van astma. Maar door het ontbreken van voldoende experimenteel en epidemiologisch onderzoek bestaat nog weinig kennis over gezondheidseffecten van chronische blootstelling aan ozon bij niveaus zoals die in de buitenlucht voorkomen. Er is bijvoorbeeld een gebrek aan goede schattingen van de ozonblootstelling aan de hand van langetermijnmetingen of modellen.

De effecten van langetermijnblootstelling kunnen onderverdeeld worden in vroege 'markers' van ziektes en het ontstaan van astma.

Vroege markers van ziektes

Een marker of voorteken van luchtwegziekten is een verlaagde longfunctie of het onvoldoende ontwikkelen van de luchtwegen. Enkele Amerikaanse studies hebben het verband onderzocht tussen longfunctiewaarden van populaties en langdurige blootstelling aan ozon in de buitenlucht, maar kunnen daaruit nog geen consistent beeld concluderen waaruit een grenswaarde voor de lange termijn kan worden bepaald.^{16,17,18,19,20} De resultaten sluiten echter ook niet uit dat er nadelige effecten op de gezondheid kunnen optreden na langdurige blootstelling aan ozon bij de huidige concentraties.

Soortgelijke studies naar situaties in Nederland of Europa zijn nog minder in aantal. Nader onderzoek naar het ontstaan van luchtwegaandoeningen en chronische ozonblootstelling zou daarvoor nodig zijn.

Ontstaan van astma

Ook over chronische blootstelling en astma komt de meeste wetenschappelijke informatie uit Amerikaanse studies. Hoewel de blootstelling aan ozon en het ontstaan van astma met elkaar in verband zijn gebracht, is de wetenschappelijke kennis nog te beperkt om nu al

vergaande conclusies te trekken. Recente Amerikaanse studies, waarbij de relatie tussen het voorkomen van astma en de blootstelling aan ozon onderzocht is, lieten wisselende resultaten zien en gaven geen nieuwe inzichten met betrekking tot de rol die ozonblootstelling aan het ontstaan van astma heeft.⁹

Sterfte

Het aantal studies dat verricht is naar de rol van langdurige blootstelling van een populatie aan ozon en sterfte is aanmerkelijk minder dan het aantal studies dat dagelijkse schommelingen in de ozonconcentraties heeft gerelateerd aan dagelijkse sterftestatistieken. Uit een recent overzicht van de US-EPA⁹ over onder meer studies over de effecten van langdurige blootstelling aan ozon, blijkt dat er vooralsnog geen harde conclusies kunnen worden getrokken over de aan- of afwezigheid van effecten op de sterfte. Wel lieten twee recente publicaties van omvangrijke epidemiologische studies^{21,22} effecten op sterfte ten gevolge van hart- en vaatziekten en luchtwegaandoeningen zien. Vanwege het belang van deze twee studies (populatiegrootte, blootstellingsschattingen, statistische analysetechnieken) wordt voor de duiding van de mogelijke gezondheidseffecten van langdurige blootstelling aan ozon sterker rekening gehouden met effecten op sterfte.

5.1.3 Omvang van de gezondheidseffecten

Voor 2008 wordt het aantal vroegtijdige sterfgevallen door ozon in Nederland geschat op circa 1300 mensen (zie Tabel 5.2 en Figuur 5.2). De inschatting van de gezondheidseffecten door concentraties van fijn stof of ozon is gebaseerd op de methodiek beschreven in twee Nederlandse studies (Hoek et al. 1997; Vonk en Schouten, 1998).^{23,24} Voor sterfte ten gevolge van luchtwegaandoeningen ligt dit cijfer op circa 170 en voor sterfte ten gevolge van hart- en vaataandoeningen op circa 350.

Overigens kan het schatten van aantallen vroegtijdige sterfgevallen en hun oorzaken gemakkelijk leiden tot verkeerde interpretaties²⁵ wanneer men zich niet realiseert dat het gaat om de term 'vroegtijdig'. Het verlagen van de ozonconcentraties zal op korte termijn tot minder sterfte leiden, maar het gaat uiteraard enkel om uitstel. De winst zit in een toename van de gemiddelde levensduurverwachting door schonere lucht. De gezondheidsmaat 'gewonnen (gezonde) levensjaren' heeft dan meer betekenis. Maar voor die berekening ontbreken nu nog de gegevens over de effecten van langdurig lagere blootstelling.

In Figuur 5.2 staat het verloop van de jaarlijkse sterfte door ozon in de afgelopen 15 jaar weergegeven. Ter illustratie staat tevens het verloop van het geschatte jaarlijkse aantal

Tabel 5.2 Geschatte aantallen vroegtijdige sterfgevallen door ozon in 2008.

		Totaal Nederland	waarvan ozon ^{1) 3) 4)}
		aantal mensen	
Alle oorzaken		129.721	1290 (860 – 1.720)
waarvan	Luchtweg- aandoeningen	13.789	170 (0 – 330)
	COPD ²⁾	6303	110 (20 – 200)
	longontsteking	5465	120 (20 – 220)
	hart- en vaataandoeningen	39.964	350 (130 – 580)

¹⁾ Uitgaande van een daggemiddelde 8-uurs ozonconcentratie (van 12 tot 20 uur).

²⁾ Chronic Obstructive Pulmonary Disease, hieronder vallen chronische bronchitis en longemfyseem.

³⁾ Tussen haakjes staan de onder- en bovengrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval.

⁴⁾ Ten gevolge van statische variatie in de effectschattingen tellen de attributieve doodsoorzaak van de specifieke sterfgevallen niet noodzakelijkerwijs meer bij het geschatte totaal aantal attributieve sterfgevallen.

overledenen aan fijn stof vermeld. Voor een juiste interpretatie van de figuur wordt verwezen naar de opmerkingen in de vorige paragraaf.

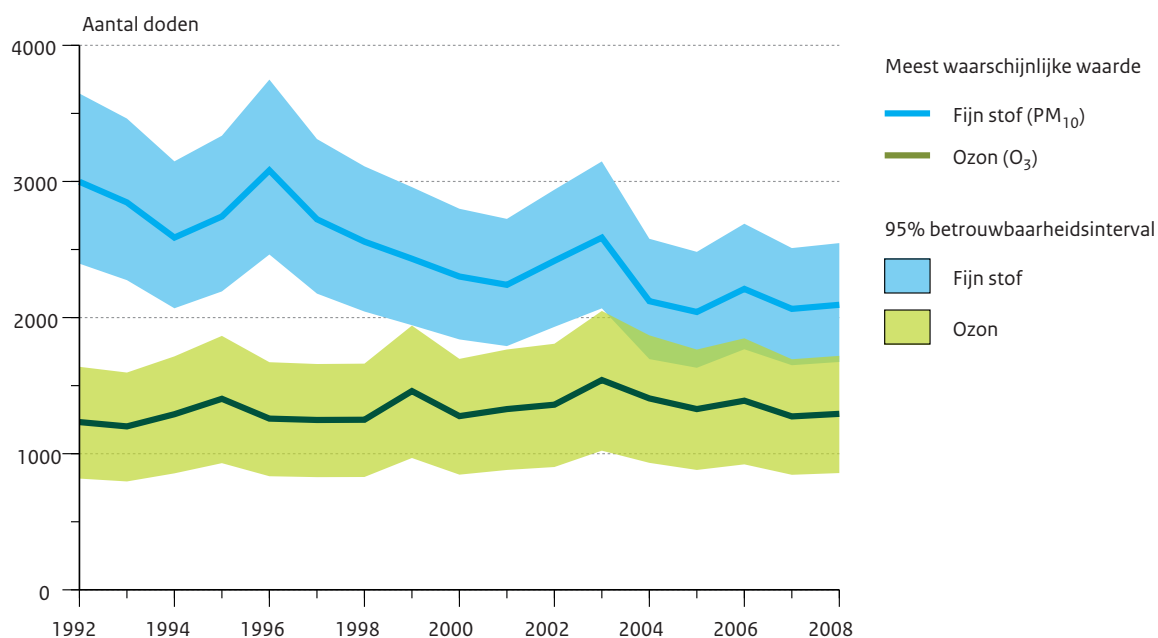
In tegenstelling tot de gestage daling in de fijn stof gerelateerde sterfte gedurende de afgelopen tien jaar, is er geen soortgelijke daling opgetreden in de ozon-gerelateerde sterfte. Gemiddeld over de gehele periode zijn er jaarlijks circa 1300 aan ozon-gerelateerde sterfgevallen. Belangrijkste redenen van de trends in Figuur 5.2 zijn de jaarlijkse meteorologische omstandigheden (dit geldt met name voor het geschatte aantal ozongerelateerde doden) en de trends in de luchtverontreinigingsniveaus. De effectiviteit van het fijn stof beleid is in de figuur duidelijk te herkennen, terwijl ook blijkt dat ten aanzien van ozon nauwelijks positieve gezondheidseffecten waarneembaar zijn.

Langdurige blootstelling en gevolgen voor de verkorting van de levensduur

De eerste studies naar chronische blootstelling en sterfte vergelijken sterftcijfers in verschillende steden in de VS en betrekken daarbij verschillen in langetermijnluchtverontreiniging. De meeste aandacht ging aanvankelijk naar deeltjesvormige luchtverontreiniging, maar recent is ook de rol van chronische blootstelling aan ozon voor de sterftcijfers in deze populaties onderzocht.

De resultaten van deze studies duiden er op dat mensen in gebieden met relatief hoge ozonconcentraties een kortere

Figuur 5.2 Sterfte door fijn stof en ozon van 1992-2008.



Bron: RIVM.

PBL/jan10/0340
www.compendiumvoordeleefomgeving.nl

levensduurverwachting hebben. Voor deeltjesvormige luchtverontreiniging was dit al langer bekend, maar de meest recente inzichten wijzen dus ook op een onafhankelijke invloed van ozon. Het effect van langdurige blootstelling aan ozon op sterfte lijkt zich te beperken tot sterfte door luchtwegaandoeningen, er is geen invloed op sterfte aan hart- en vaatziekten gevonden²¹. Op basis van de blootstellings- responsrelatie die is gepubliceerd in de studie van Jerrett wordt duidelijk dat de discussie over een drempelwaarde voor effecten bij langdurige blootstelling aan ozon vooralsnog niet eenduidig beantwoord kan worden. In een persoonlijke communicatie bevestigen de onderzoekers hieraan zelf ook meer aandacht te willen besteden alvorens gefundeerde uitspraken hierover te kunnen doen.

De kennis omtrent de chronische belasting door ozon is des te belangrijker naarmate piekconcentraties dalen en het gemiddelde ozonniveau nauwelijks daalt of zelfs stijgt.

5.1.4 Gezondheidskundige normen en advieswaarden

WHO-richtwaarden

Bovenstaande kennis heeft uiteindelijk geleid tot het vaststellen van een richtwaarde door de WHO voor de maximale gemiddelde ozonconcentratie op een dag (gemeten over de 8 uur waarop die concentratie het hoogst is) en de bijbehorende gezondheidseffecten (zie Tabel 5.3).

Tabel 5.3 Ernst van de gezondheidseffecten bij verschillende ozonconcentraties.

	Dagelijks maximum 8-uurs gemiddelde	Effecten behorend bij het vermelde ozon niveau
Hoog	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Ernstige gezondheidseffecten, bij aanzienlijk deel van de gevoelige bevolking
WHO-interim doelstelling 1	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Belangrijke gezondheidseffecten, een tussenliggend doel voor populaties met huidige ozon niveaus boven dit niveau. Verschafft echter onvoldoende bescherming voor de bevolking. Rationale: <ul style="list-style-type: none"> • Blootstellings niveau waarbij onder laboratoriumomstandigheden effecten bij jonge volwassen vrijwilligers na inspanning effecten op de luchtwegen zijn aangetoond • Buitenluchtniveau waarbij bij kinderen gezondheidseffecten zijn gevonden • Geschatte 3 – 5% extra dagelijkse sterfte* (op basis van tijdserie studies)
WHO Luchtkwaliteit Richtlijn	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Dit niveau verschaft voldoende adequate bescherming voor de volksgezondheid, alhoewel sommige gezondheidseffecten ook beneden dit niveau niet kunnen worden uit gesloten. Rationale: <ul style="list-style-type: none"> • Geschatte 1 – 2% extra dagelijkse sterfte* (op basis van tijdserie studies) • Extrapolatie van laboratorium en veld studies en rekening houdend met herhaalde blootstelling onder natuurlijke omstandigheden en gevoelige populaties in de totale bevolking • Mogelijkheid dat ozon tevens een marker is voor andere oxidanten in het luchtverontreinigingsmengsel

* Aantal sterfgevallen door ozon concentraties boven een geschatte baseline van 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Gebaseerd op een range van 0.3 tot 0.5% toename in dagelijkse sterfte per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 8-uur gemiddelde ozon.

Bron: WHO, 2006²⁶

EU-streefwaarde voor de bescherming van de mens

De Europese streefwaarde voor blootstelling van de bevolking aan hoge ozonconcentraties bedraagt 120 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ voor de hoogste 8-uursgemiddelde ozonconcentratie per dag. Deze waarde, vastgesteld in 2002, is bij de revisie van de EU-normen ondanks de WHO-richtlijn van 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ uit 2006, nog steeds van kracht. Deze concentratie mag vanaf 2010, gemiddeld over drie jaar, niet vaker dan 25 dagen per kalenderjaar worden overschreden. De doelstelling voor de lange termijn is dat de hoogste 8-uursgemiddelde ozonconcentratie op geen enkele dag in een kalenderjaar meer boven de 120 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ komt. Wetenschappelijke onderbouwing van de gekozen richtwaarde is, bij gebrek aan voldoende studies over de gezondheidseffecten van langdurige blootstelling aan ozon, volledig gebaseerd op informatie uit studies die waren gericht op de acute effecten van kortdurende blootstelling aan verhoogde ozon niveaus.

Voor scenarioberekeningen hanteren de EU en de UNECE regelmatig een maat voor de blootstelling die uitgaat van het aantal dagen per jaar met een 8-uursgemiddelde ozonconcentratie boven 35 ppb (de zogenaamde SOMO₃₅: Sum Of Means Over 35 ppb; 35 ppb komt overeen met circa 70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).²⁷ Hierbij neemt men aan dat er op de andere dagen geen gezondheidseffecten optreden, of dat deze zo onzeker zijn dat ze te onbetrouwbaar zijn voor scenarioberekeningen. Met deze methodiek komt het aantal vroegtijdige sterfgevallen in de buurt van de 400, hetgeen aanzienlijk lager is dan de schatting van 1300 sterfgevallen die in Nederland gehanteerd wordt. Er is echter geen wetenschappelijke onderbouwing voor deze aanname. Op basis van het epidemiologische onderzoek is er geen reden om van een ozonconcentratie uit te gaan die zou kunnen worden beschouwd als een zogenaamde 'drempelwaarde', dus een waarde waar beneden geen nadelige gezondheidseffecten optreden. Voor de eerder gepresenteerde effectschattingen, uit Tabel 5.2 wordt

daarom bij acute effecten uitgegaan van het concept dat elke toe- of afname van de ozonniveaus zal leiden tot gezondheidsverlies of –winst. Beleidsmatig impliceert dit dat (net als bij deeltjesvormige luchtverontreiniging) elke inspanning ter verlaging van de ozonniveaus zal leiden tot gezondheidswinst.

Op dit moment zijn er geen Europese normen voor jaargemiddelde concentraties van ozon. Er zijn nog onvoldoende wetenschappelijke gegevens om tot een verantwoorde keuze voor zulke normen te komen.

5.1.5 Conclusies

- De blootstelling van mensen aan kortdurende hoge ozonconcentraties (ozonpieken) leidt tot schade aan de luchtwegen en tot hart- en vaatziekten. Deze kunnen leiden tot ziekenhuisopnames en vroegtijdige sterfte.
- Als gevolg van blootstelling aan ozonpieken sterven in Nederland jaarlijks circa 1.300 mensen vroegtijdig.
- De gevolgen van ozonpieken voor de gezondheid van mensen zijn goed gedocumenteerd. Mede op grond daarvan zijn (inter-)nationale normen vastgesteld voor kortdurende blootstelling.
- De norm gesteld door de WHO is aanzienlijk strenger dan die door de EU in de Air Quality Directive (dagelijkse maximum 8-uursconcentratie kleiner dan $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ versus 25 dagen overschrijding toegestaan van de dagelijkse maximum 8-uursconcentratie van $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Door het ontbreken van voldoende experimenteel en epidemiologisch onderzoek bestaat nog weinig kennis over gezondheidseffecten van chronische blootstelling aan ozon.
- Epidemiologisch onderzoek geeft vooralsnog geen aanleiding om uit te gaan van een zogenaamde 'drempelwaarde' voor ozon, dus een concentratiewaarde waar beneden geen nadelige gezondheidseffecten optreden. Met name voor de effecten van chronische blootstelling is hierover nog discussie onder wetenschappers gaande. Er is nog onvoldoende wetenschappelijke basis voor een norm die gebaseerd is op het jaargemiddelde.
- Voor het beleid betekent dit dat (net als bij deeltjesvormige luchtverontreiniging) elke inspanning ter verlaging van de ozonniveaus zal leiden tot gezondheidswinst.
- Scenariostudies (UNECE en EU) hanteren een effectparameter waarin een drempelwaarde van $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ wordt aangehouden waaronder geen effect van ozon verwacht wordt. Inschattingen gebaseerd op deze parameter zijn dus als conservatief te beschouwen.
- Aangezien te verwachten is dat de ozonconcentraties in stedelijke omgeving nog zullen stijgen, zal de blootstelling van mensen aan ozon in stedelijke omgeving toenemen.

5.2 Effecten op vegetatie

Als ozon in contact komt met planten en bomen kan dat ernstige effecten veroorzaken.²⁸ Het blad kleurt bruin of er ontstaan witte stippen, de groei vertraagt en zelfs afsterven kan plaatsvinden. Economisch is dat nadelig, want gewassen worden minder aantrekkelijk voor de consument of hun opbrengst neemt af. Ecologisch gezien beïnvloedt ozon de samenstelling en het functioneren van het ecosysteem, wat ernstige gevolgen kan hebben voor de biodiversiteit. Omdat ozon ook de groei van bossen kan aantasten, ondervindt ook de mondiale koolstofcyclus invloed. Dit hoofdstuk schetst de effecten op vegetatie en het ecologische risico van ozon.

5.2.1 Effecten op plantniveau

Biobeschikbaarheid

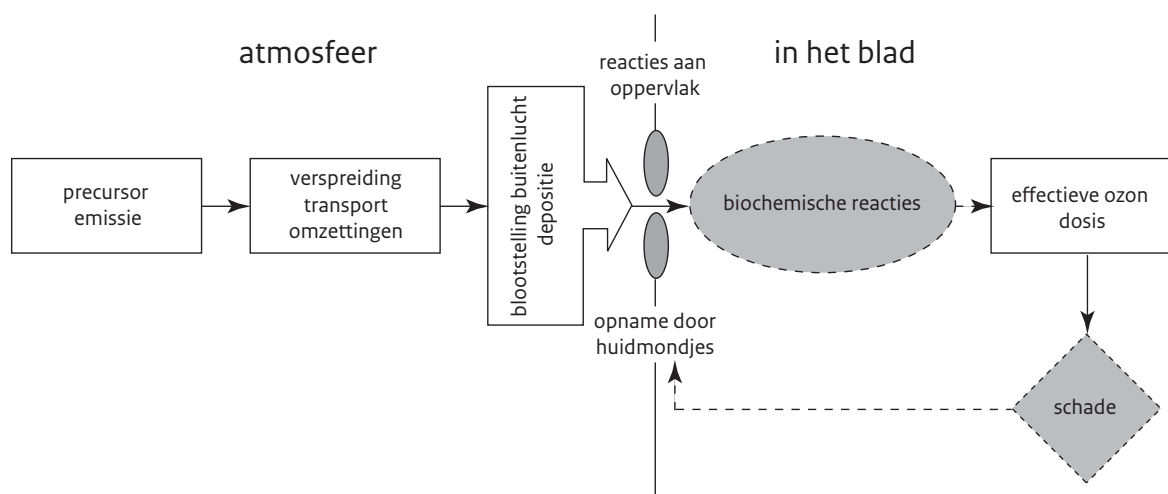
Het toxische effect van ozon op planten wordt in hoge mate bepaald door de zogenoemde 'biobeschikbaarheid' van ozon in de plant. Ozon volgt hierbij drie routes: (i) in de atmosfeer, (ii) van buiten naar binnen via het bladoppervlak en (iii) in de ruimte binnen het blad (zie Figuur 5.3). Ozon in de atmosfeer kan direct reageren met het bladoppervlak, maar in de meeste gevallen oefent de stof zijn schadelijke werking uit in het innerlijk van de plant, de substomatale holte. Daar vindt uitwisseling plaats van gassen (voornamelijk koolzuur en zuurstof, maar ook ozon) tussen de lucht en de plantencellen.

Transport van buiten naar binnen gaat via de huidmondjes (stomata). In het innerlijk van de plant kan ozon eerst een scala van oxidatiereacties ondergaan, waardoor een effectieve ozondosis ontstaat waaraan het innerlijk van de plant wordt blootgesteld.^{28,29,30}

De effectieve ozondosis hangt af van de plantensoort en van de omstandigheden waarin de plant verkeert. Zo hangt de opening van huidmondjes af van de luchtvochtigheid en van de beschikbaarheid van water, maar ook van de aanwezigheid van ozon zelf.^{29,31,32} Enkele belangrijke omgevingsfactoren bepalen de gasuitwisseling via de huidmondjes: de instraling van de zon (bladtemperatuur), de temperatuur van de lucht, het dampdrukverschil tussen binnen- en buitenzijde van de plant, de CO_2 -concentratie in de atmosfeer, de bodemwaterpotentiaal en de fysiologische toestand van de plant.³³ Bij droogte kunnen planten de huidmondjes gesloten houden, waardoor minder verdamping plaatsvindt, maar ook geen ozonopname.^{34,35,36,37}

Ter indicatie: de geleidbaarheid van huidmondjes in soja kan tussen twee momenten van irrigatie halveren. Ook kan waterverzadigde kleigrond een zuurstoftekort in het wortelstelsel veroorzaken, waardoor de geleidbaarheid van de huidmondjes met 90% gereduceerd kan worden. Ook verzilt grondwater of irrigatie met verzilt water beïnvloedt de geleidbaarheid van de huidmondjes, terwijl

Figuur 5.3 Schematische voorstelling van factoren die bepalend zijn voor een eenvoudige risicobeoordeling. Zie tekst voor uitleg.²⁹



dat ook de synthese van vrije antioxidanta bevordert en daarmee de werking van ozon tegengaat.³⁸

Detoxificatie

Na opname door de huidmondjes komt ozon in het plantenweefsel terecht, waar 'detoxificatie' of neutralisatie kan plaatsvinden die de oxiderende werking van het ozonmolecuul teniet doet. Dit verdedigingsmechanisme hangt af van het vermogen van de plant om te detoxificeren met de antioxidanten die normaal altijd al in de plant aanwezig zijn.³⁹ Een voorbeeld van zo'n natuurlijk antioxidant is ascorbaat. De detoxificatie hangt af van de genetische achtergrond, de relatieve gezondheidstoestand, het ontwikkelingsstadium en de beschikbaarheid van voedingsstoffen.

Effecten van ozon worden vaak pas zichtbaar na blootstelling gedurende enige tijd. Bij lage concentraties in de atmosfeer zijn de effecten later merkbaar dan bij hogere concentraties. De momentane ozonconcentratie van de stof in de lucht is in de praktijk dan ook geen goede maat voor de risico's die vegetatie loopt. Een betere blootstellingsmaat is de 'accumulated ozone exposure over threshold 40 ppb' (AOT40), wat de som is van de overschrijding van de uurgemiddelde ozonconcentratie boven 40 ppb ($80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{uur}$) tussen 8 en 20 uur gedurende een nader omschreven periode. In de EU-richtlijn wordt hier de periode van mei tot en met juli (het groeiseizoen) aangehouden. Voor bossen wordt in de UNECE de periode april tot en met september gebruikt (AOT40f).

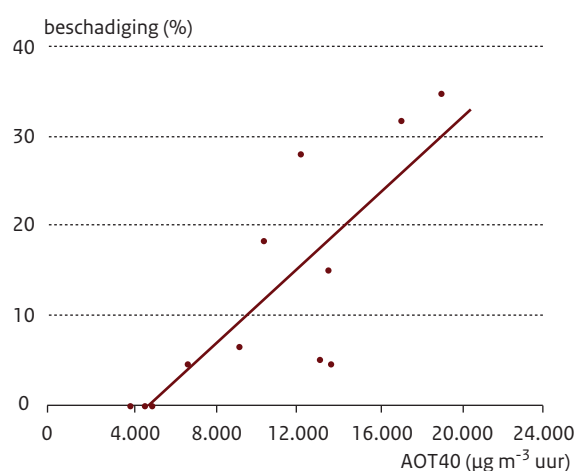
Blootstelling

Veel effectmetingen vinden plaats in zogenaamde *open top chambers*, waarin planten in directe verbinding staan met de buitenlucht. Door het toevoegen van ozon aan de lucht,

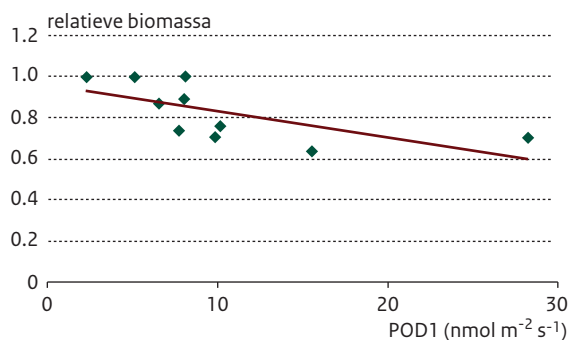
in verschillende concentraties, kan de dosis-effectrelatie worden vastgesteld. De opzet kan tamelijk eenvoudig in het veld worden ingericht. Daardoor zijn ook andere parameters, zoals bijvoorbeeld luchtvochtigheid, in overeenstemming met de omstandigheden in het veld. Op deze manier is ozonschade aangetoond bij een groot aantal gewassen.

Dosis-effectrelaties voor de blootstelling van planten aan ozon laten vaak zien dat een effect pas optreedt boven een bepaalde drempel (zie Figuur 5.4). Die drempel geldt ook voor beoordeling van ozonschade als functie van de hoeveelheid ozon die daadwerkelijk de plant binnendringt, oftewel de ozonflux. Deze flux heeft de dimensie $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. De schade wordt gerelateerd aan een dosis,

Figuur 5.4. Optreden van ozonschade na blootstelling boven een drempelwaarde ($1 \text{ nl l}^{-1} = 1 \text{ ppb}$) Bladschade komt pas voor als de blootstelling (AOT40) $6.000 \mu\text{g m}^{-3} \text{ uur}$ is of hoger.⁴⁰



Figuur 5.5 Opbrengstverlies van klaver bij toenemende POD⁴¹ (POD in nmol m⁻² s⁻¹).



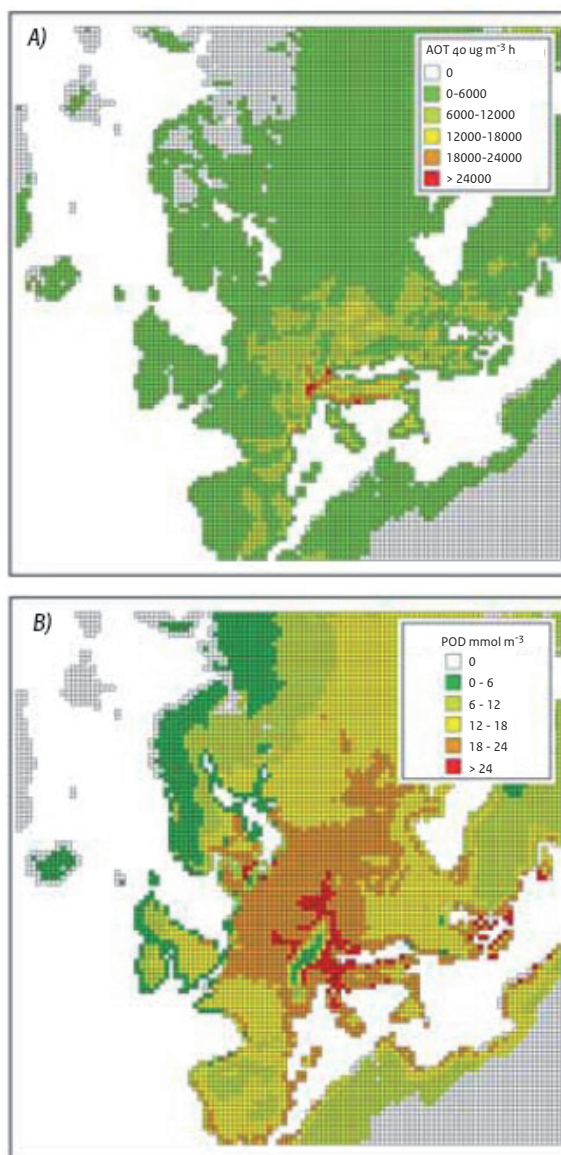
de POD_x ('Phytotoxic Ozone Dose'), als gevolg van ozonfluxen boven een drempel van $x \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en heeft de dimensie nmol m^{-2} . Figuur 5.5 toont de afname in opbrengst van klaver in relatie tot de berekende ozondosis POD 1, dat wil dus zeggen de opgenomen hoeveelheid ozon bij fluxen boven een waarde van $1 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Opbrengstverlies trad in het onderzoek van Figuur 5.5 op boven een dosis van ongeveer 5 nmol m^{-2} . In de praktijk worden vaak ook flux-drempelwaarden van 3 of $6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ gehanteerd.

Er bestaan diverse methoden om de ozonflux door de huidmondjes te meten. Meestal gebeurt dit door direct aan het blad gasuitwisseling te meten. Binnen de UNECE bestaat een afspraak⁴² voor het gebruik van een gemeenschappelijke methode⁴³ die resultaten in de verschillende lidstaten reproduceerbaar en vergelijkbaar maakt. Meting van de ozonflux kan slechts incidenteel plaatsvinden. In de praktijk zal deze berekend moeten worden. Voor een inschatting van de optredende flux bij bepaalde ozonconcentraties in de atmosfeer en bepaalde andere milieuomstandigheden (temperatuur, luchtvochtigheid, detoxificatie, etc.) is een groot aantal fysische, chemische en biochemische parameters nodig die het ozontransport vanuit de atmosfeer het blad in beschrijven.^{44,45,46,47} Deze zijn niet altijd beschikbaar waardoor een fluxberekening en diens gevolg de bepaling van een effectveroorzakende POD onzekerheden kent. Om deze reden bestaat binnen de UNECE de wens om naast de POD ook de AOT₄₀ als blootstellingsparameter aan te houden.

In Figuur 5.6 staan de beide ozonindicatoren, AOT en POD, voor Europa uitgezet. Het beeld bij de fluxbenadering (POD) is verschillend van de dosisbenadering (AOT) met name in Midden- en Noord-Europa. De opname van ozon is niet evenredig hoger bij de hogere ozonconcentraties in Zuid-Europa en daarmee het effect minder is dan verwacht. Dat komt omdat in Zuid-Europa vaak drogere weersomstandigheden voorkomen waardoor planten hun

Figuur 5.6 Blootstelling van gewassen aan ozon met behulp van AOT (A) en de ozonflux POD (weergegeven met AF, accumulated flux) (B).⁴⁸ Figuur A situeert de hoogste risico's in delen van Italië; figuur B toont gebieden met relatief hoog risico in Midden-Europa, Zuid-Scandinavië en de Griekse eilanden.



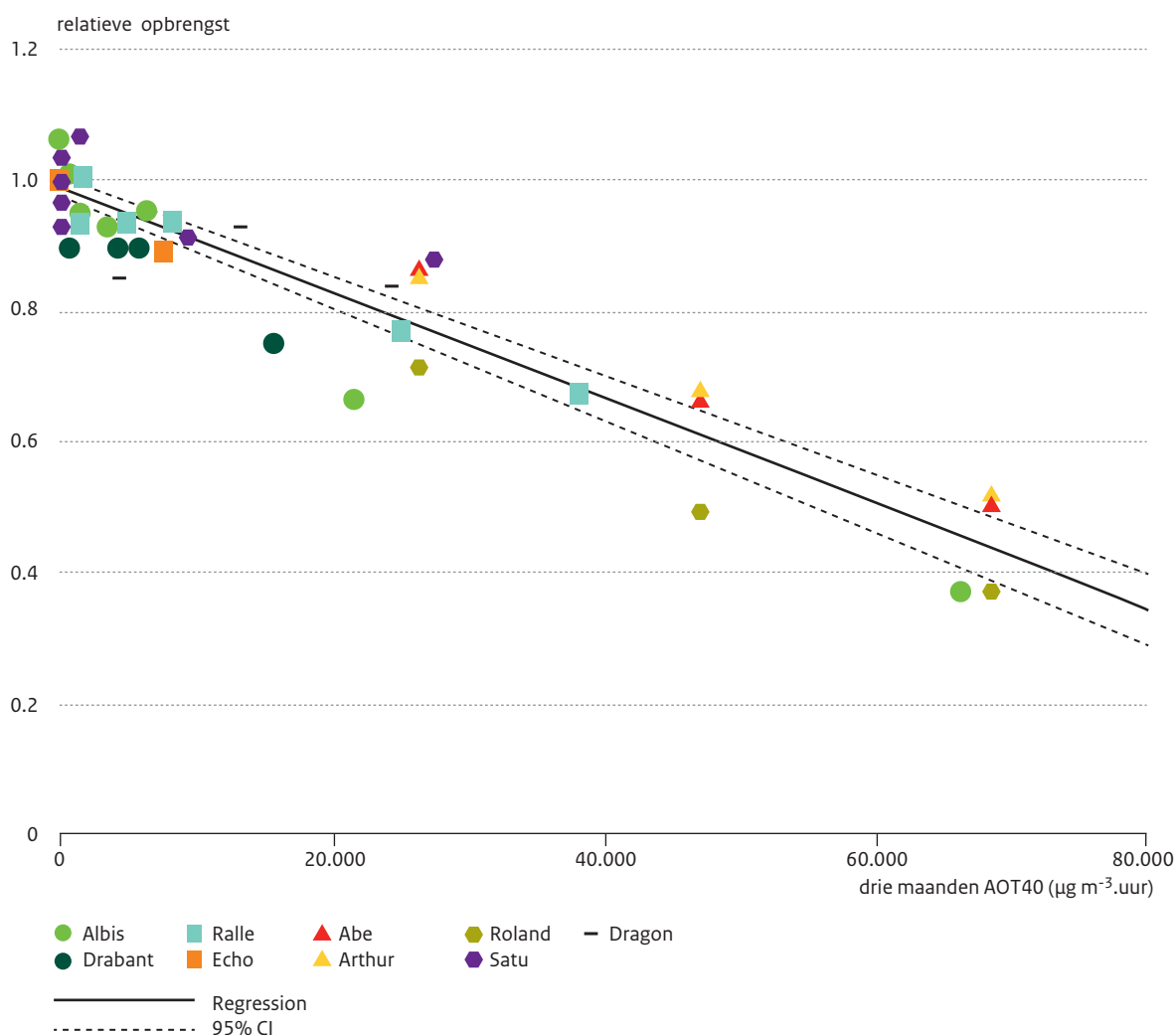
huidmondjes gaan sluiten en er dus minder of geen ozon opgenomen wordt.

5.2.2 Effecten op gewas en ecosysteemniveau

Gewassen

Van veel commercieel belangrijke gewassen is de gevoeligheid voor ozon bekend.⁴⁹ Zo bestaat een groot aantal dosis-responscurves (zie Figuur 5.7).

Figuur 5.7 Voorbeeld van een dosis-response curve voor tarwe.⁵⁰



Het onderscheid tussen gevoelige, gematigd gevoelige en resistente gewassen kan worden gemaakt door kritieke niveaus voor AOT₄₀ te formuleren waarbij 5% reductie van de opbrengst wordt verwacht. Voor de zeer gevoelige watermeloen bedraagt dat kritieke niveau 3.400 µg.m⁻³.uur (gedurende 3 maanden), voor het relatief ongevoelige gerst 175.000 µg.m⁻³.uur. De langetermijn EU-streefwaarde (6.000 µg.m⁻³.uur) zou de watermeloen niet beschermen, terwijl gerst zelfs bij de hogere streefwaarde voor 2010 (18.000 µg.m⁻³.uur) geen probleem zou zijn. Naast de nadelige invloed van ozon op de opbrengst per hectare, heeft ook zichtbare schade aan een gewas implicaties voor de verkoopbaarheid.⁵¹ De schade door ozon aan landbouwgewassen in 2000 in de EU is geschat op 6,7 miljard euro.⁵² Voor Nederland werd die geschat op 155 miljoen euro. In deze studie werd bij voortzetting van huidige beleid in Nederland een schade in 2020 van ongeveer 97 miljoen euro per jaar verwacht.

Het effect van ozon op landbouwgewassen op mondiale schaal zou in 2000 een economische schade van \$ 14 – 26 miljard hebben veroorzaakt, grotendeels bij de verbouw van tarwe, soja en rijst in China en India.^{53,54} Voor 2030 verwacht men een verdere verslechtering van de opbrengst voor tarwe en rijst in vooral India, terwijl de schade voor soja en tarwe in Europa en China kleiner wordt.

Deze berekeningen zijn nog exclusief de eventuele schade van ozon via plagen en ziekten en de verdringing door onkruiden.^{55,56} Hierover zijn weinig gegevens beschikbaar.

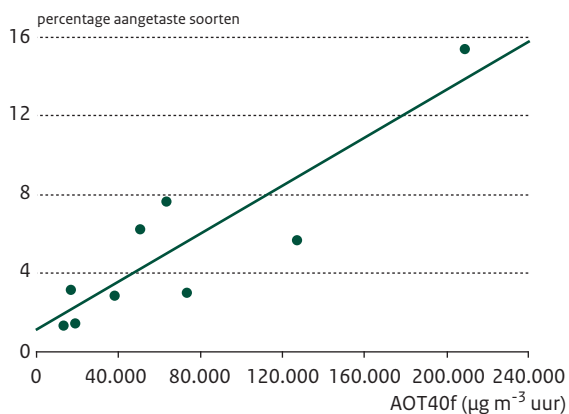
Bossen

Er is veel bekend over de zichtbare schade die ozon kan aanbrengen aan bomen. Daarnaast zijn studies gedaan naar de invloed van ozon op bomen als 'sink' of opslag van koolstof, in het kader van CO₂-problematiek en klimaatverandering.^{57,58} Als gevolg van de huidige ozonconcentra-

ties wordt geschat dat de CO₂-opslag door bossen 7% lager ligt dan aan het eind van de 19e eeuw. De opnamevermindering zou kunnen oplopen tot 17% aan het eind van deze eeuw.

Het ICP Forests-programma van UNECE meet al jarenlang stelselmatig de effecten van grensoverschrijdende luchtverontreiniging op bossen. Tot dusver heeft dit onderzoek incidentele waarnemingen opgeleverd van schade bij hoge ozonconcentraties.⁵⁹ Een voorbeeld daarvan is de toename van symptomen van ozonschade bij toenemende ozonconcentratie in een bosperceel (zie Figuur 5.8).

Figuur 5.8 Toename van bosschade bij toenemende AOT40 (ICP Forests, 2008).⁵⁹



Jonge bomen lijken gevoeliger voor ozon dan volgroeide bomen. Ook competitie en de ontstaansgeschiedenis van jonge bomen, de aanwezigheid van planteneters en ziekteverwekkers spelen een rol bij het overleven van ozonstress door bosvegetatie.^{59,59,60}

Natuurlijke graslanden

Natuurlijke graslanden kennen een hoge diversiteit aan biologisch leven dat voor natuurbehoud van belang is. Juist deze natuurlijke variatie maakt het moeilijk om veranderingen in opbrengst en soortensamenstelling door ozon te vinden.^{61,62,63} Er lijkt niettemin sprake van een lagere opbrengst en een verandering in de dominantie van soorten door ozon.²⁹

Bodem

Ozon heeft een nadelige invloed op het wortelstelsel van de plant. Vanwege de interactie met het bodemleven beïnvloedt dit naar verwachting ook het functioneren en de soortensamenstelling van het bodemecosysteem. Er is sprake van effect op chemische en microbiologische processen in de bodem, zoals decompositie van plantenmateriaal.^{64,65}

De aantasting van het wortelstelsel kan de koolstofcyclus in de bodem beïnvloeden. Bij gebrek aan gemakkelijk

afbreekbare koolstofverbindingen in de bodem kan het microbiële leven de meer 'lastige' koolstofverbindingen gaan afbreken. Dit kan de textuur van de bodem ernstig beïnvloeden. Daarnaast kan ozon ook direct een chemische reactie aangaan met koolstof in de bodem.^{66,67}

5.2.3 Effect van weersomstandigheden

Klimaatverandering en een toenemend achtergrondniveau van ozon kunnen leiden tot een hogere cumulatieve blootstelling.²⁹ Dat effect kan echter ook niet los worden gezien van de aanpassing van de planten aan een veranderend klimaat. Bij warmere en drogere omstandigheden zullen planten hun waterhuishouding anders reguleren, met onder andere een lagere openingstoestand van de huidmondjes. De directe reactie met het bladoppervlak gaat dan een relatief grotere rol spelen, terwijl de effecten van ozon in het blad juist afnemen. Als een hogere temperatuur niet gepaard zou gaan met drogere omstandigheden van lucht en bodem, dan kan de gevoeligheid van planten voor ozon ook toenemen. Er zijn echter nog grote onzekerheden rond de invloed van klimaatverandering op de biogeochemie, waardoor ozon bijvoorbeeld de carbon-sink-functie van bossen kan beïnvloeden.^{68,69}

Een andere onzekerheid is dat gedurende de verschillende ontwikkelingsstadia van een plant de ozongevoeligheid kan variëren. Zo is de respons van overblijvende gewassen op de gemiddelde voorjaarstemperatuur significant hoger dan van eenjarige gewassen. Hierdoor kan het groeiseizoen vervroegen, waardoor het moment van de hoogste gevoeligheid voor ozon en de ozonpieken gedurende de warmste maanden van het jaar niet meer samenvallen.

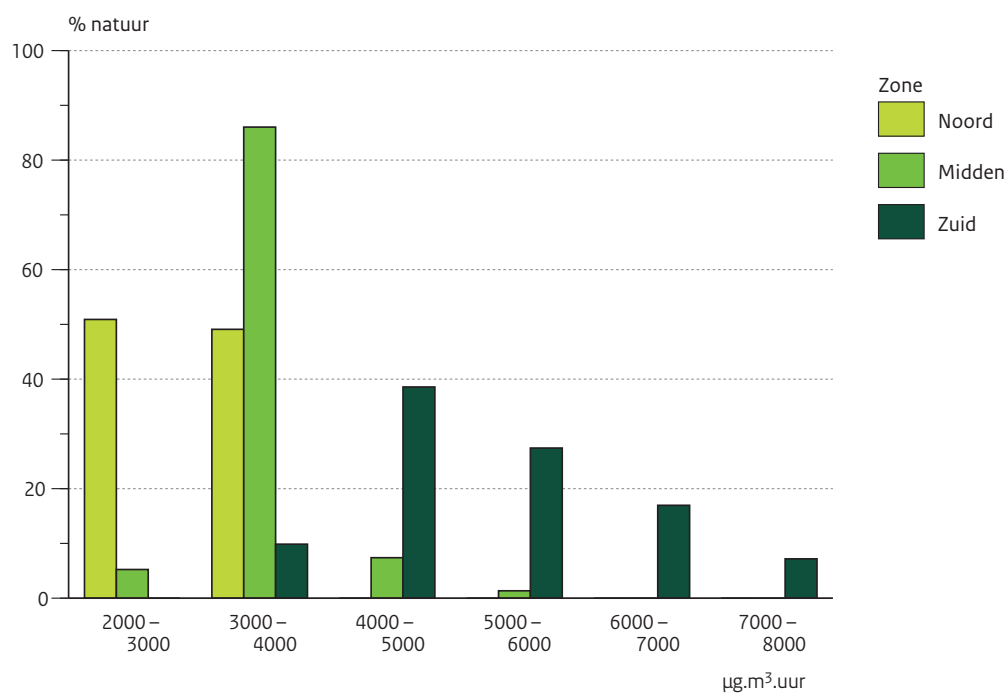
5.2.4 Effecten van stikstof

Terwijl ozon een nadelig effect kan hebben op de plantengroei, wordt deze juist door stikstof in de bodem bevorderd. Reactief stikstof in de lucht wordt beschouwd als verontreiniging, onder andere omdat verhoogde stikstofconcentraties de biodiversiteit kunnen aantasten. Het gecombineerde effect van ozon en stikstof is complex.

Ozon kan het wortelstelsel van de plant aantasten waardoor zich relatief meer bovengrondse biomassa per plant kan ontwikkelen. Ook stikstof heeft een positief effect op de bovengrondse biomassa doordat meer en grotere bladeren groeien. Daarmee neemt het contactoppervlak tussen plant en ozon toe en ook de flux door huidmondjes. Tegelijkertijd kan stikstof het plantenmetabolisme versterken, waardoor de detoxificatie van ozon in de plant sterker kan worden.

Bij zandzegge, een plant met lange wortels die voorkomt op zandgronden, vertonen bladeren door ozon vervroegde verouderingsverschijnselen. Stikstof zorgt ervoor dat dit pas bij hogere concentraties gaat plaatsvinden, maar

Figuur 5.9 Blootstelling van de natuur aan ozon, 2009.



Bron: PBL/RIVM.

PBL/sep10/0240
www.compendiumvoordeleefomgeving.nl

verhindert niet het negatieve effect op het wortelstelsel.⁷⁰ Ook bij bomen is dit effect gevonden, waardoor zij mogelijk minder bestand zijn tegen droogte en storm.⁵⁵⁻⁷¹

5.2.5 Risicobeoordeling voor Nederland

De norm voor de blootstelling van vegetatie is gebaseerd op de AOT₄₀.⁷² De EU-streefwaarde voor AOT₄₀ voor 2010 is 18.000 µg.m⁻³.uur, met een langetermijndoelstelling van 6.000 µg.m⁻³.uur. Alleen de ozonconcentraties in mei tot en met juli, tussen 8 en 20 uur Midden Europese Tijd (MET), tellen mee.

Het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit laat door de jaren heen aanzienlijke fluctuaties zien in de berekende AOT₄₀ (zie Figuur 3.3). Het voortschrijdend gemiddelde over vijf jaar nam af in de periode 1995 – 2000 en stabiliseert na 2000 rond 8.000 µg.m⁻³.uur. Zoals al aangegeven in Hoofdstuk 3 is dit lager dan de streefwaarde voor 2010 (18.000 µg.m⁻³.uur), maar boven de langetermijndoelstelling van 6.000 µg.m⁻³.uur.

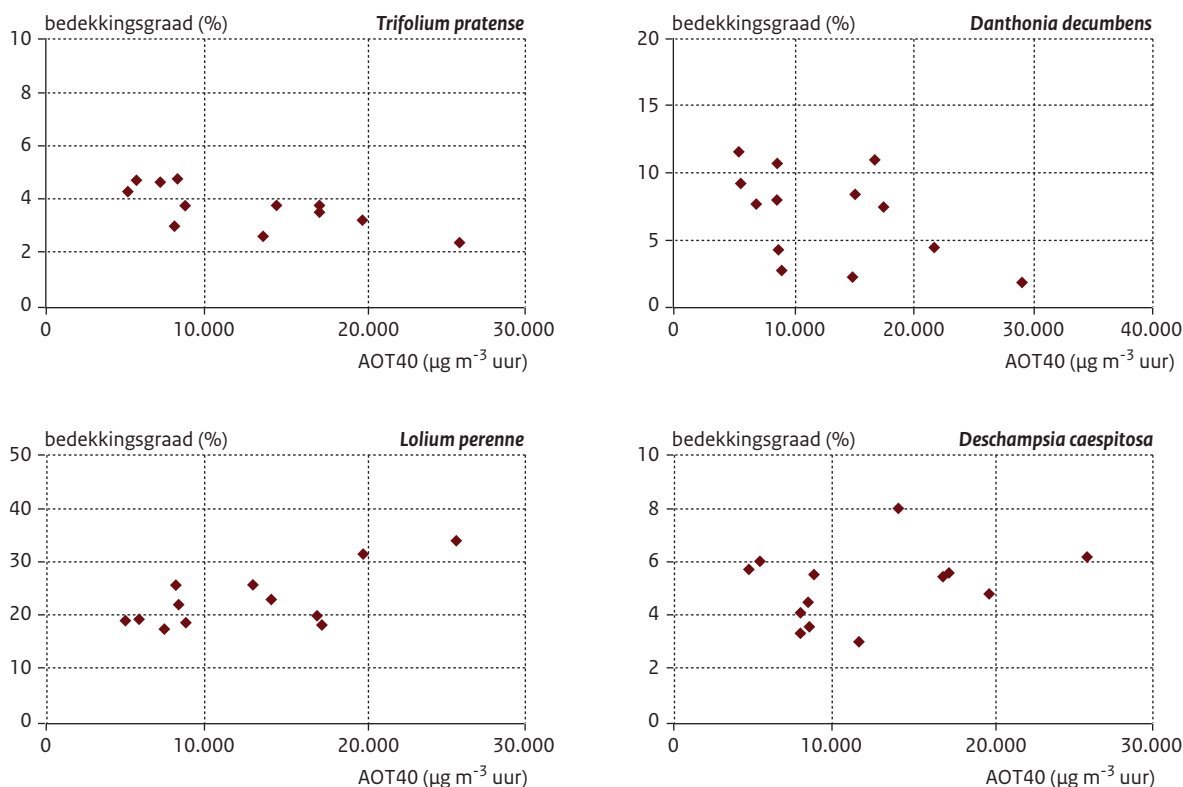
De ozonproblematiek in Nederland verschilt per regio. De hoogste waarden worden gemeten in Limburg, Zuidoost-Brabant (regio Zuid) en een deel van Gelderland (regio Midden).⁷³ In 2009 was hier ongeveer 24% van de natuur blootgesteld aan een AOT₄₀ hoger dan de langetermijndoelstelling (zie Figuur 5.9). Elders in het land bleef de blootstelling beneden de langetermijndoelstelling.

Voor relevante land- en tuinbouwgewassen variëren de kritieke niveaus (waarvoor een meer dan 5% opbrengstvermindering geldt) tussen 3.400 µg.m⁻³.uur voor watermeloen tot 175.000 µg.m⁻³.uur voor gerst. Het EU-langetermijndoel geeft dus nauwelijks of geen bescherming aan gevoelige soorten. Hieronder kunnen peulvruchten, tarwe, ui, sla en tomaten worden gerangschikt⁵⁰. Generiek wordt een kritiek AOT₄₀ niveau voor gewassen van 6.000 µg.m⁻³.uur aangehouden. Voor natuurlijke ecosystemen wordt in EU-verband geen kritiek AOT-niveau gehanteerd. Binnen UNECE wordt voor bossen 10.000 µg.m⁻³.uur aangehouden.⁷⁴

Ook uit effectmetingen aan semi-natuurlijke vegetaties blijkt dat de actuele ozonwaarden in Nederland effect hebben op het voorkomen van plantensoorten (zie Figuur 5.10).

Dueck et al. (2002)⁷⁵ hebben onderzoek gedaan naar de effecten van ozon op semi-natuurlijke vegetaties in Nederland. Ze gebruikten daarvoor de vegetatie opnamen van het provinciale florameetnet van de provincie Zuid-Holland over de jaren 1987 – 2000. In deze periode zijn tussen de jaren grote verschillen gevonden in AOT-waarden. Deze onderzoekers relateerden het verloop van de florameetgegevens aan het verloop van de blootstelling aan ozon en vonden dat een correlatie het

Figuur 5.10 Het relatief voorkomen (bedekkingsgraad) van een aantal soorten in semi-natuurlijke vegetaties in Nederland in relatie tot AOT40-waarden in het voorgaande jaar.⁷⁵



best kon worden gemaakt met de ozongegevens van het voorafgaande jaar. Het relatieve voorkomen van sommige soorten (bedekkingsgraad) werd door ozon negatief beïnvloed, terwijl andere soorten juist in hogere mate voorkwamen bij toenemende ozonblootstelling. Deze laatste zijn blijkbaar relatief ongevoelig voor ozon, en kunnen gedijen bij afnemend voorkomen van concurrerende gevoelige plantensoorten. Figuur 5.10 toont de relatie tussen de gemeten bedekkingsgraad van een viertal plantensoorten en de AOT40 in het voorafgaande jaar (Duek et al., 2002).⁷⁵ Ozon blijkt dus met actueel in Nederland gemeten AOT40-waarden effect te hebben op het voorkomen van plantensoorten.

Ook in bossen kunnen de huidige ozonniveaus leiden tot effecten. Bij een AOT40^a in de ordegrootte van 10.000 µg.m⁻³.uur kan een kleine hoeveelheid zieke exemplaren worden verwacht (zie Figuur 5.8). De risico's zijn echter moeilijk in te schatten vanwege de wisselwerking met ziekteverwekkers en planteneters.^{59,59}

Diverse recente internationale aanbevelingen betreffen voorstellen voor kritische niveaus voor de ozonbelasting

van planten in termen van de POD (zie Tabel 5.4), de parameter die wordt vastgesteld op basis van fluxberekeningen.⁷⁶ Zo bleken de korrelopbrengst van graan en de biomassaopbrengst van graslanden relatief gevoelig voor ozon.

Op basis van deze gegevens heeft de Task Force van het UNECE CLRTAP ICP Vegetation programma indicatoren voorgesteld die relevant zijn voor het formuleren van beleid ten aanzien van ozon:

- gewassen*. Beneden een POD6 van 2 mmol.m⁻² is de voedselvoorziening verzekerd omdat dan de eiwitopbrengst van tarwe beschermd is. Deze wordt beschouwd als een belangrijke indicator voor de gewaskwaliteit wanneer de opbrengst per hectare in ogenschouw wordt genomen, is een POD6 van maximaal 1 mmol.m⁻² een veilige dosis;
- bossen*. De 'carbon sink' functie van levende bomen en het functioneren van ecosystemendiensten worden beschermd tot een POD1 van maximaal 4 mmol.m⁻²;
- productie weilanden*. De vitaliteit en de opbrengst (veevoer kwaliteit) van productie weilanden zijn beschermd tot een POD1 van maximaal 2 mmol.m⁻²;

^a Uitgedrukt als AOTf; een AOT uitgerekend voor 'forest', waarbij de beschouwde periode april-september is. Zie ook Bijlage A.

Tabel 5.4 Op flux gebaseerde kritische niveaus (POD) voor het optreden van effecten van ozon op vegetatie. De tabel specificeert ook naar welk effect is gekeken en de parameter die daarbij is gebruikt. Verschillende effectnormeringen en parameters zijn gebruikt.

Receptor	Effect (procent afname)	Parameter*	Critical level (mmol/m ²)
tarwe	opbrengst (5)	POD6	1
tarwe	1,000 korrel opbrengst (5)	POD6	2
tarwe	eiwit opbrengst (5)	POD6	2
aardappel	knol opbrengst (5)	POD6	4
tomaat	vrucht opbrengst (5)	POD6	2
spar Norway spruce	biomassa (2)	POD1	8
berk/beuk	biomassa (4)	POD1	4
productie grasland (klaver)	biomassa (10)	POD1	2
grasland (natuurbehoud, klaver)	biomassa (10)	POD1	2
grasland (natuurbehoud, Viola spp., voorlopig)	biomassa (15)	POD1	6

* POD = fytotoxische ozon dosis boven drempel.

(d) *natuurlijke graslanden*. De vitaliteit van natuurlijk voorkomende soorten zijn beschermd tot een POD1 van 2 mmol.m⁻².

In Tabel 5.4 worden POD1 en POD6 naast elkaar gebruikt. Dit zijn parameters die de ozondosis weergeven boven drempelwaarden van 1 resp. 6 nmol.m⁻².s⁻¹. Door gebruik van verschillende drempelwaarden is een directe vergelijking moeilijk, maar de risico's voor graan en graslanden ontlopen elkaar niet veel. De indicator (b) voor bossen is het hoogst (4 mmol.m⁻² bij drempel 2 mmol.m⁻²), wat aangeeft dat bossen een lager risico lopen.

Voor Nederland is zonder nader onderzoek slechts een ruwe risicoschatting mogelijk. De zeer grove berekening voor 2003 van doses tot 24 mmol.m⁻² (zie Figuur 5.6) suggereert dat toen effecten mogelijk waren. De overschrijding van de kritieke waarden voor de AOT40 suggereert ook dat gevoelige gewassen als peulvruchten, tarwe, ui, sla en tomaten risico lopen.

De onzekerheden zijn echter groot. AOT40-waarden gaan slechts over de blootstelling aan extern ozon en houden geen rekening met de effecten van milieucondities op de gevoeligheid van de plant voor ozon. Voor een kritische analyse van de toepasbaarheid van de hierboven genoemde grenswaarden voor de ozonflux op de Nederlandse situatie zijn meer verfijnde fluxberekeningen nodig.

5.2.6 Conclusies

- Ozon veroorzaakt schade aan planten door opname via de huidmondjes. Het effect uit zich in bladverkleuring, groeivertraging of zelfs in het afsterven van de plant.
- Gewassen worden daardoor minder aantrekkelijk voor de consument of hun opbrengst neemt af. Voor Nederland wordt de jaarlijkse gewasgeving geschat op ongeveer 150 miljoen euro.
- Ecologisch gezien beïnvloedt ozon de samenstelling en het functioneren van het ecosysteem en daarmee de biodiversiteit.

- Aantasting van de groei van bossen door ozon beïnvloedt de mondiale koolstofcyclus.
- Voor risicoschatting van de effecten van ozon wordt de term 'AOT40' gebruikt: de hoeveelheid ozon boven de 80 µg.m⁻³ die een plant kan opnemen gedurende de dag en gedurende de maanden mei tot en met juli.
- In Nederland vindt geen overschrijding plaats van de AOT40-streefwaarde (van 18.000 µg.m⁻³.uur). De aangescherpte langetermijndoelstelling (van 6.000 µg.m⁻³.uur) wordt in delen van het land wel overschreden.
- Gevoelige gewassen zijn op basis van AOT40 beoordeeld niet beschermd door de langetermijndoelstelling van 6.000 µg.m⁻³.uur.
- De AOT40 is een maat voor de blootstelling van de plant. De feitelijke beschikbaarheid binnen de plant wordt echter beperkt door opname van ozon door de huidmondjes in het blad, die bijvoorbeeld varieert met vochtgehalte in de bodem. In UNECE verband wordt daarom inmiddels de 'fytoxische ozondosis' (POD) als alternatieve parameter voor de risicoschatting gebruikt. Deze houdt wel rekening met opname van ozon via het blad.
- Op basis van POD zijn in Noord-West-Europa ten opzichte van Zuid-Europa relatief grotere effecten te verwachten dan bij schattingen op basis van AOT het geval is.

Referenties hoofdstuk 5.1

- 1 U.S. EPA. Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants (2006 Final). EPA/600/R-05/004aF-cf U.S. Washington, DC:Environmental Protection Agency:2006.
- 2 Mauderly JL, Samet JM. "Is there evidence for synergy among air pollutants in causing health effects?" *Environmental Health Perspectives*. 2009;117(1):1-6.
- 3 Thomson E, Kumarathasan P, Goegan P, Aubin R, Vincent R. Differential regulation of the lung endothelin system by urban particulate matter and ozone. *Toxicological Sciences*. 2005;88(1):103-113.
- 4 Bouthillier L, Vincent R, Goegan P, Adamson IYR; Bjarnason S; Stewart M; Guenette J, Potvin M, Kumarathasan P. Acute effects of inhaled urban particles and ozone: lung morphology, macrophage activity, and plasma endothelin-1. *Am J Pathol*. 1998;153:1873 PMID 9846977.
- 5 Hoek G, Fischer P, Brunekreef B, Lebret E, Hofschreuder P, Mennen MG. Acute effects of ambient ozone on pulmonary function of children in The Netherlands. *Am Rev Respir Dis*. 1993 Jan;147(1):111-117.
- 6 Bron: Devlin RB; Raub JA, Folinsbee L. J Health effects of ozone *Sci Med*. 1997 (May/June):8-17.
- 7 Brunekreef B, Hoek G, Breugelmans O, Leentvaar M. Respiratory effects of low-level photochemical air pollution in amateur cyclists. *Am J Respir Crit Care Med*. 1994 Oct;150(4):962-966.
- 8 Spix C, Anderson HR, Schwartz J, Vigotti MA, Le Tertre A, Vonk JM, Touloumi G, Balducci F, et al. Short-term effects of air pollution on hospital admissions of respiratory diseases in Europe: a quantitative summary of APHEA study results. *Air Pollution and Health: a European Approach Arch Environ Health*. 1998 Jan-Feb;53(1):54-64.
- 9 U.S. EPA. Provisional Assessment of Recent Studies on Health and Ecological Effects of Ozone Exposure. EPA/600/R-09/101. Washington DC, U.S.:Environmental Protection Agency:2009.
- 10 Katsouyanni K, Samet J, Anderson HR, Atkinson R, Le Tertre A, Medina S, Samoli E, Touloumi G, et al. Air Pollution and Health: A European and North American Approach (APHENA). HEI Research Report 142. Boston, MA:Health Effects Institute:2009.
- 11 Katsouyanni K, Pantazopoulou A, Touloumi G, Moustiris K, Asimakopoulos D, Pouloupoulou G, Trichopoulos D. Evidence for interaction between air pollution and high temperature in the causation of excess mortality. *Arch Environ Health*. 1993;48(4):235-42.
- 12 Sartor F, Snacken R, Demuth C, Walckers D. Temperature, ambient ozone levels, and mortality during summer, 1994, in Belgium. *Env Res*. 1995;70:105-6.
- 13 Sartor F, Demuth C, Snacken R, Walckers D. Mortality in the elderly and ambient ozone concentration during the hot summer, 1994, in Belgium. *Env Res*. 1997;72:109-17.
- 14 Fischer PH, Brunekreef B, Lebret E. Air pollution related deaths during the 2003 heat wave in the Netherlands. *Atm Env*. 2004;38:1083-85.
- 15 Stedman JR. The predicted number of air pollution related deaths in the UK during the August 2003 heatwave. *Atm Env*. 2004;38:1087-90.
- 16 Tager IB, Künzli N, Lurmann F, Ngo L, Segal M, Balmes J. Methods development for epidemiologic investigations of the health effects of prolonged ozone exposure. Part II: an approach to retrospective estimation of lifetime ozone exposure using a questionnaire and ambient monitoring data (California sites). Report no. 81:research: pp. 27-78. Cambridge, MA:Health Effects Institute:1998.
- 17 Galizia A, Kinney PL. Long-term residence in areas of high ozone: associations with respiratory health in a nationwide sample of nonsmoking young adults. *Environ Health Perspect*. 1999;107:675-679.
- 18 Gong H, Jr, Simmons MS, Linn WS, McDonnell WF, Westerdahl D. Relationship between acute ozone responsiveness and chronic loss of lung function in residents of a high-ozone community. *Arch Environ Health*. 1998;53:313-319.
- 19 Avol EL, Gauderman WJ, Tan SM, London SJ, Peters JM. Respiratory effects of relocating to areas of differing air pollution levels. *Am J Respir Crit Care Med*. 2001;164:2067-2072.
- 20 Gauderman WJ, Avol E, Gilliland F, Vora H, Thomas D, Berhane K, McConnell R, Kuenzli N, et al. The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age. *N Engl J Med*. 2004;351:1057-1067.
- 21 Jerrett M, Burnett RT, Pope CA III, Ito K, Thurston G, Krewski D, Shi Y, Calle E, Thun M. Long-term ozone exposure and mortality. *N Engl J Med*. 2009;360(11):1085-1095.
- 22 Krewski D, Jerrett M, Burnett RT, Ma R, Hughes E, Shi Y, Turner MC, Pope CA III, et al. Extended Follow-Up and Spatial Analysis of the American Cancer Society Study Linking Particulate Air Pollution and Mortality. HEI Research Report 140. Boston:Health Effects Institute:May 2009.
- 23 Hoek G, Verhoeff A, Fischer P. Daily mortality and air pollution in the Netherlands, 1986-1994. Rapport nr. 1997-481. Wageningen:LU Wageningen:1997.
- 24 Vonk JM, Schouten JP. Daily emergency hospital admissions and air pollution in the Netherlands 1982-1986 and 1986-1995. VROM regnr. 96.140072. Groningen:RU Groningen:1998.
- 25 Knol A, Van Velze K, Fischer P, Kunseler E, Van Bree L. Interpretatie van vroegtijdige sterfte door luchtverontreiniging. Milieudossier. 2009;15(1):20-2.

- 26 Bron: World Health Organisation. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide – Global update 2005 – Summary of risk assessment. WHO:2006.
- 27 IIASA. 2005. In: http://www.iiasa.ac.at/rains/CAFE_files/CAFE-D3.pdf).

Referenties hoofdstuk 5.2

- 28 Sandermann H. Ecotoxicology of ozone: Bioactivation of extracellular ascorbate. *Biochem Biophys Res Comm.* 2008;366:271-274.
- 29 Fuhrer J. Ozone risk for crops and pastures in present and future climates. *Naturwissenschaften.* 2009;96:173-194
- 30 Sanmartin M, Drogoudi PD, Lyons T, Pateraki I, Barnes J, Kanellis AK. Over-expression of ascorbate oxidase in the apoplast of transgenic tobacco results in altered ascorbate and glutathione redox states and increased sensitivity to ozone. *Planta.* 2003;216:918-928.
- 31 Yocum LE. The stomata and transpiration of oaks. *Plant Physiol.* 1935;10:795-801.
- 32 Shull CE. Atmospheric humidity and temperature in relation to the water system of plants and soils. *Plant Physiol.* 1939;14:401-422.
- 33 Jarvis PG, Slatyer RO. The role of the mesophyll cell wall in leaf transpiration. *Planta.* 1970;L90:303-322.
- 34 Matyssek R, Le Thiec D, Löw M, Dizengremel P, Nunn AJ, Häberle KH. Interactions between drought and O₃ stress in forest trees. *Plant Biol.* 2006;8:11-17.
- 35 Paoletti E, Manning WJ. Toward a biologically significant and usable standard for ozone that will also protect plants. *Env Poll.* 2007;150:85-95.
- 36 Wieser G, Matyssek R. Linking ozone uptake and defense towards a mechanistic risk assessment for forest trees. *New Phytologist.* 2007;174:7-8.
- 37 Orendovici-Best T, Skelly JM, Davis DD, Ferdinand JA, Savage JE, Stevenson RE. Ozone uptake (flux) as it relates to ozone-induced foliar symptoms of *Prunus serotina* and *Populus maximowizii* x *trichocarpa*. *Env Poll.* 2008;151:79-92.
- 38 Fagnano M, Maggio A, Fumagalli I. Crops responses to ozone in Mediterranean environments. *Env Poll.* 2009;157:1438-1444.
- 39 Musselman RC, Massman WJ. Ozone flux to vegetation and its relationship to plant response and ambient air quality standards. *Atm Env.* 1999;33:65-73.
- 40 Tonneijck AEG, Van Dijk CJ. Assessing effects of ambient ozone on injury and yield of bean with ethylenediurea (EDU): Three years of plant monitoring at four sites in The Netherlands. *Env Mon Ass.* 2002;77:1-10.
- 41 Hayes F, Büker P, Fernández IG. Progress with flux models for semi-natural vegetation. In: http://icpvegetation.ceh.ac.uk/events/documents/Hayesetal_000.pdf: 30 september 2010.
- 42 ICP Vegetation. Yield response and ozone injury on *Phaseolus vulgaris*. Experimental Protocol. In: <http://icpvegetation.ceh.ac.uk/manuals/documents/ICPVegetationPhaseolusvulgarisprotocol2009.pdf>: 11 maart 2010a.
- 43 ICP Vegetation. Modelling and mapping manual of the LRTAP Convention. In: <http://icpmapping.org/cms/zeigeBereich/11/manual-english.html>: 11 maart 2010b.
- 44 Musselman RC, Lefohn AS, Massman WJ, Heath RL. A critical review and analysis of the use of exposure- and flux-based ozone indices for predicting vegetation effects. *Atm Env.* 2006;40:1869-1888.
- 45 Büker P, Emberson LD, Ashmore MR, Cambridge HM, Jacobs CMJ, Massman WJ, Müller J, Nikolov N, et al. Comparison of different stomatal conductance algorithms for ozone flux modelling. *Env Poll.* 2007;146:726-735.
- 46 Jarvis PG. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil Transactions Royal Soc London B.* 1976;273:593-610.
- 47 Ball JT, Woodrow IE, Berry JA. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: Biggens J. (redactie). *Progress in Photosynthesis Research*, vol. IV. Dordrecht:Martinus Nijhoff:1987:221-224.
- 48 ICP Vegetation. Evidence of widespread ozone damage to vegetation in Europe. In: Hayes F, Mills G, Harmens H, Norris D (redactie). Bangor:CEH:2007.
- 49 Mauzerall DL, Wang X. Protecting agricultural crops from the effects of tropospheric ozone exposure: Reconciling science and standard setting in the United States, Europe and Asia. *Annu Rev Energy Env.* 2001;26:237-268.
- 50 Mills G, Buse A, Gimeno B, Bermejo V, Holland M, Emberson L, Pleijel H. A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops. *Atm Env.* 2007;41:630-2643.
- 51 Ainsworth EA. Rice production in a changing climate: a meta-analysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentration. *Global Change Biol.* 2008;14:1642-1650.
- 52 Holland M, Kinghorn S, Emberson L, Cinderby S, Ashmoe M, Mills G, Harmens H. Development of a framework for probabilistic assessment of the economic losses caused by ozone damage to crops in Europe. Defra Contract No EPG 1/3205:2006. Aangehaald door Van Dingenen et al⁵³. 2009.

- 53 Wang X, Mauzerall DL. Characterizing distributions of surface ozone and its impact on grain production in China, Japan and South Korea: 1990 and 2020. *Atm Env.* 2004;38:4383-4402.
- 54 Van Dingenen R, Dentener FJ, Raes F, Krol MC, Emberson L, Cofala J. The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation. *Atm Env.* 2009;43:604-618.
- 55 Jones ME, Paine TD, Fenn ME, Poth MA. Influence of ozone and nitrogen deposition on bark beetle activity under drought conditions. *Forest Ecol Man.* 2004;200:67-76.
- 56 Fuhrer J. Elevated CO₂, ozone, and global climate change: agroecosystem responses. *Agric Ecosyst Env.* 2003;97:1-20.
- 57 Wittig VE, Ainsworth EA, Naidu SL, Karnosky DF, Long SP. Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: a quantitative meta-analysis. *Global Change Biol.* 2009;15:396-424.
- 58 Matyssek R, Karnosky DF, Wieser G, Percy K, Oksanen E, Grams TEE, Kubiske M, Hanke D, Pretzsch H. Advances in understanding ozone impact on forest trees: Messages from novel phytotron and free-air fumigation studies. *Env Pollution.* 2010;158:1990-2006.
- 59 ICP Forests. Forest condition in Europe. In: Lorentz M, Fischer R, Becher G, Granke O, Seidling W, Ferretti M, Schaub M, Calatayud V (redactie). Hamburg: Von Thünen-institute:2008:Pp 61 e.v.
- 60 Matyssek R, Sander mann H, Wieser G, Booker F, Cieslik S, Musselman R, Ernst D. The challenge of making ozone risk assessment for forest trees more mechanistic. *Env Poll.* 2008;156:567-582.
- 61 Volk M, Bungener P, Contat F, Montani M, Fuhrer J. Grassland yield declined by a quarter in 5 years of free-air ozone fumigation. *Global Change Biol.* 2006;12:74-83.
- 62 Thwaites RH, Ashmore MR, Morton AJ, Pakeman RJ. The effects of tropospheric ozone on the species dynamics of calcareous grassland. *Env Poll.* 2006;144:500-509.
- 63 Bassin S, Volk M, Suter M, Buchmann N, Fuhrer J. Nitrogen deposition but not ozone affects productivity and community composition of subalpine grassland after 3 yr of treatment. *New Phytologist.* 2007;175:523-534.
- 64 Booker F, Muntifering R, McGrath M, Burkey K, Decoteau D, Fiscus E, Manning W, Krupa S, et al. The ozone component of global change: Potential effects on agricultural and horticultural plant yield, product quality and interactions with invasive species. *J Int Plant Biol.* 2009;51:337-351.
- 65 Kim JS, Chappelka AH, Miller-Goodman MS. Decomposition of blackberry and broomsedge bluestem as influenced by ozone. *J Environ Qual.* 1998;27:953-960.
- 66 Jones TG, Freeman C, Lloyd A, Mills G. Impacts of elevated atmospheric ozone on peatland below-ground DOC characteristics. *Ecol Eng.* 2009;35:971-977.
- 67 Islam KR, Mulchi CL, Ali AA. Tropospheric carbon dioxide or ozone enrichments and moisture effects on soil organic carbon quality. *J Env Qual.* 1999;28:1629-1636.
- 68 Stevenson D, Doherty R, Sanderson M, Johnson C, Collins B, Derwent D. Impacts of climate change and variability on tropospheric ozone and its precursors. *Faraday Discuss.* 2005;130:1-17.
- 69 Sitch S, Cox PM, Collins WJ, Huntingford C. Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land carbon sink. *Nature.* 2007;448:791-794.
- 70 Jones MLM, Hodges G, Mills G. Nitrogen mediates above-ground effects of ozone but not below-ground effects in a rhizomatous sedge. *Env Poll.* 2010;158:559-565.
- 71 Grulke NE, Balduman L. Deciduous conifers: high N deposition and O₃ exposure effects on growth and biomass allocation in ponderosa pine. *Water Air and Soil Pollution.* 1991;116:235-248.
- 72 EU. Richtlijn 2008/50/EG van het Europees Parlement en de Raad van 20 mei 2008 betreffende de luchtkwaliteit en schonere lucht voor Europa. *Publicatieblad van de Europese Unie L 152/1:2008.*
- 73 Mooibroek D, Beijck R, Hoogerbrugge R. Jaaroverzicht luchtkwaliteit 2009. RIVM rapport 680704011. Bilthoven:RIVM:2010.
- 74 Simpson D, Ashmore MR, Emberson L, Tuovinen JP. A comparison of two different approaches for mapping potential ozone damage to vegetation. A model study. *Env Poll.* 2007;146:715-725.
- 75 Dueck ThA, Van Dijk CJ, De Visser W, Tonneijck AEG, Van der Werf A. Ozon en semi-natuurlijke vegetaties in de provincie Zuid-Holland. *Nota 209.* Wageningen: Plant Research International:2009.
- 76 ICP Vegetation. 2010. Flux-based assessment of ozone effects for air pollution policy. Report by the Workshop on flux-based assessment of ozone effects for air pollution policy. In: <http://www.unece.org/env/lrtap/WorkingGroups/wge/29meeting.htm> ece/eb.air/wg.1/2010/13

6

Ozonniveaus en beleid

Nederland voert al meer dan drie decennia ozonbeleid. Dit hoofdstuk geeft een beknopte evaluatie van het eerdere en huidige beleid. Verder zal een overzicht gegeven worden van de te verwachte ozonniveaus, het toekomstige beleid en welke opties er zijn voor verdergaand beleid om ozonniveaus te reduceren. Dit overzicht is enkel gebaseerd op bestaande studies.

6.1 Eerder beleid

Sinds ruim twintig jaar is ozonbeleid onderdeel van een samenhangend milieubeleid, dat ook verzuring en vermisting bestrijdt (zie Paragraaf 6.2.1). Een speciaal voor ozon relevant onderdeel was het KWS (koolwaterstoffen) 2000-programma dat in 1989 van start ging. Dat had betrekking op alle stationaire bronnen van koolwaterstof-emissies (NMVOS), met uitzondering van de emissies door elektriciteitsproductie, landbouw en verbrandingsemissies. Het NMP3 formuleerde als doelstelling voor het KWS2000-programma een emissiereductie van 50% in 2000 ten opzichte van 1981. Het programma was succesvol, want de eindrapportage meldde dat in 2000 een reductie van 52% ten opzichte van 1981 was bereikt.¹

In de laatste drie decennia is het ozonbeleid in Nederland ook in een Europees kader geplaatst. Onder de paraplu van de *UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution* (CLRTAP uit 1979) tekende Nederland een aantal

protocollen, zoals het eerste en tweede zwavelprotocol (1985, 1994), het NO_x-protocol uit 1988 en het VOS-protocol uit 1991. De laatste twee protocollen zijn mede tot stand gekomen door de wens om de ozonconcentraties te verlagen. Dat gold ook voor het in 1999 ondertekende Gotenburg Protocol (*Protocol to abate acidification, eutrophication and ground level ozone*).^{2,3}

6.2 Bestaand beleid

Het huidige internationale ozonbeleid bestaat nu uit het Gotenburg Protocol (GP) en de richtlijn Nationale Emissieplafonds (NECD) van de Europese Unie. De EU-richtlijn betreft alleen de 27 lidstaten van de Europese Unie en de Europese Commissie kan lidstaten die in gebreke blijven sancties opleggen. De emissieplafonds in de NECD zijn afgeleid van het Gotenburg Protocol en liggen voor sommige landen en stoffen iets lager.

6.2.1 UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution

In de jaren negentig brak het inzicht door dat diverse problemen van luchtverontreiniging met elkaar in verband staan en dat er dus samenhang moet zijn in de aanpak van verschillende stoffen. Toen is ook de zogenaamde *multi-pollutant-multi-effect*-strategie ontwikkeld, die resulteerde in het Gotenburg Protocol ter bestrijding van

verzuring, vermisting en ozon. Dit protocol werd op 1 december 1999 door de milieuministers ondertekend en trad formeel in werking op 17 mei 2005, toen 16 landen het Protocol hadden geratificeerd. Het Protocol omvat plafonds voor de nationale emissies in 2010 voor vier componenten, te weten: zwavel, stikstofoxiden, vluchtige organische stoffen en ammoniak. Wanneer het Protocol volledig wordt uitgevoerd, zijn de Europese emissies in 2010 met ten minste 63% (SO_2), 41% (NO_x), 40% (NMVOS) en 17% (NH_3) gedaald ten opzichte van de niveaus in 1990.

Voor ozon verwachtte het Protocol voor 2010 (ten opzichte van 1990):⁴

- halvering van het aantal dagen met overschrijding van de ozonnormen;
- 20% minder mensen die door ozon vroegtijdig overlijden;
- de blootstelling van vegetatie aan te hoge concentraties ozon is circa 44% afgenomen.

6.2.2 EU

Op 27 november 2001 werd de EU-Richtlijn Nationale emissieplafonds (NECD) van kracht. Deze richtlijn is afgeleid van het Gotenburg Protocol en gaat over dezelfde stoffen. Doelstelling van de NECD is '...de emissies van verzurende en eutrofiërende verontreinigende stoffen en van precursoren van ozon te beperken...' (artikel 1). De Richtlijn is van toepassing op alle door menselijke activiteiten veroorzaakte emissies van SO_2 , NO_x , NMVOS en NH_3 , met uitzondering van de emissies van de internationale zeevaart en van vliegtuigen buiten de landings- en startcyclus. Uiterlijk in 2010 moeten de lidstaten hun jaarlijkse emissies van deze stoffen beperken tot genoemde plafonds en vanaf 2010 mogen ze die plafonds niet meer overschrijden.

Voor ozon stelde de Richtlijn de volgende tussendoelen vast voor 2010 ten opzichte van 1990:

- De ozonbelasting op leefniveau neemt met 2/3 af in alle gebieden ('roostervakken' van $150 \times 150 \text{ km}^2$) waar de ozonbelasting in 1990 het gezondheids criterium ($\text{AOT60} = 0 \mu\text{g.m}^{-3}.\text{uur}$) nog overschreed.
- Geen enkel roostervak mag nog de absolute gezondheidsgerelateerde grens voor ozon ($\text{AOT60} = 5,800 \mu\text{g.m}^{-3}.\text{uur}$) overschrijden.
- De ozonbelasting op leefniveau neemt af met 1/3 in alle roostervakken die in 1990 het kritische niveau voor landbouwgewassen en halfnatuurlijke vegetatie ($\text{AOT40} = 6.000 \mu\text{g.m}^{-3}.\text{uur}$) overschreden.

⁴ De roostervakken van $150 \times 150 \text{ km}$ komen van het RAINS-model van IIASA, dat de wetenschappelijke basis is voor de NECD en het GP. Het GAINS-model (de opvolger van RAINS) werkt met $50 \times 50 \text{ km}$ vakken.

- Geen enkel roostervak mag nog de absolute vegetatiegerelateerde grens voor ozon ($\text{AOT40} = 26.000 \mu\text{g.m}^{-3}.\text{uur}$, geformuleerd als $20.000 \mu\text{g.m}^{-3}.\text{uur}$ boven het kritische niveau van $6.000 \mu\text{g.m}^{-3}.\text{uur}$) overschrijden.

In de Thematische Strategie Luchtkwaliteit (2005) heeft de Europese Commissie een samenhangend plan verwoord voor de ontwikkeling van emissieplafonds, luchtkwaliteitsgrenswaarden en Europese emissie-eisen aan installaties en voertuigen. De Richtlijn Industriële Emissies en de Richtlijn Euro-normen voor vrachtwagens en personenauto's gelden als een ondersteuning voor het realiseren van de emissieplafonds.

6.2.3 Nederland

Alle lidstaten hebben de NECD omgezet in eigen nationale wetgeving. Nederland heeft dit gedaan via een wijziging van de Wet inzake de Luchtverontreiniging.⁵

6.3 Evaluatie bestaand beleid

Evaluatie van het huidige beleid richt zich in eerste instantie op de emissies, maar ook op de doelstellingen voor een verminderde belasting van mens en ecosystemen.

6.3.1 Emissies

In de afgelopen decennia zijn alle emissies van ozonvermende stoffen fors gereduceerd (zie Hoofdstuk 3). De NO_x -emissies in Nederland en omliggende landen namen tussen 1990 en 2010 per saldo af met ruim 45%, terwijl de NMVOS-emissies met meer dan 60% en de CO-emissies met circa 50% afnamen.

Voor heel Europa geldt een wat meer wisselend beeld. Volgens de evaluatie van het Gotenburg Protocol blijft de emissiereductie van NO_x in Europa met 38% achter bij het doel van 41% (tussen 1990 en 2010), terwijl de reductie van NMVOS met 43% juist hoger is dan de afgesproken 40%.⁶ Bij een voortzetting van bestaand beleid zal tussen 2010 en 2020 een extra emissiereductie optreden van 14% voor NO_x en 7% voor NMVOS.

Het Europees Milieubureau, EEA, rapporteert jaarlijks over de voortgang van de implementatie van de NECD in de EU27. Volgens de meest recente stand van zaken (oktober 2010) bestaan er vooral problemen bij de NO_x -emissieplafonds. 11 van de 27 lidstaten halen naar verwachting de doelstelling voor NO_x -emissies niet. In 7 van deze 11 lidstaten (onder andere België, Luxemburg, Frankrijk en Ierland) zal de overschrijding groter dan 10% zijn, in 4 landen (o.a. Duitsland en het Verenigd Koninkrijk)

minder dan 10%. De effecten van de recessie zijn nog niet voor alle landen in de cijfers verwerkt. Door de vermindering van economische activiteiten kunnen landen nog wel hun verplichtingen halen. Bij NMVOS halen drie lidstaten naar verwachting de plafonds niet, maar in Nederland en alle omliggende landen zal dat wel het geval zijn.

Het EEA laat zien dat de EU-27 als geheel voldoet aan de emissiedoelen voor NMVOS, SO₂ en NH₃. De verwachte NO_x-emissies van de EU-27 voor 2010 liggen nog wel 14% boven het doel voor de totale EU. De belangrijkste oorzaak is dat de NO_x-emissies van personen en vrachtauto's in de praktijk hoger blijken te zijn dan werd verwacht op basis van de emissie-eisen (Euro-normen) die aan deze voertuigen worden gesteld.⁷

6.3.2 Effecten

De evaluatie van de emissies in Nederland en omliggende landen stemmen goed overeen met de trends die worden gemeten in de concentraties in de buitenlucht (zie Hoofdstuk 3). NO_x- en NMVOS-concentraties zijn vanaf 1990 aanzienlijk gedaald, met respectievelijk 30-45% en 50%. Om de uiteindelijke effecten van ozon te evalueren is het een relevante vraag of de waargenomen trend in ozonconcentraties eveneens in lijn is met de verwachtingen.

Modelstudies voorspellen dat dalende emissies van de genoemde stoffen in gebieden met hoge NO_x-concentraties, zoals Nederland, zullen leiden tot hogere jaargemiddelde ozonconcentraties.^{8,9} Dat wordt in grote lijnen bevestigd door de ozonmetingen (zie Figuur 3.4). Uit een analyse blijkt dat de lichte stijging van de jaargemiddelde ozonconcentratie in Nederland inderdaad grotendeels veroorzaakt wordt door de verlaging van de NO_x-concentraties, en in mindere mate door een stijging van de achtergrondconcentraties van ozon.^{10, 11}

De modelstudies berekenen voor Nederland ook een gestage verlaging van de piekconcentraties van ozon, maar dat komt minder goed overeen met de waarnemingen. Tussen 1996 en 2007 is geen duidelijke trend in de pieken te zien, terwijl de emissies in die periode wel afnamen. Dat de verwachte daling van de piekconcentraties uitblijft kan komen door een hogere bijdrage van natuurlijke emissies in de zomer of een tekortkoming in de modellen.

De effecten op mens en milieu worden allereerst afgemeten aan de ontwikkeling van enkele beleidsrelevante parameters. Dat wordt wel gecompliceerd door het feit dat inzichten in emissies, verspreidingsprocessen en dosis-effectrelaties in de afgelopen 20 jaar zijn gewijzigd (zie Paragraaf 6.5). In de evaluatie van het Gotenburg Protocol uit 2007 valt op dat het achterblijven van de in

2001 verwachte vermindering van de blootstelling aan ozon in Europa wordt toegeschreven aan de stijgende achtergrondconcentraties van ozon op het noordelijk halfrond.

De metingen van het landelijk meetnet in Nederland wijzen uit dat de effecten op gewasschade (volgens AOT40, de maat voor gewasschade) met ruim de helft zijn gedaald (zie Paragraaf 3.2.4). Dat overtreft het doel van een vermindering met 1/3. De maat voor gezondheidschade (AOT60) is in Nederland in de periode vanaf 1990 met ruim 2/3 gedaald.

De conclusie is dat de beleidsdoelen voor de bescherming van gewassen en gezondheid in Nederland en de omliggende landen grotendeels zijn gehaald. Later in dit hoofdstuk zullen we ingaan op het belang van een verklaring over de discrepantie tussen berekende en gemeten waarden voor de te verwachte ozonconcentraties.

6.4 Verwachte trends tot 2020-2030 in Europa

De komende paragrafen schetsen de toekomstige ontwikkelingen van ozon ten gevolge van het voorgenomen EU-beleid tot 2020-2030 (zie Paragraaf 6.4.1) en de mondiale emissies (zie Paragraaf 6.4.2). De effecten van klimaatverandering zijn in Hoofdstuk 4 gegeven, maar zijn voor de volledigheid kort gememoreerd in Paragraaf 6.4.3.

6.4.1 Europese emissies

Emissieplafonds voor 2020 zullen in het Europese beleid worden vastgelegd in opvolgers van het Gotenburg Protocol en de NECD, die een nieuwe stap zullen zetten naar volledige bescherming van mens en natuur op langere termijn. Het Gotenburg Protocol wordt naar verwachting eind 2011 herzien, de NECD niet vóór 2013.

Ter voorbereiding van deze herzieningen heeft IIASA emissieprojecties opgesteld voor bestaand beleid en bij toepassing van alle beschikbare technieken.^{12,13} De emissies in 2020 zijn sterk afhankelijk van de uitvoering van het Europese klimaat- en energiebeleid, zoals de toekomstige inzet van energiedragers (groene energie, gas, olie en kolen). Dit bepaalt voor een belangrijk deel de emissies van SO₂, NO_x en fijn stof.

De scenario's van IIASA geven een indruk van de orde van grootte van emissieveranderingen in het komende decennium. Bij uitvoering van het klimaat- en energiebeleid van de EU en de *richtlijn Industriële Emissies* mogen verdergaande reducties van NO_x en NMVOS in de EU27 en

Tabel 6.1 Ontwikkeling emissies NO_x en NMVOS 1990-2010 en de vooruitzichten tot 2020 volgens het baseline scenario (BL) en het Maximum Feasible Reduction scenario (MFR), zoals gebruikt voor de herziening van het Gotenburg Protocol, in kilotonnen (boven) en procentuele veranderingen (onder).

NO _x	1990	2000	2010	2020 BL	2020 MFR
Europa	24.991	17.550	14.845	10.053	6.993
Nederland	549	410	264	185	150
NMVOS					
Europa	22.921	16.439	13.111	10.119	6.550
Nederland	393	259	144	149	125
NO _x	1990-2000	2000-2010	2010-2020 BL	2010-2020 MFR	
Europa	-30%	-15%	-32%	-53%	
Nederland	-25%	-36%	-30%	-43%	
NMVOS					
Europa	-28%	-20%	-23%	-50%	
Nederland	-34%	-44%	3%	-13%	

Nederland verwacht worden (zie Tabel 6.1).¹³ Ook de striktere toepassing van de huidige emissie-eisen voor grote industriële bronnen zal leiden tot verdere emissiereductie.¹⁴ Maar de absolute reducties (in kton/jr) over de komende 10 jaar zullen voor Nederland kleiner zijn dan in de periode 1990-2000 en 2000-2010.

Bovenop dit vastgestelde beleid bestaat in de EU27 nog een maximaal technisch potentieel (Maximum Feasible Reduction, MFR) aan NO_x-maatregelen van 740 kt, te verdelen in maatregelen bij centrales (250 kt), in de industrie (340 kt) en bij huishoudens (150 kt).¹³ Bij NMVOS is het reductiepotentieel in de EU 1.900 kt, door maatregelen bij oplosmiddelen (1.030 kt), in huishoudens (565 kt), industrie (220 kt), gas- en oliewinning (65 kt) en landbouw (20 kt).

De totale kosten van het vastgestelde beleid in de EU worden geschat op 90 miljard euro per jaar, ofwel 0,64% van het bbp. In Nederland bedragen de kosten van het vastgestelde beleid 0,53% van het bbp. Het volledig benutten van het resterende technische potentieel aan maatregelen in de EU27 zou nog eens ruim 30 miljard euro extra kosten (waarvan meer dan 10 miljard euro betrekking heeft op oplosmiddelen en 20 miljard euro met maatregelen bij huishoudens (ruimteverwarming en koken).

Rond 2020 zijn de NO_x-emissies in de EU27, in de niet-EU-landen in Europa en op de zeeën rond Europa elk ongeveer even groot. Emissiereducties in Oost-Europa, op de Balkan en in Turkije zijn relatief goedkoop, net als in de scheepvaart. Bij de NMVOS-emissies speelt de scheepvaart amper een rol van betekenis. De NMVOS-emissies in Europa komen in 2020 voor 60% uit de EU27.

Voor de ontwikkeling van ozon in Nederland is gebruik gemaakt van het EMEP-model.¹⁵ Met emissiescenario's die sterk gelijken op de scenario's van IIASA (zie Tabel 6.2) zijn berekeningen voor twee zichtjaren gedaan, namelijk 2000 en 2020.

De jaargemiddelde ozonconcentraties blijken tussen 2000 en 2020 te stijgen, variërend van vrijwel geen stijging in de schoonste gebieden tot circa 10% stijging in de gebieden met de hoogste NO_x-concentraties. Deze verandering lijkt sterk op de trends over de afgelopen jaren (zie Hoofdstuk 3). Op de straat- en stadstations zullen de ozonconcentraties verder stijgen dan op regionale stations zodat de verschillen tussen de drie typen meetstations kleiner worden.

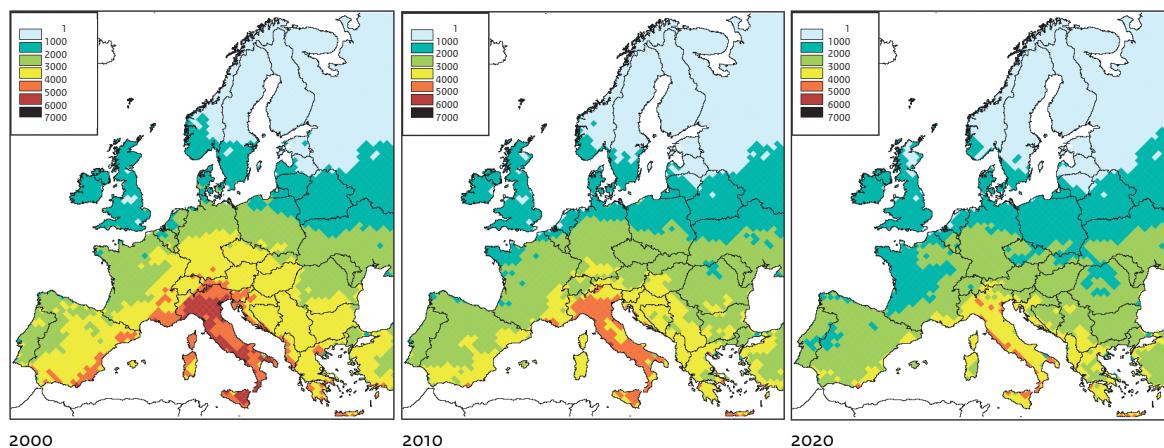
De piekconcentraties in de meeste roosterzellen van het EMEP-model laten een lichte daling (3-4%) zien over de periode 2000-2020. De blootstellingsindicator voor de effecten op vegetatie, AOT40-waarden, dalen wel sterk, met zo'n 45-55%. Onzeker is of deze ontwikkelingen ook echt zullen optreden, gezien de verschillen tussen modelberekeningen en metingen in de modevaluaties (zie Paragraaf 3.4).

Tabel 6.2 Vroegtijdige sterfte door ozon per miljoen inwoners ouder dan 30 voor Europa en Nederland volgens het baseline scenario (BL) en het Maximum Feasible Reduction scenario (MFR)¹².

	2000	2020 BL	2020 MFR
Europa	88	55	44
Nederland	44	30	26

De emissiescenario's leiden tussen 2000 en 2020 in de EU27 tot een reductie van de gezondheidsrisico's door ozon met 35-40% (zie Figuur 6.1).¹³ Toepassing van alle

Figuur 6.1 Het effect van vastgesteld beleid op de volksgezondheid uitgedrukt in SOMO35. Bron: MNP/IIASA, 2007⁶. SOMO35 is de som van alle ozonconcentraties groter dan 35 ppb ($70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, zie voor een exactere definitie Bijlage A).



beschikbare reductietechnieken (MFR) zou de gezondheidsrisico's halveren (zie Tabel 6.2).

Uiteindelijk heeft dit alles consequenties voor het aantal vroegtijdige sterftegevallen door ozon. Gezondheidseffecten door ozon zijn in Zuid-Europa veel sterker dan in onze streken. In heel Europa gaat het bij ongewijzigd beleid in 2020 om ongeveer 25.000 vroegtijdige sterftegevallen die aan ozon zijn toe te rekenen, waarvan 17.000 in de EU27. Volgens de IIASA-rekenmethode waren er in Nederland in 2000 ruim 400 vroegtijdige sterftegevallen. Dat is aanzienlijk lager dan het door het RIVM geschatte aantal van 1.300, omdat het RIVM ook uitgaat van gezondheidsrisico's bij lagere concentraties dan $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (zie Paragraaf 5.1) en de gehele bevolking als risicogroep neemt en niet alleen de mensen ouder dan 30 jaar.

De reductie in de ozonprecursoren vanuit Europa levert ook een daling van de jaargemiddelde ozonconcentraties in andere werelddelen¹⁶ (zie ook Paragraaf 6.4.2). Deze daling worden meer vervroegde sterftegevallen elders in de wereld vermeden dan in Europa zelf.

6.4.2 Mondiale emissies

De mondiale achtergrondconcentraties van ozon zijn van groot belang voor de jaargemiddelde concentraties van ozon in Nederland en elders in Europa (zie Hoofdstuk 2). De achtergrondconcentratie is afhankelijk van de NO_x -, CO, methaan en NMVOS-emissies uit andere continenten, maar ook uit Europa zelf. Bij vastgesteld beleid zullen de emissies in Europa en Amerika verder dalen, maar deze daling wordt teniet gedaan door toenemende emissies in Azië. Per saldo zullen de ozonprecursor-emissies tot 2050

op het noordelijk halfrond ongeveer constant blijven.¹⁷ Maar de methaanemissies zullen zonder ambitieus klimaatbeleid naar verwachting sterk stijgen.

Er zijn diverse modelstudies naar de ontwikkelingen van emissies van ozonprecursorgassen elders in de wereld en naar het effect daarvan op de ozonconcentraties in Europa. De ACCENT Photocomp-studie gebruikt 26 wereldwijde verspreidingsmodellen en vergelijkt een aantal scenario's.¹⁸ Szopa et al., (2006), berekenen de ozonconcentraties in 2000 en 2030 op basis van mondiale en regionale modellen en emissiescenario's in Europa en de rest van de wereld.¹⁹ Beidestudies geven het belang van de emissieontwikkelingen en emissie beperkende maatregelen buiten Europa weer (zie Tabel 6.3).

Bij Maximum Feasible Reduction beleid (MFR) kan de mondiale NO_x -emissie met 75% verminderd worden ten opzichte van de baseline zonder beleid. De helft van het potentieel betreft de transportsector, de andere helft de grote vuurhaarden. Het mondiale reductiepotentieel van CO (75% in totaal) betreft voor 60% de huishoudens (verwarming, koken) en de transportsector (30%).

Bij voortzetting van bestaand beleid in Europa en de rest van de wereld zou de gemiddelde (zomer-) concentratie in Nederland stijgen tussen 0-2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (EW BL). Bij MFR-beleid in Europa en de rest van de wereld kan dit gemiddelde dalen met -4 tot -8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (EW MFR). Echter bij het groeiscenario IPCC SRES-Az zouden de ozongemiddelden in Nederland stijgen met 4 tot 8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Weliswaar heeft de studie van Szopa et al.¹⁹, betrekking op het gemiddelde dagmaximum in de zomer over heel Europa, qua effecten zijn deze in lijn met bovenstaande

Tabel 6.3 Ontwikkeling ozonconcentraties tussen 2000 en 2030. Szopa berekent gemiddelden voor Europa, Dentener voor Nederland en naaste omgeving. Naast vastgesteld beleid (BL) is een scenario doorgerekend met maximale technisch haalbare reductie (MFR) en een scenario met sterke emissietoename (SRES-A2 van IPCC, voor scenariobeschrijving zie Bijlage B). Om Europese ontwikkelingen te scheiden van die buiten Europa staan hier de berekende veranderingen in 2030 voor drie gevallen: de emissies in Europa gefixeerd op 2000-niveau (W), de emissies buiten Europa gefixeerd (E) en zonder fixatie (EW).

	Nederland ¹⁸ Gemiddelde verandering in ozonconcentratie in de zomer ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Europa ¹⁹ Gemiddelde verandering in het dagmaximum ozon in de zomer ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Europa ¹⁹ Aantal dagen met meer dan 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
EW BL*	+0 - +2	+0,4	-0,7
EW MFR	-8 - -4	-12	-1,2
EW SRES-A2	+4 - +8	+20	8,3
W BL		+4,5	0,4
W MFR		-3,8	-0,2
W SRES-A2		+9	0,8
E BL		-3,6	-0,9
E MFR		-8,6	-1,2
E SRES-A2		+11	6,2

*EW : Europa en de rest van de wereld op 2030-emissies;
W : rest van de wereld op 2030; Europa op 2000-emissies
E : Europa op 2030; rest van de wereld op 2000-emissies

scenariobevindingen. Met de scenario's van Szopa et al.¹⁹, kan de bijdrage aan de ozonconcentratie in Europa door Europa zelf en de rest van de wereld ingeschat worden.

Bij voortzetting van bestaand emissiebeleid zouden in Europa tussen 2000 en 2030 de zomergemiddelde dagmaximum ozonconcentraties met circa $4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ dalen als gevolg van Europese maatregelen (E BL). Deze daling wordt geheel teniet gedaan door hogere emissies elders in de wereld (vergelijk W BL met E BL). Voor de zomergemiddelden is de invloed van Europa bij de huidige emissieniveaus ongeveer even groot als de invloed van buiten Europa. Versterkt beleid (MFR) in Europa alleen brengt de dagmaxima concentraties met circa $8-9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ omlaag, eenzelfde beleid buiten Europa met nog eens $3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Op de piekconcentraties in Europa heeft het elders in de wereld gevoerde beleid veel minder invloed. Het aantal dagen met meer dan $180 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ wordt grotendeels door emissies binnen Europa bepaald. Versterkt beleid (MFR) reduceert dit aantal met een halve dag ten opzichte van de baseline (vergelijk EW MFR met EW BL). Deze studie beschouwt geen andere indicatoren, zoals de AOT₄₀, SOMO₃₅ of het aantal dagen overschrijding van de 8-uursnorm. Maar ook hiervoor geldt dat de Europese ontwikkelingen in emissies bepalend zijn.

De ontwikkelingen in de mondiale methaanemissies spelen een belangrijke rol in de achtergrondconcentratie van ozon. In de periode 1990-2008 is de uitstoot van

methaan in zowel de EU-27 als Nederland met 31% gedaald (zie Paragraaf 3.3).²⁰ De daling heeft zich vooral in de eerste tien jaar voorgedaan. De verwachting is dat de methaanemissie in Europa en VS op zijn best zal stabiliseren, maar in Azië sterk zal stijgen. In het slechtste geval kan de mondiale methaanemissie tussen 2005 en 2050 verdubbelen.

Er zijn veel technische maatregelen beschikbaar om de groeiende methaanemissies te dempen, met wel 40% in 2030. Voor driekwart zijn dat maatregelen bij de winning van fossiele energie (zoals affakkelen en onderhoud van gasleidingen). Gasterugwinning bij stortplaatsen beslaat 20% van het potentieel en landbouwmaatregelen (zoals anaerobe mestvergisting; en dieetaanpassing) 5%. Het grootste potentieel aan (betaalbare) maatregelen ligt in China en India. Emissiereductie van methaan in Azië lijkt voor het terugdringen van de ozonconcentraties in Europa zelfs goedkoper dan NO_x - en NMVOS-maatregelen in Europa zelf.

Een focus van CDM-klimaatprojecten op methaan kan voor Europa grotere voordelen opleveren dan de focus op CO_2 -projecten. Emissiereductie van methaan heeft als co-benefit dat de ozonluchtkwaliteit beter wordt en is ook een effectieve maatregel tegen klimaatverandering. Methaan leeft in de atmosfeer korter dan CO_2 , dus heeft de reductie van methaan sneller effect op vermindering van de temperatuurstijging dan emissiereductie van CO_2 . Bij ongewijzigd beleid wordt rond 2050 een temperatuurstijging met 0,8 graden verwacht. Een versterkt beleid (MFR) voor methaan kan de tot 2050 verwachte temperatuurstijging substantieel verminderen¹⁷.

Echter methaanreductie is op langere termijn geen substituut voor vermindering van de CO₂-uitstoot, die blijft onvermijdelijk om de klimaatverandering in de komende eeuw te beperken.

6.4.3 Ontwikkelingen na 2020-2030; klimaatverandering

Een verandering van het klimaat zal van invloed zijn op de ozonconcentraties. De voor ozon relevante processen zijn veranderende stromingspatronen, transport van ozon vanuit de stratosfeer, biogene emissies en droge depositie. Veel van deze processen kunnen nu nog niet goed gekwantificeerd worden (zie Hoofdstuk 4). Door de grote onzekerheid over de omvang en de invloed van deze processen is echter nog niet duidelijk of klimaatverandering de jaargemiddelde ozonconcentraties zal doen toe- of afnemen. De veranderingen zijn waarschijnlijk pas ook op langere termijn zichtbaar. Veel klimaatstudies gebruiken bovendien 2050 of 2100 als zichtjaar, en niet 2020 of 2030, zoals in voorgaande paragrafen.

6.5 Onzekerheden in scenario-uitgangspunten

Er zijn verschillende ontwikkelingen die de bovengenoemde emissiescenario's kunnen verstoren, zoals de handel in NO_x-emissies, maatregelen voor de internationale zeescheepvaart en veranderende inzichten in effectindicatoren.

6.5.1 Emissiehandel

De afgelopen jaren heeft de Europese Commissie onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van emissiehandel van NO_x als kosteneffectieve reductiemaatregel.^{21,22} Emissiehandel kan plaatsvinden binnen een land (zoals nu in Nederland gebeurt), binnen de EU-27 of binnen een aantal handelszones in de EU, zonder dat de emissieverplichting van de EU-27 in gevaar komt.

De gevolgen voor ozon zijn daarbij ook onderzocht. Bij handel treden slechts kleine verschuivingen van de emissies op (minder dan 1% van nationale emissies). Daarmee verslechtert ook de AOT₄₀ minimaal, met minder dan 1% voor de EU-27 als geheel. Of de Europese Commissie in de nieuwe regelgeving de mogelijkheid voor handel open laat is nog onbekend.

6.5.2 Internationale zeescheepvaart

Emissies van internationale zeescheepvaart worden gereguleerd door Bijlage 6 van de *International Convention on the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*. Hierin staan de emissie-eisen voor NO_x uit nieuwe motoren. Vanaf 1-1-2011 geldt de nieuwe Tier II-standaard. De emissiestandaard hierin is 16 tot 22 % lager dan in de Tier I-standaard, die in 2000 van kracht werd. In sommige zones (de zogenaamde NECA's, *Nitrogen Emission Control Areas*) geldt een nog strengere Tier III-standaard, die emissies met circa 80% reduceert ten opzichte van Tier I. Deze geldt dan voor schepen met motoren die na 1 januari 2016 gebouwd zijn.

Momenteel wordt onderzocht wat de kosten en baten zijn van het aanwijzen van de Noordzee als NECA. In 2020 kan dan voor ongeveer een kwart van de vloot de Tier III-standaard ingevoerd zijn, wat inhoudt dat de emissies van NO_x op de Noordzee in 2020 circa 35% gedaald kunnen zijn.²³ Daardoor zou AOT₄₀ in Nederland met circa 2% dalen, terwijl de gemiddelde ozonconcentratie met 2-3% stijgt.

6.5.3 Veranderingen in de modellering van schade aan planten

In de afgelopen jaren is onderzoek gedaan waardoor de schade van ozon aan gewassen, bossen en (natuurlijke) vegetatie beter kan worden gemodelleerd (zie Hoofdstuk 5). Zo houdt de oorspronkelijke AOT₄₀-benadering geen rekening met het feit dat de huidmondjes van vegetatie tijdens warme en droge perioden minder open zijn. De fluxparameter POD_x (Phytotoxic Ozone Dose boven fluxdrempel x) houdt daar wel rekening mee. De schade aan planten in Zuid-Europa is kleiner dan eerder gedacht, maar de schade aan planten in Midden- en Noord-Europa wordt nu hoger geschat.^{24,25}

Gebruik van de fluxbenadering zou tot andere emissieplafonds kunnen leiden dan op basis van de AOT₄₀-indicator is afgeleid, met een sterkere nadruk op reductie van emissies van ozonprecursors in Noord en Midden-Europa.

Tabel 6.4 Verwachting van trends in Nederland tot 2010-2030 bij Europees en Mondiaal beleid.

	Jaargemiddelde ozon	Piekozonconcentraties ¹
Europees beleid 2020 (NEC+/GP+) ¹	+/0 (land); + (stad)	0/-
Europees beleid MFR	0/- (land); + (stad)	-
Wereldbeleid - baseline 2030	++	0
Wereldbeleid MFR 2030	-	0
Wereld- en Europees beleid MFR + methaan	--	-
Klimaatverandering tot 2020-2030 – baseline	0	0/+

++: stijging >10% +: stijging 5-10% 0: geen stijging <5%
 -: daling 5-10% --: sterke daling >10%

¹ NEC+: Herzienne NECD, GP+: herziene UNECE Gotenborg protocol

6.6 Resume verwachting ozontrend tot 2020-2030

6.6.1 De trends voor Nederland

De verwachting van de ozontrend tot 2020-2030 bij verschillende scenario's is samengevat in Tabel 6.4. De grootste invloed op de komende ozonconcentraties in Nederland zal naar verwachting voortkomen uit het herziene Europese en mondiale beleid tot 2020. Wat Europees beleid betreft is dat de National Emission Ceiling Directive van de EU (NECD) en het herziene Gotenborg Protocol van de UNECE. Volgens dit beleid zal de jaargemiddelde ozonconcentratie in stedelijke gebieden verder stijgen en in landelijke gebied weinig of niet stijgen. Voor de piekconcentraties verwachten modelberekeningen een daling. Kanttekening hierbij is dat op basis van eerdere modevaluaties deze daling lager zou kunnen uitvallen.

De emissies elders in de wereld zijn van invloed op de jaargemiddelde ozonconcentratie en in beperkte mate op de piekconcentraties. Met het nu vastgestelde beleid (baseline) stijgen de emissies van NO_x, NMVOS en CO in de rest van de wereld en dragen zij bij aan de stijgende jaargemiddelde ozonconcentratie in Europa.

Toepassing van maximaal technisch haalbare reducties in Europa en elders in de wereld zal tot een daling van jaargemiddelde ozonconcentratie én de piekconcentraties van ozon kunnen leiden.

Door klimaatverandering kunnen de frequentie en de intensiteit van ozonpieken in de komende decennia toenemen. Echter door de grote onzekerheid over de omvang en de invloed van alle processen die de ozonconcentratie beïnvloeden, is nog niet duidelijk of klimaatverandering de jaargemiddelde ozonconcentraties zal doen toe- of afnemen. De veranderingen zijn waarschijnlijk pas ook op langere termijn zichtbaar.

6.6.2 Effectieve opties voor beleid

De meeste effectieve strategie voor verlaging van de ozonpieken is de emissiereductie van achtereenvolgens NO_x en NMVOS, methaan en CO.

Om ook de risico's van langdurige blootstelling aan lagere ozonconcentraties te verminderen is het van belang de jaargemiddelde concentraties omlaag te brengen. Het meest effectief voor de verlaging van de achtergrondconcentratie op het noordelijk halfrond is het reduceren van de mondiale emissies van achtereenvolgens methaan, NO_x, NMVOS en CO. Methaanbeleid op het noordelijk halfrond is daarvoor essentieel. Dat vraagt om verbreding van de huidige onderhandelingen over grensoverschrijdende luchtverontreiniging vanuit Noord-Amerika en Azië. Methaanreductie in Azië is zelfs de meest kosteneffectieve manier om de achtergrondconcentratie in Europa te verlagen. Bilaterale overeenkomsten, bij kennisoverdracht, ontwikkelingssteun en bij projecten in het kader van het *Clean Development Mechanism* van de klimaatconventie, zouden meer nadruk op methaan kunnen leggen.

In Nederland en Noordwest-Europa moeten de emissies van NO_x en NMVOS aanzienlijk dalen om ook de gemiddelde ozonniveaus te doen laten dalen. Vanwege het niet-lineaire karakter van de ozonvorming gaan in gebieden met hoge NO_x-concentraties bij NO_x- en NMVOS-emissiereducties van minder dan 50% de gemiddelde ozonconcentraties omhoog in plaats van omlaag. Dit geldt volgens EMEP-berekeningen ook voor het grootste deel van Nederland. Pas bij emissiereducties van meer dan 60% is in het verstedelijkte gebied van Europa (de driehoek Londen-Parijs-Ruhrgebied) een verlaging van de jaargemiddelde ozonconcentraties en dagmaxima te verwachten. Er zijn echter aanzienlijke onzekerheden in zowel de emissiereducties zelf als de doorrekening van de effectiviteit ervan op de ozonniveaus. Dit zou kunnen betekenen dat in die gebieden meer emissiereductie nodig is dan wat met bestaande

technieken is te bereiken. Aanvullende structurele aanpassingen in verkeers- en vervoerssystemen zouden dan nodig zijn, zoals elektrische auto's en een verschuiving van wegverkeer naar spoor en water.

De (economische) winst van lagere ozonniveaus in Nederland en Europa ligt eerder in verminderde gezondheidsrisico's dan in vermeden schade aan gewassen. Dit ligt iets anders bijvoorbeeld in Azië waar ozon, met gewasopbrengstdervingen tot 20-30%, een direct risico voor de voedselvoorziening is. Doordat ozon bijdraagt aan een vermindering van de CO₂-opslag door bossen, kan vermindering van de ozonconcentraties bijdragen aan verlaging van de CO₂-concentraties in de atmosfeer en beperking van de daaruit voortvloeiende temperatuurstijging. Dit zou in het toekomstige Europese beleid een belangrijke rol kunnen gaan spelen.

6.7 Conclusies

- De tussendoelstellingen uit de EU-Richtlijn Nationale Emissieplafonds (NECD) van 2010 voor de vermindering van de blootstelling aan ozon van bevolking en vegetatie zijn in Nederland en de omliggende landen grotendeels gehaald.
 - Voor verlaging van piekconcentraties is emissiereductie van achtereenvolgens NO_x en NMVOS, methaan en CO de meest effectieve strategie.
 - Voor verlaging van de achtergrondconcentratie van ozon is mondiale emissiereductie van achtereenvolgens methaan, NO_x, NMVOS en CO het meest effectief.
 - De invloed die Nederland zelf kan uitoefenen op de ozonniveaus is zeer beperkt. Daling van ozonniveaus in Nederland is alleen mogelijk via internationaal beleid.
 - De grootste invloed op de komende ozonconcentraties in Nederland zal naar verwachting voortkomen uit het herziene Europese (NEC Richtlijn en UNECE Gotenburg protocol) en mondiale beleid tot 2020. Bij uitvoering van dit vastgestelde beleid zullen de piekconcentraties dalen, de jaargemiddelde ozonconcentratie in stedelijke gebieden verder stijgen en in landelijke gebieden weinig of niet stijgen.
 - De jaargemiddelde ozonconcentratie zal in stedelijke gebieden verder stijgen door een vermindering van het titratie-effect ten gevolge van de lagere NO-emissies.
 - De emissieontwikkelingen elders in de wereld zijn van belang voor de jaargemiddelde ozonconcentratie, maar niet voor de piekconcentraties in Nederland. Op basis van vastgesteld beleid zullen de emissies van NO_x, NMVOS en CO in de rest van de wereld stijgen en bijdragen aan de stijging van de jaargemiddelde ozonconcentraties.
- Toepassing van maximaal technisch haalbare reducties van de emissies van NO_x, NMVOS en CO in Europa en elders in de wereld zal tot een daling van jaargemiddelde ozonconcentratie én de piekconcentraties van ozon kunnen leiden.
 - Methaanreductie in Azië is de meest kosteneffectieve manier om de achtergrondconcentratie in Europa te verlagen.
 - Een mondiale aanpak vraagt om verbreding van de huidige onderhandelingen over grensoverschrijdende luchtverontreiniging vanuit Noord-Amerika en Azië.
 - Omdat een dalende trend in de ozonpieken na 2000 is achtergebleven bij de daling van emissies van genoemde stoffen, is er twijfel over het rendement van een verdere emissiedaling.
 - Het effect van klimaatverandering op het voorkomen van ozonpieken is nog niet duidelijk.

Referenties

- 1 Infomil. KWS2000 Eindrapportage. Den Haag:Infomil:2002.
- 2 Sliggers J, Kakebeeke W. Clearing the Air – 25 years of the Convention on Long range. Transboundary Air Pollution. United Nations:New York and Geneva:2005.
- 3 Buijsman E, Aben JMM, Hettelingh JP, Van Hinsberg A, Koelemeijer RBA, Maas RJM. Regen, een analyse van dertig jaar verzuringsproblematiek in Nederland. Planbureau voor de Leefomgeving:2010.
- 4 Holland MR, Forster D, King K. Cost benefit analysis for the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground Level Ozone in Europe. Publicatiereeks lucht & energie:nr 133:1999.
- 5 Zie onder meer Kamerstukken 29 442, nr 2.
- 6 MNP/IIASA. Review of the Gothenburg Protocol. Background document to UNECE document 'Review of the 1999 Gothenburg Protocol'. TFIAM/CIAM-report;ECE/EB.AIR/WG.5/2007/7.
- 7 Ligterink N, De Lange R, Vermeulen R, Dekker H. 'On-road NOx emissions of Euro-V trucks'. MON-RPT-033-DTS-2009-03840.TNO:2009.
- 8 Jonson J, Simpson D, Fagerli H, Solberg S. Can we explain the trends in European ozone levels? Atmos Chem and Phys. 2006;6:51-66.
- 9 Solberg S, Hov Ø, Søvde A, Isaksen I, Coddeville P, De Backer H, Foster C, Orsolini Y, Uhse K. European surface ozone in the extreme summer 2003. Journal of Geophysical Research. 2008;113, Do7307:16 pp.
- 10 Logan J. Trends in Vertical Distribution of Ozone: A Comparison of Two Analyses of Ozone Sonde Data. Journal of Geophysical Research. 1999;104:26373-26399.
- 11 Derwent RG, Stevenson DS, Doherty RM, Collins WJ, Sanderson MG, Johnson CE. Radiative forcing from-surface NOx emissions: spatial and seasonal variations. Climatic Change. 2008;88(3):385-401:doi 10.1007/s10584-007-9383-8.
- 12 Amann M, Bertok I, Cofala J, Heyes C, Klimont Z, Rafaj P, Schöpp W, Wagner F. Scope for further environmental improvements in 2020 beyond the baseline projections. Background paper for the 47th Session of the Working Group on Strategies and Review of the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Geneva. CIAM Report 1/2010. Austria:Laxenburg:August 30 – September 3 2010
- 13 Wagner F, Amann M, Bertok I, Cofala J, Heyes C. Baseline Emission Projections and Further Cost-effective Reductions of Air Pollution Impacts in Europe – A 2010 Perspective, IIASA. NEC-Scenario Analysis Report Nr 7. 27 Augustus 2010.
- 14 EEA. Impact of selected policy measures on Europe's air quality. Technical report 8. 2010B.
- 15 Referentie. Benedictow C.A. Personal communication. EMEP:2010.
- 16 TFHAP. Hemispheric Transport of Air Pollution 2010. 2010: UNECE Air Pollution Series (in print, 2010)
- 17 UNEP. Integrated assessment of black carbon and tropospheric ozone. 2009-10. February 2011
- 18 Dentener F, Stevenson D, Ellingsen K, Van Noije T, Schultz M, Amann C, Atherton C, Bell, N et al. The global atmospheric environmentfor the next generation. Environmental Science and Technology. 2006;40:3586-3594.
- 19 Szopa S, Hauglustaine DA, Vautard R, Menut L. Future global tropospheric ozone changes and impact on European air quality. Geophys Res Lett. 2006;33; L14805;doi:10.1029/2006GL025860
- 20 EEA. NEC Directive status report 2009- Reporting by the Member States under Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants. 2010A: ISBN 978-92-9213-107-4. European Environmental Agency, Copenhagen.
- 21 Van Harmelen T, Roemer M, Pesik J, Boersen G. Analysis of the potential cost savings and environmental and health implications of emission trading for sulphur and nitrogen dioxide. TNO rapport 2007-A-1256/B. Nederland, Utrecht:TNO:2007.
- 22 ENTEC. Economic Analysis to support an impact assessment of the possible establishment of EU-wide emissions trading of NO_x and/or SO₂. Final report:European Commission:December 2010.
- 23 AEA. Cost Benefit Analysis to Support the Impact Assessment accompanying the revision of Directive 1999/32/EC on the Sulphur Content of certain Liquid Fuels. AEA/ED45756/Issue 3. UK, Harwell:2009.
- 24 Emberson L, Büker P, Ashmore MR. Assessing the risk caused by ground level ozone to European forest trees: A case study in pine, beech and oak across different climate regions. Environmental Pollution. 2007:Vol. 147, Issue 3;pp.454-466
- 25 Simpson D, Ashmore M, Emberson L, Tuovinen JP. A comparison of two different approaches for mapping potential ozone damage to vegetation. A model study. Environmental Pollution. 2007:715-725.

7 Resumé

Wat is ozon?

Ozon is een gasvormige component die ook van nature in de atmosfeer voorkomt en essentieel is voor het leven op aarde. Ozon is een reactief gas en reageert dus gemakkelijk met andere stoffen.

In de stratosfeer, de laag in de atmosfeer tussen circa 10-12 en 50 km hoogte, bevindt zich de *ozonlaag*, waar ozon continu wordt gevormd en weer afgebroken. Vorming gebeurt na fotolyse van zuurstof (afbraak van zuurstof door zonlicht). Afbraak vindt eveneens plaats door fotolyse waarbij ozon UV-B straling absorbeert. De ozonlaag vormt zo een filter dat de mens en ecosystemen beschermt tegen schadelijke UV-straling van de zon.

In de troposfeer, de onderste 10-12 km van de atmosfeer, speelt ozon een veelzijdige rol. Als broeikasgas draagt het bij aan klimaatverandering. Ozon speelt daarnaast een cruciale rol in fotochemische processen in de atmosfeer, waarbij luchtverontreiniging verwijderd wordt. Zonder ozon zouden we stikken in de luchtvervuiling. Maar omdat ozon een sterk oxiderende werking heeft, leidt blootstelling aan ozon ook tot ongewenste effecten bij mensen en vegetatie.

In tegenstelling tot bijvoorbeeld zwaveldioxide of ammoniak, wordt ozon niet rechtstreeks uitgestoten, maar uitsluitend gevormd in de atmosfeer. Een zeer kleine hoeveelheid ozon wordt ook gevormd bij bliksemontladingen.

De stoffen die betrokken zijn bij de ozonvorming ('precursors') zijn stikstofoxiden (NO en NO₂, kortweg NO_x), vluchtige organische stoffen (NMVOS^a), koolmonoxide (CO) en methaan (CH₄) waarbij reacties onder invloed van zonlicht een cruciale rol spelen. De emissie van deze stoffen is zowel van antropogene als natuurlijke oorsprong. Hoge ozonconcentraties ontstaan op dagen met veel zoninstraling en wanneer de temperatuur hoog is. Als de weersomstandigheden zorgen dat de lucht blijft hangen of dat ozonrijke lucht wordt aangevoerd uit gebieden waar al veel ozon gevormd is, ontstaan hoge ozonconcentraties die ook wel ozonsmog of zomersmog genoemd wordt.

Ozonvorming

De ozonchemie is een complex geheel van reacties. Kort samengevat: vluchtige organische stoffen, koolmonoxide en methaan leiden altijd tot ozonvorming. Bij stikstofoxiden ligt dat anders. Ze zijn aan de ene kant noodzakelijk voor de vorming van ozon maar anderzijds reageert NO met ozon waarbij ozon afgebroken wordt. Deze reactie is zo snel, dat benedenwinds van NO-bronnen de ozonconcentraties verlaagd worden. Dit wordt ook wel het 'titratie-effect' genoemd. Op grotere afstand tot de bronnen overheerst weer de ozonvorming.

^a NMVOS: niet-methaan vluchtige organische stoffen

De hoeveelheid ozon in de troposfeer wordt voornamelijk bepaald door de snelheid waarmee chemische vorming en afbraak verlopen. Mondiaal gezien wordt ongeveer 10% meer ozon gevormd dan chemisch afgebroken. Hoewel in omvang enkele malen kleiner, zijn nog twee processen belangrijk voor de ozonbalans in de troposfeer: de uitwisseling met de stratosfeer en depositie. Depositie is de afbraak van ozon aan het aardoppervlak. Omdat ozon een reactieve stof is, reageert het relatief snel weg aan het oppervlak van planten en materialen.

Ruwweg de helft van de jaargemiddelde ozonconcentratie in Europa is het gevolg van biologische emissies en transport vanuit de stratosfeer. Ongeveer een kwart komt voort uit de Europese antropogene emissies en een kwart vindt zijn oorsprong in antropogene emissies uit niet-Europese bronnen.

Bij pieken in ozonconcentraties geldt dat de verhoging boven de achtergrond vrijwel geheel door Europese bronnen tot stand komt (zie Figuur 7.1). Het aandeel van CO en CH₄ daarin is relatief klein, de extra vorming van ozon is dus voornamelijk het gevolg van de Europese emissies van NO_x en NMVOS.

De verblijftijd van ozon in de lagere delen van de troposfeer is enkele dagen en daardoor wordt ozon over langere afstanden getransporteerd. Veel ozon in Nederland komt daarom uit het buitenland en andersom exporteert Nederland ook ozon.

De in Nederland uitgestoten precursors dragen ook bij aan de ozonconcentraties in het buitenland.

Modelberekeningen schatten dat de gezamenlijke bijdrage van de ozonprecursors van de landen binnen de EU (exclusief Nederland) 6 tot 8 maal zo groot is als de bijdrage van Nederland zelf. Dit betekent dat Nederland zelf maar voor een beperkt deel de eigen ozonniveaus beïnvloedt.

Hoe hoog zijn de ozonniveaus in Nederland?

De ozonniveaus in Nederland zijn vergelijkbaar met die in andere Noordwest-Europese landen. Deze ozonniveaus zijn relatief laag ten opzichte van die in Centraal en Zuid-Europa. In Zuid-Europa zorgen veel zonlicht, hoge temperaturen en stabielere weerpatronen voor aanzienlijk hogere ozonniveaus.

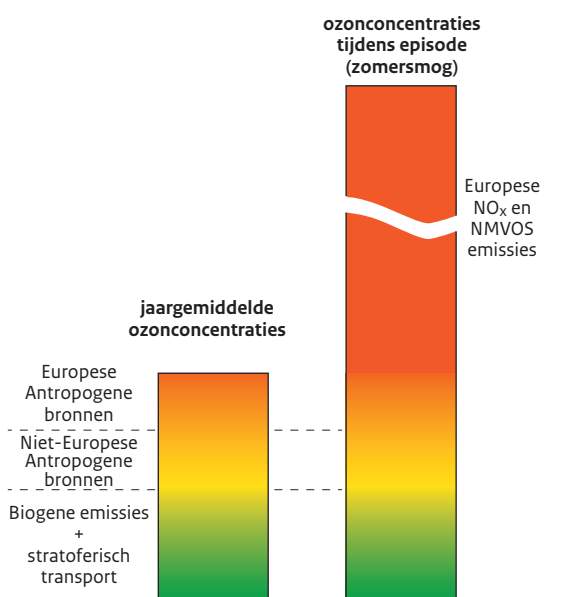
In de afgelopen drie decennia zijn de hoge ozonconcentraties in Nederland en Noordwest-Europa afgenomen. Dat komt vooral door succesvol internationaal beleid in EU- en UNECE-kader dat is gericht op de vermindering van de emissies van ozonprecursors. Dit wordt bevestigd door de afnemende trends in de gemeten concentraties van de precursors in Nederland en de ons omringende landen. Alleen de emissie van de scheepvaart laten een stijging zien.

Ernstige en matige smog waarbij het publiek ingelicht of gewaarschuwd moet worden komen tegenwoordig minder vaak voor. De niveaus van de EU-indicatoren voor de bescherming van gezondheid en natuur daalden sinds de jaren negentig van de vorige eeuw maar zijn sinds 2000 relatief constant.

Beide indicatoren voor piekniveaus zitten op landelijk niveau nu onder de streefwaarden die gesteld zijn in de EU-Luchtkwaliteitsrichtlijn uit 2008. Wel is er in recente jaren nog sprake van overschrijdingen van de EU-indicator op gezondheid in het zuiden van het land. Het is niet duidelijk waarom de daling van hoge ozonconcentraties vanaf circa 2000 niet verder heeft doorgezet. De emissies van de precursors zijn namelijk wel verder gedaald.

De jaargemiddelde concentraties van ozon nemen niet af en laten op veel meetlocaties zelfs een stijging zien. Voor de stad- en straatstations in Nederland is dat te verklaren aan de hand van lagere directe emissies van NO. Het gevolg is dat ozon in stedelijke en industriële omgeving minder wegreacteert, het zogenoemde 'titratie-effect' wordt minder. Lagere concentraties komen minder vaak voor, wat voor een belangrijk deel de stijging van de gemiddelden verklaart, vooral in de stedelijke gebieden. Er zijn dus minder pieken en dalen in ozonconcentraties dan 15 tot 20 jaar geleden. Om de trend in de achtergrond van ozon op het noordelijk

Figuur 7.1 Bijdrage van bronnen aan de ozonconcentratie voor het jaargemiddelde (links) en tijdens een zomersmog-episode.



halfroond te kunnen onderscheiden zijn metingen nodig van stations zonder directe invloed van NO_x -bronnen. In Nederland kan dat nergens. Metingen van stations in Europa in de periferie of op grotere hoogte tonen een enigszins diffuus beeld. Sommige stations tonen een opwaartse trend, andere stations laten geen of een dalende trend zien. We concluderen dat de niveaus in de jaren negentig stegen maar na 2000 ongeveer gestabiliseerd zijn.

Wat is de invloed van klimaatverandering op ozon?

Klimaatverandering kan een grote invloed op de ozonconcentraties hebben, op mondiale, regionale en lokale schaal. In principe veroorzaken hogere zoninstraling en hogere temperaturen een effectievere ozonvorming. Ook voorspellen de meeste klimaatmodellen dat de opwarming van de aarde de grootschalige circulatie in de stratosfeer zal versterken, waardoor de instroom van ozon vanuit de stratosfeer zal toenemen. Daar staat tegenover dat de afbraak van ozon in de troposfeer onder invloed van zonlicht, die vooral boven de tropische oceanen plaatsvindt, sneller zal verlopen door een hogere luchtvochtigheid.

Er is ook nog een indirect effect van klimaatverandering op ozon, bijvoorbeeld via veranderingen in de biogene emissies van NMVOS door bomen en planten en van NO_x uit de bodem en in de productie van NO_x in de hogere troposfeer door bliksem. Klimaatverandering kan ook leiden tot een afname van de depositie van ozon door een minder efficiënte opname door vegetatie tijdens perioden van droogte. Onduidelijk is hoe de frequentie en omvang van bosbranden zullen veranderen en wat het gevolg daarvan is op de ozonconcentraties.

Voor Nederland is het is aannemelijk dat de ozonpieken zullen stijgen door hogere temperaturen en doordat bomen en planten bij hogere temperaturen meer isopreen (de belangrijkste natuurlijke VOS) gaan uitstoten. Dit klimaateffect wordt gedeeltelijk of geheel gecompenseerd doordat de stijging van de CO_2 -concentratie zal leiden tot een minder snelle stijging of zelfs daling van de isopreen-emissies. Hierdoor zullen de ozonniveaus ook lager worden.

De huidige klimaatmodellen geven ook geen uitsluitel of de meteorologische condities die de vorming van hoge ozonniveaus bevorderen in de toekomst vaker dan wel minder vaak zullen voorkomen. Welk netto-effect klimaatverandering zal hebben op de trend in de ozonconcentraties is dus niet duidelijk.

Welk effect heeft ozon op klimaatverandering?

Naast de effecten van klimaatverandering op de ozonniveaus is er ook een effect van ozon op klimaatverandering.

Ozon is namelijk zelf een broeikasgas en wel het belangrijkste antropogene broeikasgas na kooldioxide en methaan. 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 halfroond in de zomer (lokaal meer dan 0,5 °C). In West-Europa inclusief Nederland is deze bijdrage in de zomer vrijwel overal minder dan 0,3 °C geweest en daarmee niet statistisch significant.

Daarnaast beïnvloedt ozon het klimaat ook op indirecte wijze. Hoge ozonconcentraties nabij het aardoppervlak kunnen leiden tot schade aan vegetatie in de vorm van een verminderde groei, wat leidt tot lagere opname van CO_2 in de biosfeer. De stralingsforcering, die samenhangt met de extra hoeveelheid CO_2 die hierdoor in de atmosfeer blijft, is mogelijk van vergelijkbare sterkte als de directe forcering door troposferisch ozon zelf.

Naast NO_x , CO en NMVOS speelt vooral methaan een essentiële rol in de stralingsforcering door ozon. Antropogene emissies van methaan zijn verantwoordelijk voor ongeveer de helft van de klimaatforcering door ozon. Aangezien methaan ook zelf een sterk broeikasgas is, is emissiereductie van methaan een effectieve manier om de opwarming van de aarde tegen te gaan.

Wat zijn de effecten van ozon op mens?

Gezondheidseffecten ten gevolge van kortdurende blootstelling aan verhoogde ozonconcentraties in de buitenlucht zijn in de literatuur uitgebreid gedocumenteerd. Voor buitenluchtconcentraties, zoals die in de westerse wereld voorkomen, zijn effecten beschreven, op de luchtwegen, op dagelijkse sterfte (levensduurverkorting) en ziekenhuisspoedopnames en, in mindere mate, op hart- en vaatziekten.

Uit epidemiologische studies is afgeleid dat in Nederland ongeveer 1300 mensen vroegtijdig sterven tengevolge van kortdurende blootstelling aan verhoogde ozonniveaus.

Tijdens een hittegolf blijken er sterkere relaties te worden gevonden tussen luchtverontreiniging en sterfte ten opzichte van reguliere zomerse dagen. Door het CBS is geschat dat in de hittegolf van 2003 tussen 1000 en 1400 mensen extra zijn overleden. Het RIVM concludeerde op basis van berekeningen dat circa 30% van deze (extra) sterfte gerelateerd kan worden aan de hogere ozonniveaus.

Voor kortdurende blootstelling zijn (inter)nationale normen vastgesteld ter bescherming van de volksgezondheid. De Europese streefwaarde voor blootstelling van de bevolking aan hoge ozonconcentraties bedraagt

120 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ voor de hoogste 8-uursgemiddelde ozonconcentratie per dag. Deze concentratie mag vanaf 2010, gemiddeld over drie jaar, niet vaker dan 25 dagen per kalenderjaar worden overschreden. De doelstelling voor de lange termijn is dat de hoogste 8-uursgemiddelde ozonconcentratie op geen enkele dag in een kalenderjaar meer boven de 120 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ komt. Deze Europese streefwaarde is hoger dan de door de WHO voorgestelde richtwaarde van 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. De WHO-richtwaarde wordt in Nederland ruim overschreden.

Gezondheidseffecten ten gevolge van chronische blootstelling aan verhoogde ozonconcentraties zijn slechts beperkt onderzocht. De beschikbare wetenschappelijke informatie is vooralsnog een onvoldoende onderbouwing voor een norm. De gepubliceerde studies sluiten ook niet uit dat er schadelijke gezondheidseffecten ten gevolge van chronische blootstelling aan de huidige ozonconcentraties kunnen optreden.

Epidemiologisch onderzoek geeft geen aanleiding om van een ozonconcentratie uit te gaan die zou kunnen worden beschouwd als een 'drempelwaarde': een waarde waar beneden geen acute nadelige gezondheidseffecten optreden.

Voor het beleid betekent dit dat (net als bij deeltjesvormige luchtverontreiniging) elke inspanning ter verlaging van de ozonniveaus zal leiden tot gezondheidswinst.

Met de toenemende vergrijzing en de verstedelijking van Nederland lijkt wetenschappelijke aandacht voor de rol van ozon bij het ontstaan of verergeren van gezondheidseffecten en het effect op levensduur steeds belangrijker te worden. De omvang van de gevoelige populatie neemt namelijk toe (met speciale aandacht voor de combinatie van hitte en ozon) en de blootstelling aan hogere achtergrondniveaus in stedelijk gebied wordt ook groter. Een betere wetenschappelijke basis is nodig om adequaat te kunnen anticiperen op deze toekomstige situaties.

Een samenvatting van de gezondheidseffecten van ozon zijn in Tabel 7.1 weergegeven.

Tabel 7.1 Samenvatting van de gezondheidseffecten van ozon.

Acute effecten	Lang- termijn effecten
Longfunctiedalingen	Afname in de longfunctiegroei
Ontstekingsreactie in de luchtwegen	
Toename luchtwegklachten	
Extra medicijngebruik	
Extra ziekenhuis opnames	
Toename dagelijkse sterfte	Afname levensduur

Wat zijn de effecten van ozon op vegetatie?

Bij planten uit het toxische effect van ozon zich door bijvoorbeeld bruinkleuring van het blad, vertraging van de groei of zelfs het afsterven van de plant. Dit heeft economische implicaties, omdat gewassen minder aantrekkelijk worden voor de consument en omdat de opbrengst van een gewas kan verminderen. Voor Nederland wordt de jaarlijkse schade door gewasderving geschat op circa 150 miljoen euro. Ook beïnvloedt ozon de soortensamenstelling en het functioneren van ecosystemen, wat ernstige gevolgen kan hebben voor de biodiversiteit.

Voor de beoordeling van de risico's van ozon voor vegetatie wordt tot nu toe een maat gebruikt waarbij de hoeveelheid ozon die aanwezig is boven een bepaalde drempel wordt gesommeerd. Deze maat voor blootstelling geeft echter geen goed beeld van de werkelijke opname van ozon, maar slechts van de potentiële opname door de plant. De hoeveelheid ozon die uiteindelijk schade zou kunnen toebrengen is afhankelijk van planteneigenschappen en een aantal omgevingsparameters, zoals de beschikbaarheid van water voor de planten. Zo beperkt droogte vooral in Zuid-Europese landen de ozonopname.

In internationaal verband (UNECE CLRTAP^b) wordt daarom een nieuwe indicator ontworpen die de opname van ozon (de ozonflux) weergeeft: Phytotoxic Ozone Dose (POD). Uit indicatieve berekeningen van deze maat komt naar voren dat de meeste effecten op vegetatie dan niet langer voornamelijk in Zuid-Europa worden verwacht, maar dat ook in Midden- en Noord-Europa een hoger risico op vegetatieschade bestaat dan op basis van bovengenoemde blootstellingsmaat te verwachten zou zijn.

Welke ozonniveaus zijn te verwachten?

De grootste invloed op de komende ozonconcentraties in Nederland zal naar verwachting voortkomen uit het herziene Europese en mondiale beleid tot 2020. In de EU

zijn dat de NEC-Richtlijn (National Emission Ceiling Directive) en de Richtlijn Industriële Emissies en mondiaal het herziene Gotenburg Protocol van de UNECE. De emissies in 2020 zijn verder sterk afhankelijk van de uitvoering van het Europese klimaat- en energiebeleid, zoals de toekomstige inzet van energiedragers (groene energie, gas, olie en kolen).

Het IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) heeft uitgerekend dat bij uitvoering van de EU-richtlijnen verdere reducties van NO_x en NMVOS in de

^b United Nations Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution.

EU27 en Nederland te verwachten zijn. Volgens dit beleid zullen de piekconcentraties van ozon dalen, al wijzen eerdere modevaluaties op een kleinere daling dan wordt berekend. De jaargemiddelde ozonconcentratie in stedelijke gebieden zou verder stijgen en in landelijke gebieden weinig of niet stijgen. De stijging van de jaargemiddelde concentraties is een gevolg van het verminderde titratie-effect en in mindere mate door een stijging van de mondiale achtergrondconcentratie.

De emissies elders in de wereld zijn van invloed op de jaargemiddelde ozonconcentratie in Nederland, en in beperkte mate op de piekconcentraties. Met het nu vastgestelde beleid als baseline, stijgen de emissies van NO_x , NMVOS en CO in de rest van de wereld en dragen zij bij aan de stijgende jaargemiddelde ozonconcentratie in Europa. Toepassing van maximaal technisch haalbare reducties in Europa en elders in de wereld zal tot een daling van de jaargemiddelde ozonconcentratie én de piekconcentraties van ozon kunnen leiden.

Het meest effectief voor de verlaging van de achtergrondconcentratie van ozon op het noordelijk halfrond is het reduceren van de mondiale emissies van achtereenvolgens methaan, NO_x , NMVOS en CO. Voor een reductie in de mondiale emissies is een verbreding van de huidige onderhandelingen over grensoverschrijdende luchtverontreiniging in Europa naar Noord-Amerika en Azië nodig. Methaanreductie in Azië is zelfs de meest kosteneffectieve manier om de achtergrondconcentratie van ozon in Europa te verlagen.

Belangrijkste conclusies

1. De afgelopen drie decennia zijn de hoge ozonconcentraties (ozonpieken) sterk gedaald. De laatste tien jaar is echter geen sprake meer van een duidelijke daling.
2. De daling is een gevolg van het succesvolle reductiebeleid voor emissies van NO_x , NMVOS en CO in Europa. De reductie in de emissies wordt bevestigd door metingen van de concentraties van NO_x , NMVOS en CO.
3. De norm ter voorkoming van nadelige effecten op de volksgezondheid, de 8-uursnorm van $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ van de EU^c, wordt gemiddeld genomen over Nederland niet overschreden. Op enkele plaatsen, voornamelijk in het zuiden van Nederland, komen wel met enige regelmaat overschrijdingen voor.
4. De langetermijndoelstelling van de gezondheidsnorm naar geen dagen overschrijding wordt in heel Nederland overschreden. Dit geldt ook voor de strengere WHO-norm voor gezondheid.
5. In Nederland vindt geen overschrijding plaats van de EU-norm ter bescherming van vegetatie voor nadelige invloeden van ozon. De aangescherpte EU-langetermijndoelstelling wordt in delen van het land wel overschreden. Enkele gevoelige gewassen zijn ook op basis van de langetermijndoelstelling niet beschermd.
6. Het jaargemiddelde ozonniveau over Nederland is in de afgelopen decennia gestegen, maar de laatste jaren is er geen duidelijke stijging meer. In stedelijk gebied stijgen de ozonniveaus nog steeds.
7. Door het ontbreken van voldoende experimenteel en epidemiologisch onderzoek bestaat nog weinig kennis over gezondheidseffecten van blootstelling aan jaargemiddelde ozonniveaus (chronische belasting van ozon).
8. De invloed die Nederland zelf kan uitoefenen op de ozonniveaus is zeer beperkt. Daling van ozonniveaus in Nederland is alleen mogelijk via internationaal beleid.
9. De grootste invloed op de komende ozonconcentraties in Nederland zal naar verwachting voortkomen uit het herziene Europese (NEC-Richtlijn en UNECE Gotenburg Protocol) en mondiale beleid tot 2020. Bij uitvoering van dit vastgestelde beleid zullen de piekconcentraties dalen, de jaargemiddelde ozonconcentratie in stedelijke gebieden verder stijgen en in landelijke gebieden weinig of niet stijgen.
10. De emissieontwikkelingen elders in de wereld zijn van belang voor de jaargemiddelde ozonconcentratie, maar niet voor de piekconcentraties in Nederland. Op basis van vastgesteld beleid zullen de emissies van NO_x , NMVOS en CO in de rest van de wereld stijgen en bijdragen aan de stijging van de jaargemiddelde ozonconcentraties.
11. Toepassing van maximaal technisch haalbare reducties van de emissies van NO_x , NMVOS en CO in Europa en elders in de wereld zal tot een daling van jaargemiddelde ozonconcentratie én de piekconcentraties van ozon kunnen leiden.
12. Methaanreductie in Azië is de meest kosteneffectieve manier om de achtergrondconcentratie in Europa te verlagen. Een mondiale aanpak vraagt om verbreding van de huidige Europese onderhandelingen over grensoverschrijdende luchtverontreiniging naar Noord-Amerika en Azië.
13. Het effect van klimaatverandering op de ozonconcentratie is nog niet duidelijk.
14. Ozon is een belangrijk klimaatgas. Van alle antropogene broeikasgassen draagt troposferisch ozon na CO_2 en methaan het meest bij aan de opwarming van de aarde.

^c In de EU-Luchtkwaliteitsrichtlijn (2008) staat dat dit niet vaker dan 25 dagen per jaar mag optreden.

15. De klimaatforcering door ozon wordt voor ongeveer de helft veroorzaakt door antropogene emissies van methaan. Aangezien methaan zelf een belangrijk broeikasgas is, is het reduceren van methaanemissies daarom een effectieve manier om de opwarming van de aarde tegen te gaan.

Aanbevelingen voor verder onderzoek naar:

- a. De effecten van chronische belasting van ozon op de mens, met name door de toenemende blootstelling aan ozon in stedelijk gebied en de vergrijzing;
- b. De gevolgen voor Nederland bij het gebruik van de nieuwe indicator voor effecten van ozon op vegetatie (de Phytotoxic Ozone Dose (POD));
- c. De gevolgen van klimaatverandering op de toekomstige ozonniveaus;
- d. De discrepantie tussen de trend in de hoge ozonconcentraties berekend met atmosferisch-chemische modellen en de trend uit waarnemingen, of met andere woorden de effectiviteit van reducties in ozonvormende stoffen op de ozon niveaus.

Begrippenlijst

AOT ₄₀ :	Accumulated Ozone above Threshold of 40 ppb (= 80 $\mu\text{g m}^{-3}$)	UNECE-(CLRTAP): United Nations Economic Commission for Europe Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution.
AOT ₆₀ :	Accumulated Ozone above Threshold of 60 ppb (=120 $\mu\text{g m}^{-3}$)	VOS: Vluchtige Organische Stoffen
EMEP:	co-operative programme for monitoring and evaluation of the long-range transmissions of air pollutants in Europe	IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
IIASA:	International Institute for Applied Systems Analysis	
ICP:	International Cooperative Programme (programmaonderdeel van de Working Group on Effects van UN-ECE-CLRTAP)	
KWS ₂₀₀₀ :	Koolwaterstoffenprogramma 2000	
NEC(D):	National Emission Ceiling (Directive)	
NMP:	Nationaal MilieubeleidsPlan	
NMVOS:	Niet-Methaan Vluchtige Organische Stoffen	
POD _x :	Phytotoxic Ozone Dose boven een drempelwaarde x van de ozonopname (uitgedrukt in mmol m^{-2})	
SOMO ₃₅ :	Sum of Ozone Means Over 35 ppb (=70 $\mu\text{g/m}^3$)	
Stralingsforcering:	De stralingsforcering is de verandering in de netto-instraling op tropopauseniveau ten gevolge van een externe verstoring, bijvoorbeeld een verandering in de concentratie van een broeikasgas (zie het laatste klimaatrapport van het Intergovernmental Panel on Climate Change voor details).	
Stratosfeer:	deel van de atmosfeer boven de troposfeer tot circa 50 km. Hier bevindt zich de ozonlaag.	
Troposfeer:	onderste deel van de atmosfeer; van aardoppervlak tot 10-12 km	

Bijlage A

Ozonindicatoren

In de evaluatie van ozonconcentraties en mogelijke effecten van ozon op mens en ecosystemen worden en zijn een groot aantal verschillende indicatoren gehanteerd. De indicatoren zijn gekozen om specifieke aspecten van de ozonfenomenologie en de mogelijke effecten te beschrijven. Hieronder worden de indicatoren uitgelegd en de onderlinge verbanden waar mogelijk aangegeven.

Indicatoren met betrekking op menselijke gezondheid

Indicatoren die het effect van ozon op de menselijke gezondheid beschrijven zijn gebaseerd op de maximale dagwaarde van het voortschrijdend 8-uurs-gemiddelde. De huidige EU-streefwaarde (maximaal 25 dagen overschrijding van 120 ug.m^{-3}) en de WHO-richtlijn (geen overschrijding van 100 ug.m^{-3}) hebben betrekking op de effecten van ozonpiekconcentraties.

SOMO35

In *integrated assessment modelling* wordt de **SOMO35**, dat is **Sum of Ozone Means Over 35 ppb**, vaak gehanteerd als maat voor effecten op de volksgezondheid.

SOMO35 is de som van alle ozonconcentraties groter dan 35 ppb (70 ug.m^{-3}) en is gedefinieerd als:

$$\text{SOMO35}_{\text{gemeten}} = \sum_i \max(0, (C_i - 70))$$

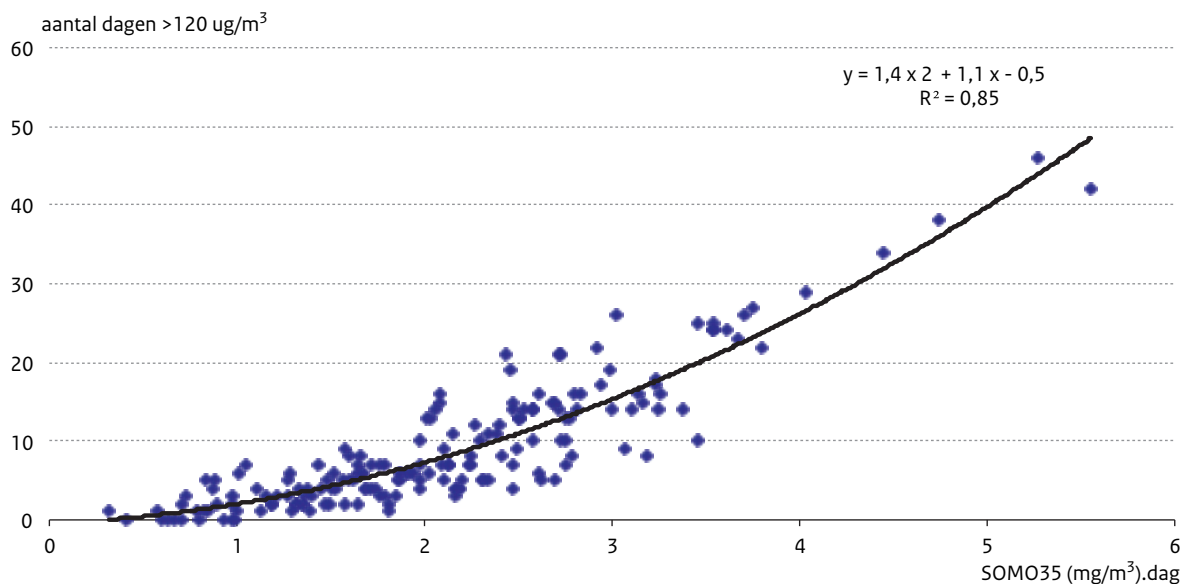
waar C_i het dag-maximum is van het voortschrijdend 8-uurs-gemiddelde; de sommatie is over alle dagen in het jaar. De eenheid van SOMO35 is $[(\text{ug.m}^{-3}).\text{dag}]$ of $[\text{ppb}.\text{dag}]$.

In Figuur A1 is het verband weergegeven tussen SOMO35 en het aantal dagen met een maximaal 8-uurs-gemiddelde van groter dan 120 ug.m^{-3} . De EU streefwaarden van maximaal 25 dagen overschrijding van 120 ug.m^{-3} komt onder Nederlandse omstandigheden overeen met een SOMO35-waarde van 3.900 ug.m^{-3} .

AOT60

De **AOT60** (uitgedrukt in $(\text{ug.m}^{-3}) \text{ uur}$) staat voor **Accumulated Ozone above Threshold of 60 ppb**. Dit is gedefinieerd als het gesommeerde verschil tussen de uurconcentraties boven 120 ug.m^{-3} (= 60 ppb) en 120 ug.m^{-3} gedurende het gehele jaar. Deze maat wordt niet meer gebruikt, maar nog wel genoemd in historische overzichten.

Figuur A1 Vergelijking tussen de SOMO35 en het aantal dagen met een maximaal 8-uurs-gemiddelde van groter dan 120 ug.m^{-3} . De analyse is gebaseerd op meetwaarden gedurende de periode 2004-2008.



Indicatoren voor effecten op vegetatie

AOT₄₀

De meest gehanteerde ozonindicator om effecten op vegetatie te beschrijven is de **AOT₄₀** (uitgedrukt in (ug.m⁻³) uur) en staat voor **A**ccumulated **O**zone above **T**hreshold of **40** ppb. De AOT₄₀ is gedefinieerd als het gesommeerde verschil tussen de uurconcentraties boven 80 ug.m⁻³ (= 40 ppb) en 80 ug.m⁻³ gedurende de maanden mei tot en met juli, waarbij uitsluitend gebruik wordt gemaakt van de uurwaarden die elke dag tussen 8.00 uur en 20.00 uur Midden-Europese tijd worden gemeten.

In formule:

$$AOT_{40} = \sum_i \max(0, (C_i - 80))$$

De maanden mei tot en met juli worden genomen, omdat dit de meest relevante periode voor gewasgroei is. De indicator wordt ook wel aangeduid met AOT_{40c}, waarbij c voor *crops* staat. Voor gewassen is in de EU een AOT₄₀ streefwaarde van 18.000 en een langetermijndoelstelling van 6.000 ug.m⁻³.h vastgesteld.

Voor ecosystemen is een soortgelijke AOT₄₀ indicator gedefinieerd, zij het nu over het hele zomerseizoen (april tot en met september). Deze indicator wordt ook wel als AOT_{40f} aangeduid, waarbij f voor *forest* staat. Voor ecosystemen is geen EU-streefwaarde gedefinieerd.

POD_x

Binnen de onderzoekswereld is er toenemende kritiek op de AOT₄₀-waarde als maat voor de schade aan vegetatie (zie Hoofdstuk 5). Een betere maat is de ozonopname door de plant gedurende een periode, **POD_x** (uitgedrukt in mmol.m⁻²) en staat voor **P**hytotoxic **O**zone **D**ose boven een drempelwaarde x van de ozonopname.

Bijlage B

IPCC-scenarios^a

IPCC long-term scenarios for changes in emissions over the 21st century

The IPCC, in its Special Report on Emission Scenarios (SRES)¹ developed four different narrative storylines to 2100 that describe the relationships between very complex dynamic systems as determined by driving forces such as demographic development, socio-economic development, and technological change. Three of these storylines (A2, B1 and B2) were recently updated by Riahi et al. (2006).² These portray baseline developments without any greenhouse gas emissions constraints. Collectively these scenarios provide an indication of the possible range of future development, but do not include any assumptions about future emissions controls.

A1 Scenario

The A1 scenario describes a future world of very rapid economic growth, global population that peaks in mid-century and declines thereafter, and the rapid introduction of new and more efficient technologies. The scenario develops into three groups that describe alternative directions of technological change in the energy system (Fossil intensive (A1FI), non fossil energy sources (A1T), or a balance across all sources (A1B).

A2 Scenario

The revised high emission A2 scenario describes a very heterogeneous world with slow convergence of fertility patterns across regions resulting in a continuously increasing global population. Economic development is primarily regionally oriented and per-capita economic growth and technological change is more fragmented and slower than in other scenarios. The more limited rates of technological change that result from the slower rates of both productivity and economic growth translate into lower improvements in resource efficiency across all sectors. Energy supply is increasingly focused on low grade, regionally available resources (ie primarily coal), with post-fossil technologies (eg nuclear) only introduced in regions poorly endowed with resources.

B1 Scenario

The revised B1 scenario describes a convergent world with low global population growth that peaks mid-century and declines thereafter to some 7 billion people by 2100. It assumes rapid changes in economic structures towards a service and information economy, with reduction in material intensity and the introduction of clean and resource efficient technologies. The emphasis is on global solutions to economic, social and environmental sustainability, including improved equity. It is assumed that per capita GDP growth is the highest of the scenarios analysed.

B2 Scenario

The revised B2 scenario anticipates a world in which emphasis is placed on local solutions to economic, social and environmental sustainability. It is a world with continuously increasing population at a moderate rate, intermediate levels of economic development and diverse technological change. The B2 scenario is characterised by 'dynamics as usual' rates of change. This scenario sits between the A2 and B1 scenarios.

Referenties

- 1 Nakicenovic N, Swart R, Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, Vries Bd, Fenhann J, Gaffin S, Gregory K, Gruebler A. Special Report on Emissions Scenarios. Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). ISBN 0-521-80493-0. Cambridge:Cambridge University Press:2000.
- 2 Riahi K, Grubler A, Nakicenovic N. Scenarios of longterm socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*. 2006;74(7):887-935.

^a Overgenomen uit Royal Society Science Report 15/08, 2008. Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications.

.....
W.A.J. van Pul | P. H. Fischer | F.A.A.M. de Leeuw |
R.J.M. Maas | D. Mooibroek | T.P.C. van Noije |
M.G.M. Roemer | A. Sterkenburg
.....

Rapport 680151001/2011

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

juni 2011