



Milieurapport Vlaanderen MIRA

Themabeschrijving
Fotochemische luchtverontreiniging

Milieurapport Vlaanderen

MIRA **Themabeschrijving** **Fotochemische luchtverontreiniging**



Coördinerend auteur

Line Vancraeynest, MIRA, VMM

Lectoren

Charlotte Vanpoucke, IRCEL, VMM

Frans Fierens, IRCEL, VMM

Laatst bijgewerkt: mei 2013

Woord vooraf

De doelstellingen van MIRA (Milieurapport Vlaanderen) zijn drieledig: (1) de wetenschappelijke basis verschaffen voor het Vlaamse milieubeleid, (2) het maatschappelijk draagvlak versterken door het verhogen van het milieu-inzicht en (3) de Vlaamse kennisbasis afstemmen op internationale standaarden. Het document Themabeschrijving wil bijdragen aan deze doelstellingen door het ter beschikking stellen van een kernachtige en toegankelijke beschrijving van de milieuthema's die door MIRA behandeld worden. Deze informatie moet de gebruiker de nodige achtergrondinformatie verschaffen bij de raadpleging van de milieu-indicatoren.

De beschrijving is gestructureerd volgens de zogenaamde milieuverstoringsketen of DPSI-R keten die de oorzaak en de gevolgen van de milieuverstoringen in beeld brengt. DPSI-R staat voor Driving Forces (maatschappelijke activiteiten), Pressure (druk), State (toestand), Impact (gevolgen) en Respons (beleidsrespons). Het document bevat zoveel mogelijk de laatste stand van zaken van de wetenschappelijke kennis.

Bronvermelding bij overname informatie

Overname van informatie uit dit document wordt aangemoedigd mits bronvermelding.

Hoe citeren?

Kort: MIRA Themabeschrijving Fotochemische luchtverontreiniging (www.milieurapport.be)

Volledig: MIRA (2013) Milieurapport Vlaanderen, Themabeschrijving Fotochemische luchtverontreiniging. Vancraeynest L., Vlaamse Milieumaatschappij, www.milieurapport.be

Inhoudsopgave

Lijst figuren	5
1 Inleiding: wat is fotochemische luchtverontreiniging?	6
2 Mechanismen van fotochemische luchtverontreiniging	6
2.1 Vorming, aanvoer en verwijdering van ozon	7
2.2 Fotochemisch evenwicht.....	7
2.3 Het belang van de titratie van O ₃ door NO: waar veel NO is, zal weinig ozon zijn	8
2.4 Ozonheuvel en ozonregimes	9
2.5 Het ozon-weekendeffect	11
3 Bronnen van ozonprecursoren	13
3.1 NO _x -emissie	14
3.2 NMVOS-emissie	14
3.3 Emissie van andere ozonprecursoren	15
4 Ozonconcentraties in de lucht	15
4.1 Ruimtelijk perspectief.....	16
4.2 Tijdspectief.....	17
5 Gevolgen van fotochemische luchtverontreiniging.....	20
5.1 Impact van troposferisch ozon op de volksgezondheid	20
5.2 Impact van troposferisch ozon op vegetatie	21
5.3 Impact van troposferisch ozon op materialen	23
6 Verbanden met andere thema's	23
6.1 Troposferisch ozon versus stratosferisch ozon (aantasting van de ozonlaag)	23
6.2 Fotochemische luchtverontreiniging en klimaatverandering	24
6.3 Fotochemische luchtverontreiniging en verzuring & vermesting.....	24
6.4 Fotochemische luchtverontreiniging en zwevend stof	24
6.5 Zomersmog versus wintersmog.....	24
Referenties	26
Lijst met relevante websites	27
Begrippen	27
Afkortingen.....	28
Scheikundige symbolen.....	28
Eenheden.....	29

Lijst figuren

Figuur 1: Schematische voorstelling van fotochemische ozonvorming uit de emissies van NO _x en van NMVOS onder invloed van zonlicht en hoge temperaturen	6
Figuur 2: Samenvattende voorstelling van fotochemische vorming en afbraak van ozon in de omgevingslucht, met visualisatie van het belang van de ozontitratie door NO	8
Figuur 3: Relatie tussen de NO-jaargemiddelde concentratie en de O ₃ -jaargemiddelde concentratie (België, 2004-2008)	9
Figuur 4: Het verband tussen ozon en zijn precursoren: het ozon isopleten-diagram of 'ozonheugel'	10
Figuur 5: Genormaliseerde daggemiddelde concentraties van ozon, stikstofdioxide en oxidant voor elke dag van de week, gemiddeld in 6 stedelijke stations (Gent, Antwerpen en Brussel)	11
Figuur 6: Weekendeffect: stijging van de gemiddelde ozonconcentraties tijdens het weekend in functie van de gemiddeld heersende NO-concentraties (Belgische meetstations, 2004-2008)	12
Figuur 7: Weekendeffect in verschillende Europese meetstations (2004-2008; UT: Stedelijk verkeer, UB: stedelijke achtergrond, RB: landelijke achtergrond)	13
Figuur 8: De 'ozon hotspot regio's' gesitueerd in het EMEP 50 x 50 km ² rooster	14
Figuur 9: Overlast boven de EU-drempelwaarden voor de bescherming van de volksgezondheid en van de bossen en vegetatie in 2003 (belEUROS-model simulatie)	16
Figuur 10: Overschrijdingen boven de EU-drempelwaarden voor de bescherming van de gezondheid in België, 2011	17
Figuur 11: Achtergrondniveau van ozon in de omgevingslucht op het einde van de 19 ^{de} eeuw (Montsouris, omgeving van Parijs) en in de tweede helft van de 20 ^{ste} eeuw (Kaap Arkona, Rügen eiland in de Baltische zee, Duitsland)	18
Figuur 12: Typisch dagverloop van de ozonconcentraties tijdens een smogepisode	20
Figuur 13: Bladaantasting door ozon	22
Figuur 14: Verschil tussen de level I-benadering (gebaseerd op AOT40 _{ppb}) en de level II-benadering (ozonflux) voor de inschatting van de impact van ozon op landbouwgewassen (Europa, 1999)	23
Figuur 15: Vergelijkend beeld van wintersmog (links) en zomersmog (rechts)	25

1 Inleiding: wat is fotochemische luchtverontreiniging?

Fotochemische luchtverontreiniging is de verontreiniging van de omgevingslucht (troposfeer) met chemische stoffen zoals ozon (O_3), peroxyacetylnitraat (PAN), stikstofdioxide (NO_2), waterstofperoxide (H_2O_2) en andere stoffen die een oxiderende werking hebben.

O_3 geldt als representatieve stof en belangrijkste component van fotochemische luchtverontreiniging. O_3 bezit een sterk oxiderend karakter en is schadelijk voor mensen, planten en materialen. Het heeft een negatieve invloed op de longfunctie, vermindert de opbrengst en de stressbestendigheid van gewassen en degradeert sommige materialen en kunstwerken.

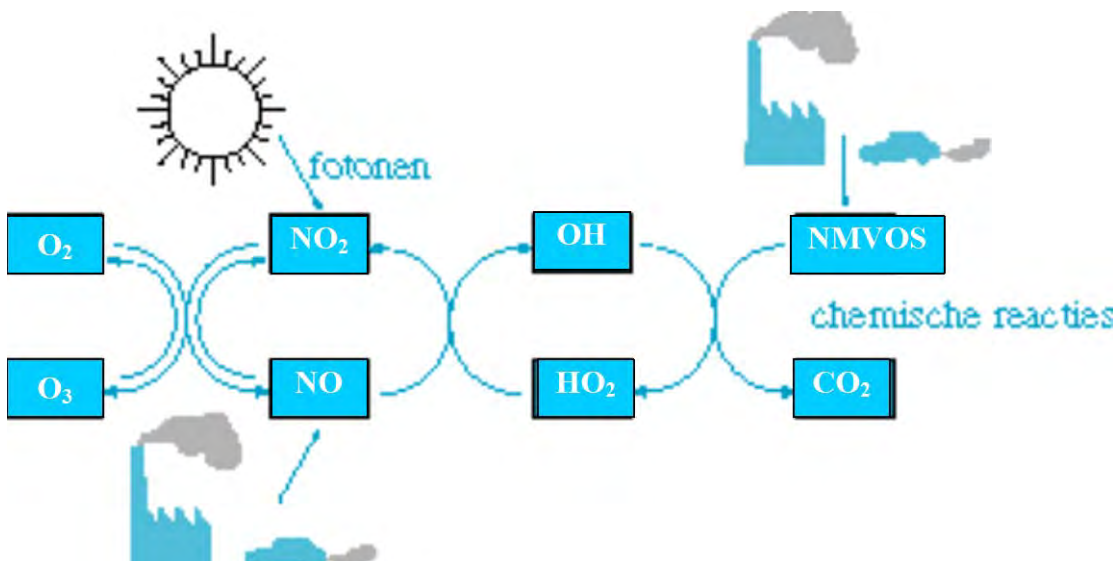
Ozon wordt niet rechtstreeks uitgestoten, maar ontstaat in aanwezigheid van stikstofoxiden (NO_x) en vluchtige organische stoffen (VOS) onder invloed van zonlicht op warme dagen. De NO_x - en de VOS-emissies zijn dus de voorlopers - ook precursoren genoemd - van de O_3 -verontreiniging. NO_x is de verzamelnaam voor NO_2 en NO en wordt gevormd door oxidatie van stikstof uit de lucht. Dit gebeurt bij verbranding op hoge temperatuur, zoals bij verbrandingsmotoren, verwarmingsinstallaties en thermische industriële processen. NMVOS (niet-methaan vluchtige organische stoffen) komen onder meer vrij door verdamping of verbranding van brandstoffen en door verdamping van oplosmiddelen. De natuur draagt eveneens bij tot de uitstoot van NMVOS, dit is de biogene uitstoot (isopreen, terpenen). Ook koolstofmonoxide (CO) en methaan (CH_4) spelen een rol in de ozonvorming.

Door de complexiteit van de fotochemische processen is er geen eenduidige relatie tussen de emissie van ozonprecursoren en de resulterende ozonvorming en dus de fotochemische luchtverontreiniging. De vorming van ozon kan optreden op plaatsen en in regio's die ver verwijderd zijn van de emissiebronnen. Ook omwille van aanvoer van ozon uit hogere luchtlagen heeft de fotochemische verontreiniging een sterk grensoverschrijdend karakter.

2 Mechanismen van fotochemische luchtverontreiniging

De fotochemische processen in de atmosfeer bestaan uit honderden complexe en niet-lineaire reacties. In figuur 1 worden schematisch enkele basisprincipes weergegeven van de ozonvorming in de omgevingslucht of troposferische ozonvorming.

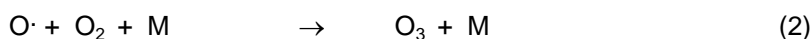
Figuur 1: Schematische voorstelling van fotochemische ozonvorming uit de emissies van NO_x en van NMVOS onder invloed van zonlicht en hoge temperaturen



Bron: naar RIVM (1991)

2.1 Vorming, aanvoer en verwijdering van ozon

Ozon wordt in de omgevingslucht gevormd door inwerking van UV-licht ($h\nu$: fotonen) op stikstofdioxide (NO_2). De vereiste meteorologische omstandigheden hiervoor zijn zonlicht en hoge temperatuur. In een eerste stap wordt daarbij stikstofmonoxide (NO) en een vrij zuurstofradicaal ($\text{O}\cdot$) gevormd. In een tweede stap (een gasfase proces) vormt het vrije radicaal samen met zuurstof het ozon, waarbij het specifieke symbool 'M' de regeling van de energiebalans in de reactie voorstelt (reacties links in figuur 1).



Naast de plaatselijke vorming en opslag van ozon in de omgevingslucht, kan ook ozonaanvoer uit andere gebieden en vanuit hogere lagen van de atmosfeer de concentratie aan de grond aanzienlijk opdrijven.

Ozon verdwijnt uit de omgevingslucht voornamelijk door omzetting naar andere componenten uit het fotochemisch evenwicht (reactie 4 uit 2.2), maar ook rechtstreeks door uitregenen, door droge depositie op de bodem en door afzetting en absorptie door de gewassen. Tot slot breekt ozon ook gemakkelijk af aan oppervlakken en aan zwevende deeltjes.

2.2 Fotochemisch evenwicht

Ozon zal door reactie met NO terug afgebroken worden waarbij opnieuw stikstofdioxide ontstaat:

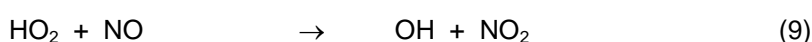


Globaal stelt er zich daardoor een evenwicht in tussen enerzijds de vormingsreacties en anderzijds de afbraakreacties:



Reacties van NO , O_3 en NO_2 (reacties 1 tot 4) bepalen de concentratie van O_3 in een absoluut niet-verontreinigde atmosfeer. Afhankelijk van de beginvoorwaarden zou die in dit hypothetisch geval beperkt blijven tot een 10-tal $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

In aanwezigheid echter van luchtverontreiniging, meer bepaald van reactieve koolwaterstoffen (NMVOS) wordt enerzijds een supplementaire productie van NO_2 aangemaakt en wordt anderzijds de afbraak van ozon door NO (reactie 3) sterk afgeremd. Dit resulteert in een netto aangroei van ozon. De processen die het extra ozon aanmaken zijn complex en betreffen wel honderden soorten NMVOS (in vergelijking 5 voorgesteld als RH), radicalen en NO_x . Schematisch kunnen ze als volgt voorgesteld worden (reacties rechts in figuur 1):



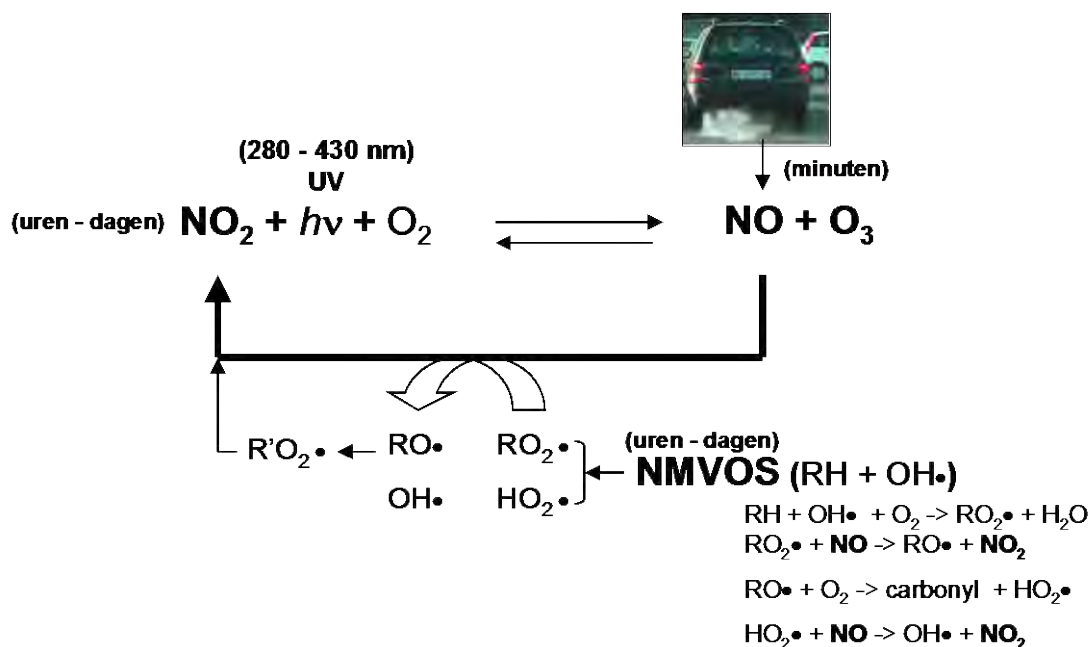
met OH = hydroxylradicaal; RO_2 = alkylperoxyradicaal; RO = alkoxyradicaal; R = alkylradicaal; HO_2 = hydroperoxyradicaal; RH = vluchtige koolwaterstoffen (bv. alkanen, alkenen, aldehyden en andere).

In reacties 5 en 6 worden de vluchtige organische stoffen door hydroxylradicalen in de lucht (OH) geoxideerd tot peroxyradicalen (RO₂). In reacties 7, 8 en 9 wordt NO door deze peroxyradicalen geoxideerd tot NO₂ en zo wordt NO₂ geregenereerd zonder tussenkomst van ozon. Aangezien de OH-radicalen in de lucht via reactie 9 geregenereerd worden is het geheel een katalytische cyclus waarbij vele ozonmoleculen gevormd kunnen worden uit de oxidatie van een enkele organische koolwaterstof. De geproduceerde HO₂ en RO₂ radicalen zetten NO terug om tot NO₂ (in reacties 7 en 9). Hierdoor is dit NO niet meer beschikbaar voor de ozonafbraak (in reactie 4), wat samen met de regeneratie van NO₂ een netto verhoging van de ozonconcentraties in de omgevingslucht veroorzaakt.

2.3 Het belang van de titratie van O₃ door NO: waar veel NO is, zal weinig ozon zijn

Het fotochemisch evenwicht tussen ozon en stikstofdioxide (reactie 4), is sterk beïnvloed door de eventueel overmatige aanwezigheid van stikstofmonoxide (NO). Hoe groter de voorraad aan NO, hoe sterker de afbraak (titratie) van ozon door NO zal plaatsvinden.

Figuur 2: Samenvattende voorstelling van fotochemische vorming en afbraak van ozon in de omgevingslucht, met visualisatie van het belang van de ozontitratie door NO

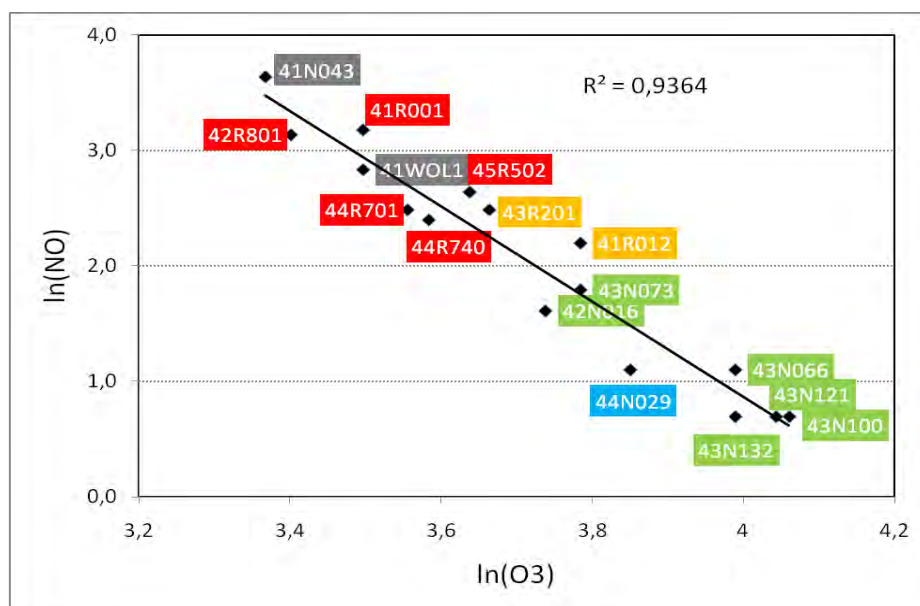


Bron: IRCEL

In figuur 2 wordt tussen haakjes de levensduur van NO, NO₂ en NMVOS in de vrije omgevingslucht aangegeven. Wegens de relatief korte levensduur van NO is de titratie van O₃ door NO het sterkst dicht bij de bron van NO (dicht bij de uitlaatgassen bv. in de binnenstad). Op verder afgelegen (bv. landelijke) plaatsen is die titratie al veel minder sterk en wordt ozon dus minder sterk afgebroken. Daarom zijn de ozonconcentraties in de verkeersdrukte binnenstedelijke gebieden lager dan deze op het platteland, maar de concentraties aan stikstofdioxide zijn in de steden dan wel hoger.

In onze streken wordt de gemiddelde ozonconcentratie in hoge mate bepaald door de ozonafbraak of met andere woorden door de gemiddelde concentratie aan NO. Figuur 3 toont het tegengesteld verband aan tussen de (logaritmen van) de concentraties aan NO en O₃ in 16 meetstations in België. Uit deze figuur blijkt dat bij meetstations waar hogere NO-concentraties gemeten worden (bv. grijsgekleurde verkeersstations en bepaalde roodgekleurde stedelijke stations) de gemiddelde ozonconcentraties lager zijn. De log-schaal weerspiegelt de niet-lineariteit tussen de emissies en de ozonconcentraties.

Figuur 3: Relatie tussen de NO-jaargemiddelde concentratie en de O₃-jaargemiddelde concentratie (België, 2004-2008)



Bron: IRCEL

Voorbeelden hiervan zijn de meetstations op verkeersdrukke plaatsen in 41WOL1 (Sint-Lambrechts-Woluwe) of 41N043 (Haren) (grijsgekleurde meetstations) en in de binnensteden 42R801 (Borgerhout) (roodgekleurde meetstations). Op achtergrondplaatsen met relatief weinig verkeer (bv. in de Ardennen of in de polders aan zee) liggen de gemiddelde ozonconcentraties hoger (bv. groen- en blauwgekleurde meetstations). Daartussen liggen de stedelijke stations waarvan de stedelijke achtergrondstations (bv. oranjegekleurd meetstation 41R012 te Ukkel) meer naar de landelijke situatie neigen.

Deze omgekeerde verhouding tussen NO en O₃ wordt ook waargenomen op een zelfde plaats maar op verschillende tijdstippen. In de steden gaat op feestdagen en in het weekend (met minder autoverkeer en dus met minder NO-uitstoot) het fotochemisch evenwicht ook eerder de andere kant op en verhogen de ozonconcentraties er. Dit fenomeen, dat zowel uit de metingen als uit modelberekeningen blijkt, wordt het 'ozon weekendeffect' genoemd (zie 2.5).

Die omgekeerde NO - O₃ correlatie is overigens de basis voor een ruimtelijke interpolatietechniek die sinds 2004 in routine (zie <http://www.irceline.be>) wordt toegepast voor de aanmaak van kaartjes met ozongegevens: de RIO^{®1} interpolatietechniek (Hooyberghs et al., 2006, Janssen et al., 2008). In dit interpolatieschema worden de ozonmeetwaarden eerst omgezet tot ozonwaarden die onafhankelijk zijn van de lokale situatie, waaronder de lokale NO-concentratie. Dit gebeurt in de 'de-trending'-stap waarbij de lokale invloed bepaald wordt aan de hand van de correlatie die er bestaat tussen lange tijdsreeksen van concentraties en het landgebruik. De ruimtelijk homogene data worden dan via Kriging ruimtelijk geïnterpoleerd naar de 4 x 4 km roostercellen in België. Daarna wordt voor elke roostercel de lokale invloed (dus de lokale NO status) terug toegevoegd. Dit gebeurt in de re-trending-stap.

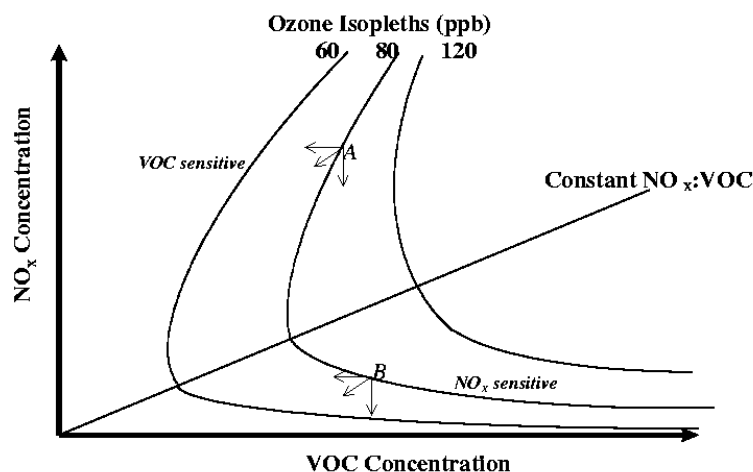
2.4 Ozonheuveld en ozonregimes

Door de manier waarop ozon gevormd wordt is het een secundaire verontreiniging: het wordt immers niet direct door de mens in de atmosfeer gebracht maar wordt er gevormd op basis van NO_x en VOS. Het verband echter tussen de hoeveelheid ozon die gevormd wordt en de

¹ RIO (Ruimtelijke Interpretatie Ozondata) is een Vito product ontwikkeld in opdracht en onder beheer van VMM (2004)

aanvankelijk aanwezige concentraties aan NO_x en VOS, is absoluut niet lineair evenredig. Dit verband wordt het best beschreven in een ozonisopletendiagram, zoals in figuur 4.

Figuur 4: Het verband tussen ozon en zijn precursoren: het ozonisopletendiagram of 'ozonheuvel'



Bron: Keating & Farrell (1999)

In de figuur wordt de aanvankelijke concentratie aan NO_x in de y-as uitgezet tegen de aanvankelijke concentratie aan VOS in de x-as. De isoplethcurves tonen dan de verschillende maximum ozonconcentraties voor elke combinatie van NO_x en VOS.

Men kan zich dit diagram het best in drie dimensies voorstellen als een heuvel waarbij de ozonconcentraties langs de verticale as worden uitgezet. De isoplethen vormen dan als het ware hoogtelijnen.

Het isoplethendiagram kan worden onderverdeeld in twee gebieden op basis van de heuvelkamlijn die de punten met de grootste buiging van elke isopleth onderling verbindt. Vaak is dit een lijn die een constante NO_x :VOS verhouding volgt. Onder deze lijn in figuur 4 is de ozonvorming 'NO_x-gevoelig': dit betekent dat vermindering van de NO_x -concentraties ook onmiddellijk een vermindering van ozon met zich meebrengt. Dit wordt geïllustreerd door op punt B in het diagram de verticale pijl naar beneden te volgen. Boven de kamlijn bevindt zich het 'VOS-gevoelig' gebied. In dit gebied (bv. punt A) leidt een vermindering van VOS-concentratie wel altijd tot een vermindering van ozon (horizontale pijl naar links) maar een geringe vermindering van de NO_x -concentratie (verticale pijl naar beneden) leidt hier uitgesproken naar een hogere isopleth, naar meer ozon dus. In het VOS-gelimiteerd regime worden de ozonconcentraties in grote mate bepaald door de ozonafbraak door het in grote mate aanwezige NO , in tegenstelling tot het NO_x -gelimiteerd regime, waar de ozonproductie de belangrijkste factor is. Om tot een effectieve daling van de ozonproductie te komen in het 'VOS-gelimiteerd' gebied moet de NO_x -concentratie helemaal tot over de kam heen dalen tot in de andere flank: het 'NO_x-gelimiteerd' gebied. Beide zijden van de ozonheuvel stellen een verschillend ozonregime voor met duidelijk verschillende vereisten voor een ozonreductiestrategie.

Het is belangrijk om te beseffen dat het isoplethendiagram uit figuur 4 specifiek gebonden kan zijn aan een bepaalde plaats en aan specifieke meteorologische en seizoensomstandigheden. Optimale ozonbestrijdingsstrategieën kunnen dus verschillend zijn naargelang de plaats en het seizoen. In uitgestrekte verkeersarme (weinig NO_x) streken in Zuid-Europese landen met veel beplantingen (met 's zomers veel natuurlijke VOS-emissies) geldt een NO_x -gelimiteerd ozonregime. Ozonbestrijding daar is dan wel gebaat door zelfs geringe vermindering van de NO_x -uitstoot. In een bepaalde staat in de USA geldt zelfs een ander weekendeffect tijdens de zomer (minder ozon op zondag) dan in de rest van het jaar (meer ozon op zondag) en dit omwille van verandering van ozonregime door grotere (natuurlijke) VOS-uitstoot in de zomer.

Vlaanderen, samen met de in een straal van enkele honderden kilometers omringende regio's (zie deel 3 Bronnen van ozonprecursoren: 'hot spot regio's') ligt wegens de relatief grote NO_x -concentraties, uitgesproken in het VOS-gelimiteerde ozonregime (bovenste helft in figuur 4). Dalingen in de NO_x -concentraties kunnen er een stijging van de ozonwaarden als gevolg hebben (zie volgend deel 2.5 'ozon-weekendeffect'). Nog verdere stijging van de NO_x -

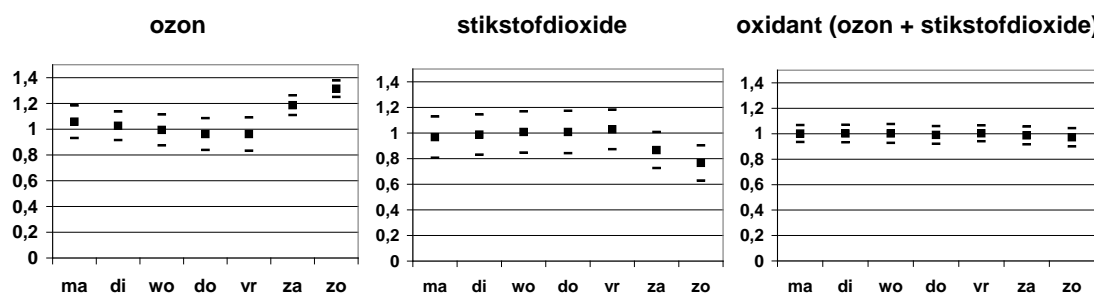
concentratie daarentegen (bv. in binnensteden) kan hier aanleiding geven tot lagere ozonwaarden: uit de metingen blijkt effectief dat de ozonconcentraties in onze steden lager zijn dan op het platteland.

2.5 Het ozon-weekendeffect

Reducties van de NO_x -emissies kunnen aanleiding geven tot een stijging van de ozonconcentraties in een regio met een VOS-gelimiteerd ozonregime. Dit wordt gedemonstreerd door het ozon-weekendeffect: hoewel er tijdens het weekend minder uitstoot is van precursoren (ongeveer 30 % minder emissies door het verkeer) is er in de steden meer ozon.

Figuur 5 toont aan hoe op zaterdag en zondag de daggemiddelde ozonwaarden 20 % tot 35 % hoger liggen dan tijdens de werkdagen (de concentraties zijn genormaliseerd op die gemiddelde waarde tijdens de werkdagen). Daarentegen is op weekenddagen tussen 15 % en 25 % minder stikstofdioxide in de stadslucht. Deze bevindingen zijn gebaseerd op lange tijdreeksen in 6 stadstations te Gent, Antwerpen en Brussel, over een periode van gemiddeld 5 jaar voor ozon en 15 jaar voor stikstofdioxide. Gelijkaardige bevindingen zijn opgetekend voor een set van een 100-tal steden over geheel Europa (de Leeuw, 2001).

Figuur 5: Genormaliseerde daggemiddelde concentraties van ozon, stikstofdioxide en oxidant voor elke dag van de week, gemiddeld in 6 stedelijke stations (Gent, Antwerpen en Brussel)



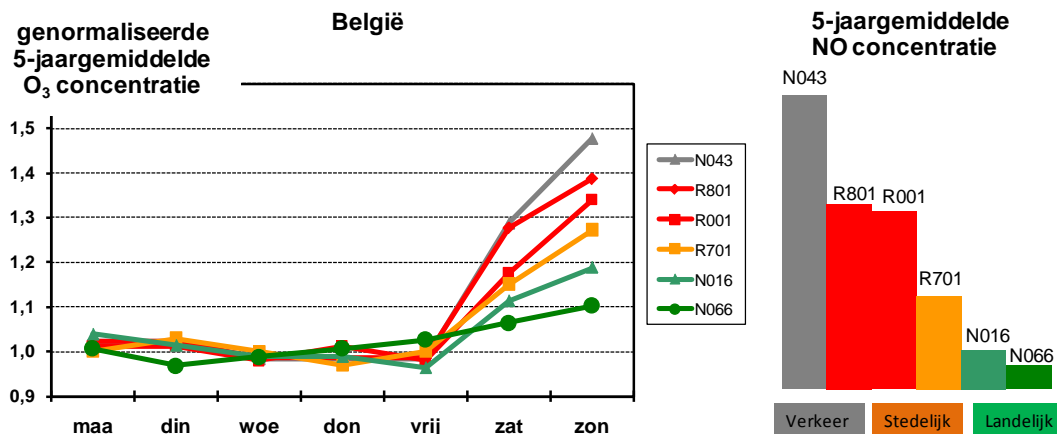
De foutenmarges geven het gemiddelde plus en min 1 standaardafwijking weer.

Bron: IRCEL

De verklaring van dit fenomeen ligt in het feit dat ozon wegreaageert met NO afkomstig van wegverkeer, waarbij NO_2 vrijkomt. De weekendverhoging van ozon is dus een gevolg van een verminderd wegreaageren ervan met NO , omdat er dan minder verkeer is. De daling tijdens het weekend van NO_2 (centrale deel in figuur 5) is het gevolg van verminderde uitstoot en van het verminderd wegreaageren van ozon tot NO_2 . In feite is het weekendeffect een verschuiving van het fotochemisch evenwicht tussen NO_2 en O_3 in de richting van ozon, wat duidelijk blijkt uit het feit dat hun som (oxidant) gelijk blijft.

Zoals reeds vermeld in 2.1 is de sterkte van het weekendeffect afhankelijk van de hoeveelheid NO in de lucht. Dit wordt duidelijk in onderstaande figuur 6 die voor verschillende types van Belgische stations (verkeer, stedelijk en landelijk) aangeeft hoe de ozonconcentraties relatief meer stijgen tijdens het weekend naargelang er gemiddeld meer NO aanwezig is: het meest in de verkeersstations, die dan ook het grootste weekendeffect vertonen. Ook in landelijke gebieden, waar er veel minder NO aanwezig is, blijft het weekendeffect zichtbaar, zij het in mindere mate.

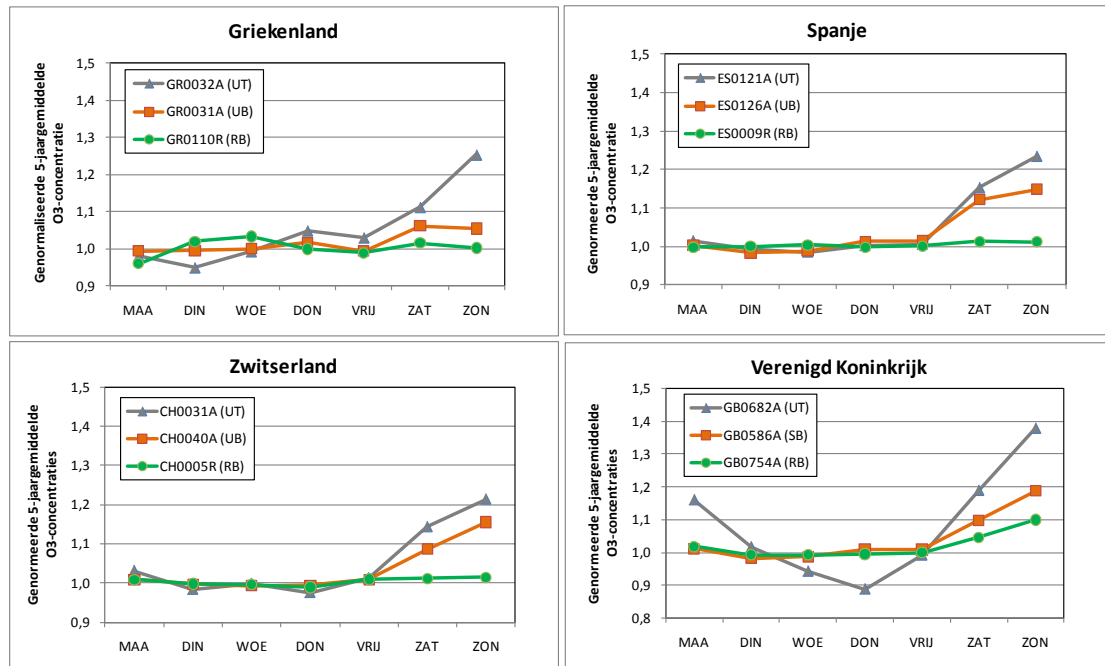
Figuur 6: Weekendeffect: stijging van de gemiddelde ozonconcentraties tijdens het weekend in functie van de gemiddeld heersende NO-concentraties (Belgische meetstations, 2004-2008)



Bron: IRCEL

Het voorkomen van het weekendeffect hangt samen met het ozonregime dat in de regio geldig is. In het NO_x-gelimiteerde regime (onderste helft in het ozonisopleendiagram, figuur 4) is er niet langer een overschot aan NO_x-uitstoot en zal de productie van ozon een dominante rol spelen in vergelijking met de afbraak ervan in het VOS-gelimiteerd regime. Dit betekent dat een verminderde uitstoot van NO_x en VOS hier niet zal leiden tot een toename in ozonconcentraties. In het NO_x-gelimiteerde regime zal er dus geen weekendeffect zichtbaar zijn. In figuur 7 wordt dit geïllustreerd voor een aantal Europese landen. Deze figuur is analoog aan figuur 6 met voor elk land de ozonconcentraties gemiddeld over 5 jaar (2004-2008), genormaliseerd op het gemiddelde van de weekdagen voor telkens 3 types stations. In alle getoonde verkeers- en stedelijke meetstations treedt het weekendeffect op. Voor de Zuid-Europese landen Spanje en Griekenland en in Zwitserland is dit effect minder groot dan voor België en het Verenigd Koninkrijk. Daarnaast is er in België en het VK ook een weekendeffect zichtbaar in de landelijke meetstations, terwijl dit voor Spanje, Griekenland en Zwitserland niet het geval is. Men zou hieruit kunnen afleiden dat deze laatstgenoemde landen, met uitzondering van de stedelijke en verkeersrijke gebieden, zich in het NO_x-gelimiteerde regime bevinden.

Figuur 7: Weekendeffect in verschillende Europese meetstations (2004-2008; UT: Stedelijk verkeer, UB: stedelijke achtergrond, RB: landelijke achtergrond)



Bron: <http://www.eea.europa.eu/themes/air/airbase/>

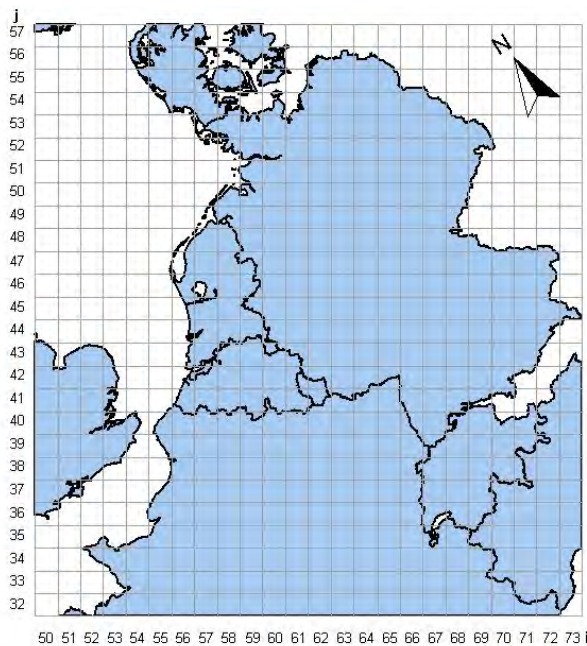
3 Bronnen van ozonprecursoren

Omdat de emissies van de precursoren NO_x en NMVOS vooral verantwoordelijk zijn voor de lokale ozonproductie en de emissies van CO en CH₄ door hun grotere transportafstanden eerder belangrijk zijn voor de ozonachtergrondconcentratie kunnen ze ook als drukindicatoren gelden voor de fotochemische luchtverontreiniging.

Bij de bespreking van de druk (P), het tweede element uit de DPSIR-milieuverstoringsketen, moet voor de fotochemische verontreiniging een belangrijke opmerking zoniet een afwijking, gemaakt worden. In deel 2 'Mechanismen van fotochemische luchtverontreiniging' is aangetoond dat de relatie tussen druk en toestand bij de ozonvorming -omwille van de rol van de ozontitratie door NO- helemaal niet lineair is, in sommige omstandigheden zelfs omgekeerd evenredig. Bij een vermindering van (een element uit) de druk kan de toestand verergeren.

Daarbij komt nog dat de toestand van de fotochemische verontreiniging in Vlaanderen in zeer grote mate bepaald wordt door de druk die ontstaat door emissies van precursoren die buiten de eigen gewestgrenzen worden uitgestoten. Bovendien wordt ozon zelf ook grensoverschrijdend getransporteerd in de hogere lagen van de troposfeer. Omdat de ozonsituatie in de Midden-West-Europese regio's een zeer vergelijkbare samenhang van fenomenen vertoont (wegens sterk vergelijkbare verkeers- en bevolkingsdichtheden, economische activiteiten en ook meteorologie) is een gebied afgebakend als 'hotspot regio's'. De meeste van die regio's (met uitzondering van Zwitserland) kennen het VOS-gelimiteerde ozonregime (relatieve overheersing van de NO_x-concentraties). Omwille van het grensoverschrijdend karakter van ozon en zijn voorlopers zijn de emissies van NO_x en NMVOS in die hotspot regio's van belang voor de ozonvorming in België.

Figuur 8: De 'ozon hotspot regio's' gesitueerd in het EMEP 50 x 50 km² rooster



Figuur 8 toont de ozon 'hotspot regio's' waarvan de NO_x en NMVOS-emissies van belang zijn voor de ozonvorming in België. Het betreft de landen van de Benelux, Denemarken, Duitsland, Zwitserland, Noord-Italië met de Milaan en Turijn regio's, de noordelijke helft van Frankrijk en East-End in de UK met inbegrip van de grote Londense regio.

Bron: EMEP (<http://www.ceip.at/>)

Omdat de ozonprecursoren NO_x, NMVOS, CO en methaan een verschillend aandeel in de troposferische ozonvorming hebben wordt een gewogen som van de precursoren gebruikt. De gewichten in de som zijn gebaseerd op het troposferisch ozonvormend potentieel (TOFP) van elke precursor. In die som worden de emissies van NO_x eerst met 1,22 vermenigvuldigd, CO met 0,11 en CH₄ met 0,014 en de som wordt uitgedrukt in NMVOS-eenheden (de Leeuw, 2002).

3.1 NO_x-emissie

NO_x is de verzamelnaam voor NO₂ en NO en wordt gevormd door oxidatie van stikstof uit de lucht bij hoge temperaturen. Dit gebeurt bij verbranding in verbrandingsmotoren, verwarmingsinstallaties en bij thermische industriële processen (zoals thermische elektriciteitscentrales op kolen, olie of gas, cementovens en hoogovens voor staalproductie).

NO_x wordt in Vlaanderen voor zowat de helft door het wegverkeer uitgestoten. Daarenboven stoten dieselwagens meer NO_x uit dan benzine wagens. De verdieselijking van het personenwagenvoertuigpark heeft bijgevolg een negatieve invloed op de NO_x-emissie.

De sectoren energie en industrie leveren een vergelijkbaar aandeel tot de NO_x-emissie.

3.2 NMVOS-emissie

De industriële sector heeft het grootste aandeel in de NMVOS-emissie. Belangrijkste bron is de petroleumsector, die grondstoffen produceert voor de chemische industrie en brandstoffen aanmaakt voor transport, gebouwenverwarming en industriële verbrandingsprocessen. Ook het gebruik van organische oplosmiddelen in bepaalde verven, vernissen en producten voor het overspuiten van voertuigen leidt tot NMVOS-emissies. Hieraan wordt verholpen door de omschakeling naar solventarme producten en de implementatie van lekdetectie en -herstelprogramma's.

Transport draagt bij aan de NMVOS-emissie door verbranding en verdamping van brandstoffen. Deze emissie daalde sterk in het laatste decennium, wat onder meer te danken is aan het aanscherpen van de milieunormen voor voertuigen. De invoering van katalysatoren leidde tot een emissiedaling van 75 tot 90 %. Ook het afnemende aandeel benzine wagens

speelt een rol: vermits diesel 5 tot 10 maal minder vluchtig is dan benzine zijn de NMVOS-emissies van diesel minder belangrijk dan deze van benzine. De keerzijde van de verdieselijking van het personenwagenpark is de hogere emissie van NO_x , die naast de rol in de fotochemische luchtverontreiniging ook een rol speelt in de verzuring (zie deel 6 Verbanden met andere thema's).

De sector energie heeft een geringere bijdrage tot de NMVOS-emissie. De emissie van NMVOS bij stookinstallaties is te wijten aan een onvolledige verbranding van de brandstof, en wijst dus op een slechte verbranding. Door de verbrandingscondities (temperatuur, verblijftijd) aan te passen kunnen deze stookemissies teruggedrongen worden.

Huishoudelijke activiteiten dragen bij aan de NMVOS-emissie door het gebruik van solventhoudende producten zoals lijmen, verven, reinigingsmiddelen. Ook de stockage en verbranding van fossiele brandstoffen zorgen voor NMVOS-emissies. In de sector handel & diensten werden de NMVOS-emissies van de benzinestations vanaf 1990 sterk teruggedrongen d.m.v. damprecuperatie.

Ook de natuur stoot NMVOS uit. De belangrijkste biogene VOS zijn isopreen (C_5H_8) en de terpenen ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}$) afkomstig van bossen en andere planten. Niet alleen in Zuid-Europese landen maar ook in West-Europa kunnen de biogene VOS in de zomermaanden een belangrijke bijdrage leveren aan de ozonvorming.

3.3 Emissie van andere ozonprecursoren

Ook methaan (CH_4) en koolstofmonoxide (CO) spelen een rol in de ozonvorming en worden bijgevolg mee opgenomen in de totaalsom van ozonprecursoren. De belangrijkste antropogene bronnen van CH_4 zijn stortplaatsen, voedselvertering door runderen en productie en distributie van fossiele brandstoffen. Natuurlijke CH_4 -bronnen zijn bijvoorbeeld drassige moerasgebieden. CO ontstaat onder meer door onvolledige verbranding van koolstof, fossiele brandstoffen of andere brandbare koolstofverbindingen. CO is aanwezig in uitlaatgassen en komt vrij bij industriële activiteiten (zoals olieraffinaderijen en verbrandingsovens). Natuurlijke CO -bronnen zijn vulkaanuitbarstingen, drassige gebieden en bosbranden. Wereldwijd zijn de emissies van CO en CH_4 toegenomen, wat een rol speelt in de toename van de ozonachtergrondconcentraties.

4 Ozonconcentraties in de lucht

Zoals beschreven in deel 2 Mechanismen van fotochemische luchtverontreiniging, is de aanwezige concentratie aan ozon en andere fotochemische oxidanten in de omgevingslucht of troposfeer het resultaat van een complex samenspel van emissies en onderlinge interactie van ozonprecursoren in Vlaanderen en erbuiten, van ozontransport over korte en lange afstanden en tussen de verschillende luchtlagen (troposfeer – stratosfeer) en van meteorologische omstandigheden.

Ozon is schadelijk voor mensen, planten en materialen (zie deel 5 Gevolgen van fotochemische luchtverontreiniging). Daarom zijn voor ozonconcentraties doelstellingen voor de bescherming van de volksgezondheid en vegetatie opgenomen in de Europese Richtlijn betreffende de luchtkwaliteit en schonere lucht voor Europa (2008/50/EG). Voor de bescherming van de bevolking op korte termijn is er ook een informatie- en alarmpiegel gedefinieerd van respectievelijk $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ozon als uurgemiddelde.

De ozonconcentraties in Vlaanderen worden opgevolgd aan de hand van een aantal toestandsindicatoren die als volgt gedefinieerd zijn:

- Aantal overschrijdingsdagen van ozon ($\text{NET60}_{\text{ppb-max8u}}$ = number of exceedances of the $60 \text{ ppb} = 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ threshold) (overschrijdingsindicator): het aantal dagen per kalenderjaar waarop de hoogste 8-uurgemiddelde ozonconcentratie van die dag groter is dan $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- Jaaroverlast van ozon ($\text{AOT60}_{\text{ppb-max8u}}$ = Accumulated exposure Over the Threshold of $60 \text{ ppb} = 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (jaaroverlastindicator): het overschot boven $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ van de

hoogste 8-uursgemiddelde ozonconcentratie per dag, opgeteld over alle dagen van een kalenderjaar;

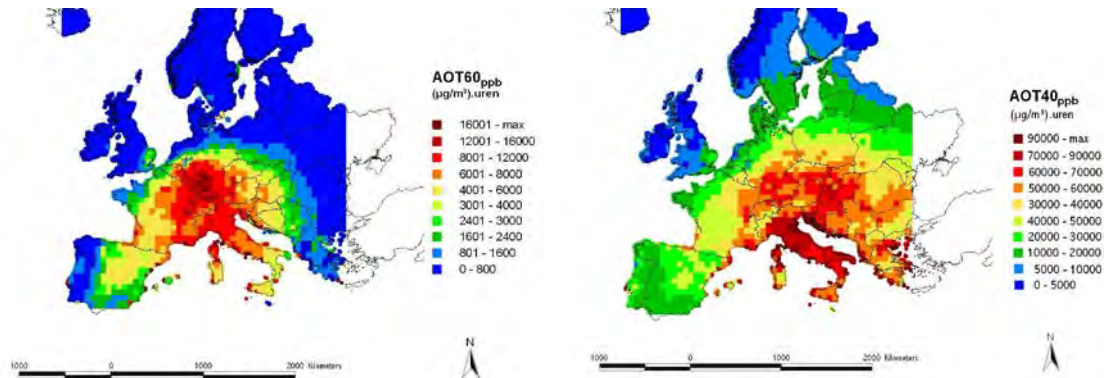
- Jaargemiddelde ozonconcentratie;
- De seizoensoverlast van ozon voor vegetatie ($AOT_{40_{ppb}}\text{-vegetatie}$ = accumulated exposure over the Threshold of 40 ppb = $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$): het overschot boven $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ van alle ozonconcentratie uurwaarden tussen 8 en 20 uur (Midden-Europese tijd) opgeteld tijdens de maanden mei, juni en juli (groeiseizoen);
- De seizoensoverlast van ozon voor bossen ($AOT_{40_{ppb}}\text{-bossen}$ = accumulated exposure over the Threshold of 40 ppb = $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$): het overschot boven $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ van alle ozonconcentratie uurwaarden tussen 8 en 20 uur (Midden-Europese tijd) opgeteld tijdens de maanden april tot en met september.

4.1 Ruimtelijk perspectief

Ozonepisodes of episodes van fotochemische verontreiniging doen zich op *subcontinentale* schaal voor. Ze zijn gebonden aan bepaalde weertypes en aan grootschalig transport van voorbeladen luchtmassa's.

Tijdens de episodes kunnen zich wel regionale en lokale verschillen aftekenen maar het blijven slechts modulaties boven op een algemeen verhoogd niveau van de fotochemische luchtverontreiniging. De modulaties kunnen te wijten zijn aan lokale fenomenen zoals land- en zeebries in kustgebieden of aan een verschil in afbraak van ozon door overmatig NO (bv. in binnensteden afkomstig van het verkeer). De subcontinentale schaal wordt geïllustreerd in figuur 9 en figuur 10. Figuur 9 toont aan dat de impact van de overlast voor de gezondheid en voor vegetatie zich over heel Europa uitstrekt.

Figuur 9: Overlast boven de EU-drempelwaarden voor de bescherming van de volksgezondheid en van de bossen en vegetatie in 2003 (belEUROS-model simulatie)



AOT₆₀_{ppb}: bedreiging van volksgezondheid

AOT₄₀_{ppb}: bedreiging van bossen en vegetatie

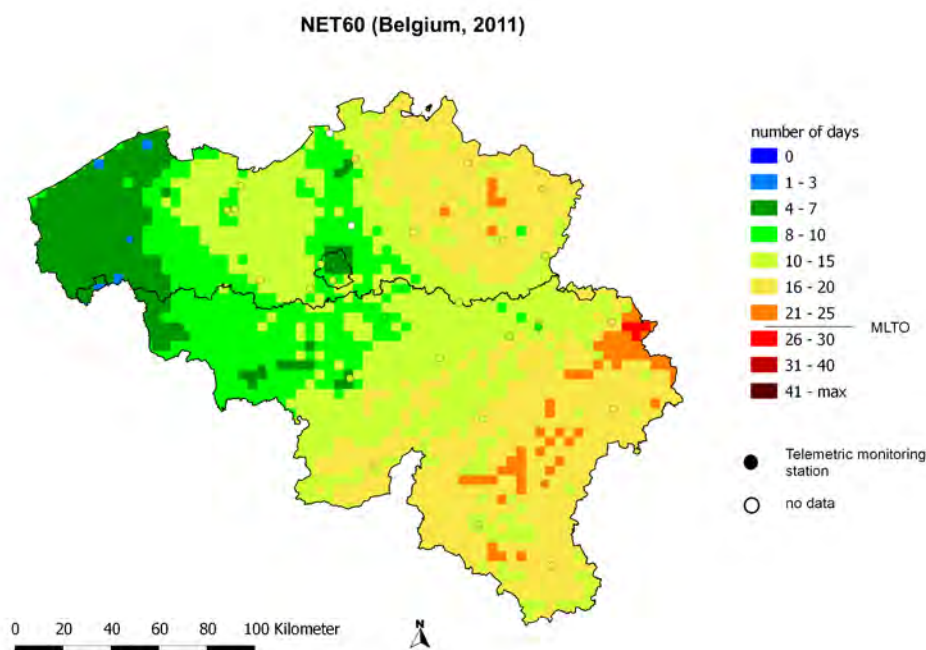
Overlast boven de EU-drempelwaarde van $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($AOT_{60_{ppb}}$) voor de bescherming van de volksgezondheid tijdens de ozonepisode van augustus 2003 (Europa, 1 augustus - 14 augustus 2003)

Overlast boven de EU-drempelwaarde van $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($AOT_{40_{ppb}}$) voor de bescherming van bossen en vegetatie (Europa, 1 april - 30 september 2003)

Bron: IRCEL, belEUROS berekening met ECMWF meteogegevens voor 2003 en emissiecijfers voor 1999

Uit de vergelijking van de impactsferen voor de volksgezondheid en voor de vegetatie (figuur 9) blijkt dat bij een situatie zoals tijdens de ozonepisode met specifieke meteorologische omstandigheden van begin augustus 2003 het epicentrum van de piekbelasting voor de gezondheid zich boven midden West-Europa bevindt, terwijl het voor de impact van de ozonoverlast voor bossen en gewassen eerder naar het zuidoosten van Europa verschuift.

Figuur 10: Overschrijdingen boven de EU-drempelwaarden voor de bescherming van de gezondheid in België, 2011



Ook in België zijn er duidelijke lokale variaties in de ozonconcentraties en afgeleide indicatoren. Figuur 10 toont een duidelijke oost-west en noord-zuid gradiënt. Ook de grote steden tekenen zich af door lagere ozonconcentraties (meer NO-titratie).

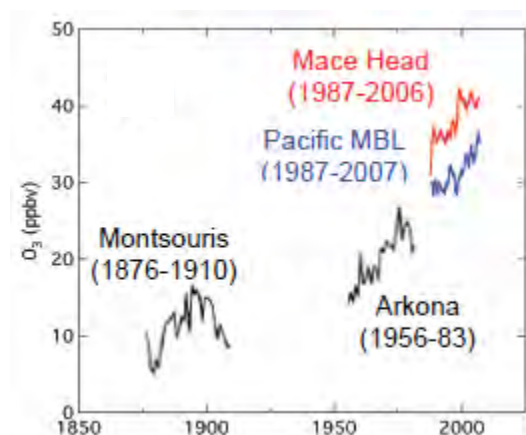
Afgezien van de smogepisodes vormt de stijgende achtergrondconcentratie in de troposfeer een probleem waarvan de oorzaken en de effecten op *mondiale* schaal gesitueerd zijn.

Ook de ozonconcentraties in de hoger gelegen laag van de atmosfeer, de stratosfeer, beïnvloeden de concentraties aan troposferisch ozon. In de stratosfeer vindt grootschalige circulatie van ozon plaats. Via de lagere stratosfeer stroomt ozon de troposfeer binnen.

4.2 Tijdspectief

De problematiek van de fotochemische verontreiniging heeft zich voor het eerst verontrustend gemanifesteerd tijdens *smogepisodes* in Los Angeles in de jaren '50. Pas later (in Europa pas aan het begin van de jaren '80) werd ook de stijging van de achtergrondconcentraties in de vrije troposfeer en in de menglaag als alarmerend ervaren.

Figuur 11: Achtergrondconcentraties van ozon in de omgevingslucht op het einde van de 19^{de} eeuw (Montsouris, omgeving van Parijs) en in de tweede helft van de 20^{ste} eeuw (Kaap Arkona, Rügen eiland in de Baltische zee, Duitsland; Pacific MBL, westkust Verenigde Staten; Mace Head, Ierse westkust)



Bron: Finlayson-Pitts & Pitts Jr. (1997), Parrish D. (2009)

Uit metingen in het Montsouris Observatorium tijdens het laatste kwart van de 19de eeuw valt af te leiden dat de ozonconcentratie aan de grond toen schommelde tussen 5 en 15 ppb (tussen 10 en 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). In de tweede helft van de 20ste eeuw lag de concentratie op Kaap Arkona al twee maal zo hoog (30 tot 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). In de laatste 20 jaar van de vorige eeuw zijn de ozonconcentraties nog verder gestegen zoals blijkt uit de mariene stations aan de westkust van de Verenigde Staten (Pacific MBL) en de metingen in Mace Head, aan de Ierse westkust.

De achtergrondconcentratie van ozon in de troposfeer (tot 10 km hoogte) bedraagt in het noordelijk halfrond nu zowat 60 à 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De ozonachtergrondconcentraties vertonen een grote seizoensale variabiliteit met een maximum in de lente en een minimum in de zomer. Verschillende studies van metingen in het noordelijk halfrond (Vingarzan, 2004; Parrish, 2012) tonen aan dat de gemiddelde ozonachtergrondconcentraties zijn gestegen tot ongeveer het jaar 2000 en sindsdien minder snel stijgen of stagneren (vooral in Europa). Metingen van de ozonachtergrondconcentraties in het meest westelijke meetpunt in Europa (Mace Head in Ierland) zijn een goede indicator voor de ozonconcentraties in de aangevoerde lucht van over de Atlantische oceaan. Ze tonen een stijgend verloop tussen 1987 en 2000 (Derwent *et al.*, 2007). Vanaf 2000 is het verloop eerder constant. De ozonachtergrondconcentratie in Mace Head is hoog in vergelijking met de achtergrondconcentratie gemeten in Vlaanderen, omdat de noord-hemisferische ozonverontreiniging door de hoge NO-uitstoot bij ons deels wordt afgebroken. De actuele jaargemiddelde waarde van ozon aan de grond in de Vlaamse achtergrondstations is gemiddeld 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (jaar 2011). Ook in Vlaanderen stagneert de jaargemiddelde ozonconcentratie de laatste jaren. Verschillende oorzaken worden aangeduid voor de stijging van de globale ozonachtergrondconcentraties. Eén van de oorzaken is de toename van de emissies van methaan en andere ozonprecursoren in het noordelijke halfrond, onder meer in Azië. Globaal gezien is de ozonvormende verontreiniging in de noordelijke hemisfeer dus toegenomen. Andere factoren die een rol spelen zijn de toename van ozontransport vanuit de lage stratosfeer (Ordonez, 2007), de toename van de scheepvaartemissies en veranderingen in de Noord-Atlantische Oscillatie wat het lange afstandstransport vanuit Noord-Amerika bepaalt. In Vlaanderen is de toename in de jaargemiddelde concentraties voornamelijk toe te wijzen aan de afname van de lokale NO_x-emissies sinds het Europese emissiereductiebeleid begin de jaren '90.

Het troposferisch achtergrondniveau zal in de toekomst grotendeels bepaald worden door de evolutie van de globale uitstoot van de emissieprecursoren en de klimaatverandering. Modellen die toekomstige ozonconcentraties trachten te voorspellen dienen hier dan ook rekening mee te houden. In een multi-model vergelijkend experiment gecoördineerd door de THAP (Task force on Hemispheric transport of Air Pollution) werden 14 globale chemische transportmodellen gebruikt om de impact van verschillende scenariomodellen op de

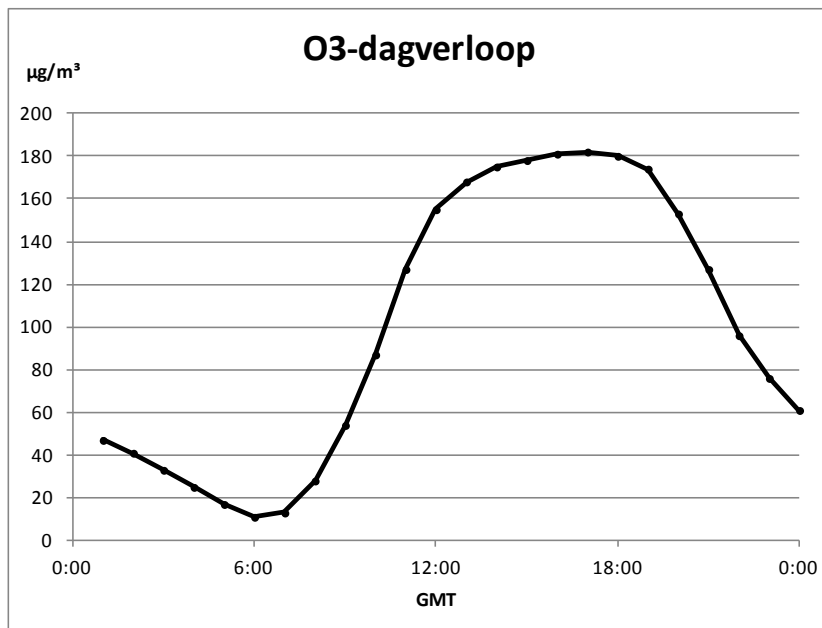
toekomstige O₃-concentraties in te schatten (Wild *et al.*, 2012). Eén set van emissiescenario's is de Representative Concentration Pathways (RCP), ontwikkeld voor het Climate Model Intercomparison Project (CMIP) 5 waarbij het cijfer de stralingsforcering in 2100 aanduidt. Alle RCP gaan uit van dalende emissies van ozonprecursoren (behalve voor methaan in het RCP8.5). De ensemble gemiddeldes van de modellen voorspellen een daling van de ozonconcentraties tegen 2050 voor 3 van de 4 RCP's, met de sterkste daling in het RCP2.5 scenario van -4,7 (±0,7) ppb tegen 2050. Modelberekeningen met andere scenariomodellen waarbij de emissies van ozonprecursoren sterk toenemen in de toekomst (SRES scenario's van het IPCC) gaven dan weer in 3 van de 4 gevallen een sterke toename van de toekomstige ozonachtergrondconcentraties (tot 8 ppb in 2050 in het meest pessimistische scenario). De grootste oorzaak van de toename aan ozonconcentraties in het RCP8.5 scenario was de verdubbeling van de methaanemissies en de sterkere instroom van stratosferisch ozon. Dit alles betekent dat het toekomstig beleid inzake de reductie van emissieprecursoren op mondiale schaal (zowel NO_x, VOS en methaan) een belangrijke rol zal spelen in de toekomstige ozonconcentraties.

Een stijging van de noord-hemisferische ozonachtergrond heeft een belangrijke impact, zowel op de toekomstige Vlaamse achtergrondconcentraties van ozon aan de grond als op de piekconcentraties tijdens een zomersmogepisode. De ozonachtergrondconcentratie krijgt dan immers een groter relatief aandeel in de totale ozonconcentraties, terwijl lokale regelgeving hier niet onmiddellijk impact op heeft. Lokale emissiereducties hebben vooral een effect op de lokale ozonproductie. Minder uitstoot van ozonprecursoren geeft aanleiding tot een daling van de ozonpiekconcentraties in de zomer. Het effect van de klimaatverandering (hogere temperaturen) kan dan weer de positieve evolutie van de piekconcentraties afremmen of tenietdoen.

De totale ozonconcentraties vertonen doorheen het jaar een grote variabiliteit met de minimale concentraties in de winter en de hoogste concentraties in de lente en de zomer. In de winter worden de ozonconcentraties in onze regio vooral bepaald door de grootte van de ozonachtergrond en de afbraak van ozon door het plaatselijk uitgestoten NO. In de lente en zomer worden de ozonconcentraties meer beïnvloed door de lokale productie van ozon door de aanwezigheid van de ozonprecursoren op warme en zonnige dagen. Ozonvorming hangt sterk af van de weersomstandigheden. Tussen verschillende jaren kan er dan ook een grote variabiliteit zijn in de ozonconcentraties door variaties in het weer. Dit bemoeilijkt een trendanalyse doordat het verloop van een trend niet eenduidig kan toegeschreven worden aan een verandering in de emissies.

De ozonconcentraties vertonen niet alleen een grote variabiliteit doorheen het jaar, ook tijdens een etmaal is er een typisch patroon. In figuur 12 staat het dagverloop afgebeeld voor de ozonconcentratie tijdens een ozonsmogepisode. Tijdens de nacht en vroege ochtend nemen de ozonconcentraties af, om vanaf zonsopgang geleidelijk aan toe te nemen. Het maximum wordt bereikt in de late namiddag of vroege avond.

Figuur 12: Typisch dagverloop van de ozonconcentraties tijdens een smogepisode



5 Gevolgen van fotochemische luchtverontreiniging

O₃ bezit een sterk oxiderend karakter en is schadelijk voor mensen, planten en materialen. Het heeft een negatieve invloed op de longfunctie, vermindert de opbrengst en de stressbestendigheid van gewassen en degradeert sommige materialen en kunstwerken. (RIVM, 2011)

5.1 Impact van troposferisch ozon op de volksgezondheid

Bij onderzoek naar gezondheidseffecten van luchtverontreiniging kan een onderscheid gemaakt worden tussen acute effecten, door blootstelling aan tijdelijk (op een schaal van uren, dagen, weken) verhoogde pollutieconcentraties (zoals ozonpieken) en chronische effecten, door jarenlange blootstelling aan gemiddelde pollutieconcentraties. Acute gezondheidseffecten treden sneller op en zijn bijgevolg eenvoudiger te onderzoeken dan chronische gezondheidseffecten. Daarnaast is het niet evident om het effect van één specifieke luchtverontreinigingscomponent te onderzoeken, vermits er in vele gevallen blootstelling is aan een mengsel van pollutie. (RIVM, 2011) (WHO, 2013)

Verhoogde ozonconcentraties (piekconcentraties) veroorzaken schade aan de luchtwegen. Deze ozonpiekperiodes komen vooral voor op meteorologisch ongunstige dagen, bij warm en zonnig weer. **Acute gezondheidseffecten** zijn bv. ademhalingsklachten of ontstekingsreacties in de longen. Verhoogde ozonconcentraties leiden tot een tijdelijke afname van de longfunctie. Mogelijk maakt ozon de luchtwegen gevoeliger voor allergenen, wat kan leiden tot het uitlokken van astma-aanvallen. Iedereen (ook gezonde mensen) die in de buitenlucht inspanningen levert, ondervindt bij hoge ozonwaarden een longfunctievermindering en loopt een risico op ontstekingsreacties van de luchtwegen. Het effect van ozon is zeer verschillend per persoon en ook mensen zonder luchtwegaandoeningen kunnen extra gevoelig reageren op ozon. Die gevoelige groep, mensen met longproblemen en mensen die langdurige fysieke inspanningen leveren buitenshuis, kunnen het meest hinder ondervinden. Door de al verminderde longwerking lopen mensen met longaandoeningen echter het meeste risico. De gezondheidsklachten kunnen worden vermeden of verminderd door niet te sporten of geen zware fysieke inspanningen te doen in de buitenlucht tussen 12 u en 22 u of door binnen te blijven. Binnenshuis zijn de ozonconcentraties gemiddeld de helft lager dan in de buitenlucht.

Een manier om de ziektelast van ozon te begroten (samen met de geassocieerde externe kosten) is via doorrekening van **DALY's** (Disability Adjusted Life Years). DALY's staan voor de

potentieel verloren gezonde levensjaren door morbiditeit of premature mortaliteit. De onderzochte gezondheidseffecten op korte termijn ten gevolge van de blootstelling aan ozon in omgevingslucht zijn: mortaliteit bij volwassenen, dagen met licht verminderde activiteit, hospitalisaties wegens ademhalingsproblemen, gebruik van bronchodilatoren door volwassenen, dagen met hoest, en problemen met de lagere luchtwegen bij kinderen. Bij de DALY-berekening worden de effecten van een dagelijks verhoogde ozonconcentratie in omgevingslucht gekwantificeerd rekening houdend met een drempelwaarde (SOM035: 35 ppb of 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Buekers *et al.*, 2012).

Een WGO-werkgroep (WHO, 2004) kwam echter tot het besluit dat er voor de bescherming van de volksgezondheid in het algemeen geen ozondrempelwaarden kunnen worden vastgesteld waaronder (**chronische**) effecten uitgesloten kunnen worden. Gebaseerd op recente toxicologische en epidemiologische gegevens werd vastgesteld dat over de totale bevolking (dus niet alleen de risicogroepen) de blootstelling en de persoonlijke gevoeligheid zowel in de tijd als over verschillende individuen sterk varieert. Daarom is het niet uit te sluiten dat, behalve de pieken, ook de lagere 'alledaagse' concentraties van ozon (soms) schadelijk kunnen zijn voor (sommige groepen uit) de bevolking. Een recente studie toont het effect aan van chronische blootstelling aan ozonconcentraties. Het resultaat van deze studie is dat voor een stijging van 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ van de ozonconcentratie, het risico om te sterven aan luchtwegaandoeningen met 4 % stijgt (Jerrett, 2009). Het belang van kennis over de chronische ozoneffecten neemt toe naarmate ozonpiekconcentraties dalen en jaargemiddelde ozonconcentraties nauwelijks dalen of zelfs stijgen.

Er zijn nog niet veel studies gedaan naar acute effecten van ozon op **hart- en vaatziekten**. 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.

Uit verschillende studies blijkt dat er een duidelijke correlatie is tussen de dagelijkse variatie van luchtverontreiniging en dagelijkse **sterfte**. Uit een Nederlands onderzoek gepubliceerd in 2000 (Hoek, 2000) en toegepast op 2003 (Fischer, 2004) bleek dat ozon de meest consistente onafhankelijke parameter was die gelinkt kon worden met dagelijkse sterfte. In deze studie wordt via Poisson regressietechnieken het effect (= relatief risico of RR) onderzocht van ozon en andere pollutanten op de dagelijkse totale sterfte en op de sterfte door cardiovasculaire aandoeningen, door chronisch obstructief longlijden (COPD) en door pneumonia (longontsteking) (Nederland, periode 1986 – 1994).

Naast het gezondheidseffect van ozon zelf, speelt ozon ook een rol in de vorming van secundair anorganisch en organisch zwevend stof in de omgevingslucht. Reactie van ozon met NMVOS binnenshuis kan ook aanleiding geven tot vorming van diverse componenten, waaronder stoffen die irriterend werken op de ademhaling (WHO, 2013).

Er is ook onderzoek verricht naar de sterfte bij **hitte** en de relatie tot ozonverontreiniging. Volgens het Wetenschappelijk Instituut Volksgezondheid (Sartor, 2004) waren er in de zomerperiode 2003 763 extra sterfgevallen (bovenop het normale aantal van 21 869) in Vlaanderen. Ongeveer 30 % (222 van 763) van deze extra sterfgevallen kan toegewezen worden aan luchtverontreiniging door ozon. 70 % van de extra sterfgevallen tijdens de zomer in dat jaar zou toe te schrijven zijn aan andere verontreiniging (o.m. fijn stof) en/of de hitte. De ozonsmogepisode en de hittegolf tijdens de augustusmaand van 2003 waren de langste en meest intense van de afgelopen jaren. Het is mogelijk dat door onderlinge interactie de impact van luchtverontreiniging en temperatuur op de dagelijkse sterfte hierdoor hoger is dan van de verschillende parameters afzonderlijk.

5.2 Impact van troposferisch ozon op vegetatie

Natuurlijke ecosystemen, akkergewassen en semi-natuurlijke vegetatie kunnen schade ondervinden door blootstelling aan ozon. Dit kan zich uiten in bladverkleuring, bladverlies, vertraagde groei of zelfs afsterven. Bij gewassen leidt dit tot opbrengstvermindering. Ecologisch gezien beïnvloedt ozon de samenstelling en het functioneren van het ecosysteem, wat ernstige gevolgen kan hebben voor de biodiversiteit. De effecten van ozon worden vaak pas zichtbaar na blootstelling gedurende enige tijd.

Figuur 13: Bladaantasting door ozon

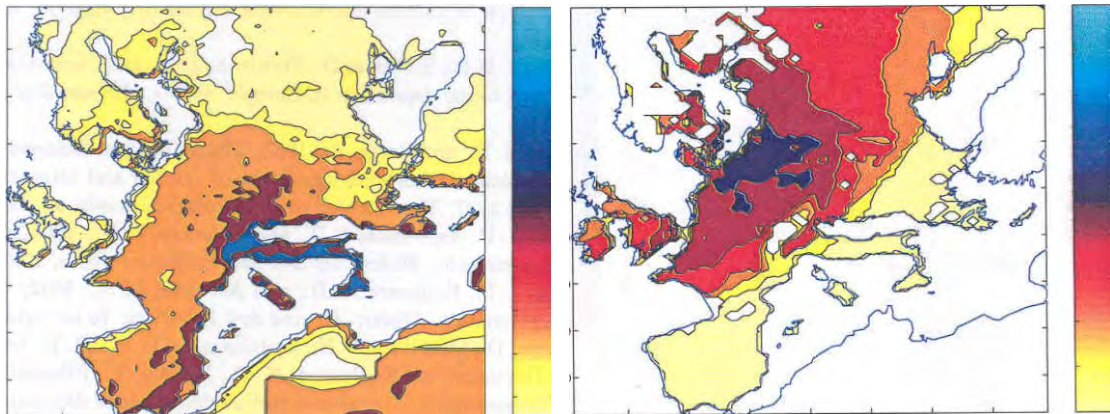


Ozon wordt vanuit de lucht door transport via de huidmondjes opgenomen in de plant (stomataire conductiviteit). De effectieve ozondepositie die een plant ontvangt hangt af van de plantensoort en van de omstandigheden waarin de plant verkeert. Onder droge omstandigheden of bij hoge temperaturen (wanneer de ozonconcentraties vaak juist hoog zijn) zijn de huidmondjes gesloten om vocht vast te houden. Daardoor nemen de planten beperkt ozon op, is er dus een beperkte ozondepositie en de toegebrachte schade blijft beperkt. Onder vochtige omstandigheden staan de huidmondjes meer open waardoor er meer ozon opgenomen wordt en de ozondepositie groter is. Ozon tast de celmembranen aan of veroorzaakt oxidatieve stress in de plantencellen. Hierop reageert de plant door het produceren van anti-oxidantia (vitamine C en E) en etheen (een plantenhormoon). Dat verstoort de normale celprocessen, waardoor gewassen te vroeg kunnen afsterven of afrijpen, of te snel hun bladeren verliezen.

Het kwantificeren van de opbrengstvermindering van gewassen door ozon kan op 2 manieren benaderd worden: de level I en level II benadering. De level I grenswaarden, uitgedrukt door de AOT40_{ppb}-waarde (zie deel 4 Ozonconcentraties in de lucht) hebben een beperkte toepasbaarheid door het feit dat de impact van allerlei factoren die de plantrespons beïnvloeden grotendeels genegeerd wordt. De AOT40_{ppb} geeft enkel een waarde voor de blootstelling aan ozon, niet voor de daadwerkelijke opname van ozon door de plant. Dit heeft tot gevolg dat er geen realistische kwantificatie kan gemaakt worden van de werkelijke opbrengstderving (of andere nadelige impact) ten gevolge van een bepaald ozonregime in een bepaalde regio en voor een welbepaald gewas. Voor een economische kosten-baten analyse van reductiemaatregelen van de atmosferische ozonconcentratie, is dit echter een absolute noodzaak (Ashmore *et al.*, 2004) (Fuhrer *et al.*, 1997) (Simpson *et al.*, 2002).

De level II benadering is gebaseerd op de effectieve ozonopname gemodelleerd op basis van veranderingen in stomataire conductiviteit ten gevolge van omgevingsfactoren en plantspecifieke eigenschappen. De effectieve ozonopname wordt gekwantificeerd door de ozonflux (deels gemeten, deels gemodelleerd) (Fuhrer, 2000). Deze methode leidt tot een betere risico-evaluatie van ozonschade. In vergelijking met de AOT40_{ppb}-berekeningen zijn er echter meer gegevens vereist over meteorologische omstandigheden en bodemgebruik (temperatuur, zonnestraling, lucht- en bodemvochtigheid ...).

Figuur 14: Verschil tussen de level I-benadering (gebaseerd op AOT40_{ppb}) en de level II-benadering (ozonflux) voor de inschatting van de impact van ozon op landbouwgewassen (Europa, 1999)



Berekende AOT40_{ppb} voor landbouwgewassen over 3 maanden (mei-juli 1999), volgens EMEP model (rv1.2β). In gele gebieden worden de laagste waarden bereikt (< 8 000 (µg/m³).uur), blauw geeft de meest risicovolle regio's weer (> 20 000 (µg/m³).uur).

Gemiddelde maandelijkse stomataire ozonflux voor landbouwgewassen in juni 1999. Gele gebieden geven de laagste waarden weer (< 2 nmol m⁻² s⁻¹), de regio's met de hoogste ozonflux zijn in blauw weergegeven (≈ 5 nmol m⁻² s⁻¹).

Bron: <http://www.emep.int>.

De aanbevelingen van de Göteborg workshop in 2002, die de ozonfluxbenadering vooropstelt als uiteindelijk doel van de level II benadering, werden overgenomen in de Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP) Mapping Manual (UN-ECE, 2004).

5.3 Impact van troposferisch ozon op materialen

Tal van materialen zijn gevoelig voor ozon. Elastomeren, gebruikt voor de productie van onder meer rubberbanden, worden aangetast waardoor scheuren ontstaan. Samen met andere pollutanten (SO₂, NO en H₂S) en onder invloed van UV-straling en temperatuur, werkt ozon ook in op plastic, textielvezels, textielkleurstoffen en verf. Kunstwerken in musea degraderen omdat ozon papier, textiel, leder, inkt en verf aantast. Voor musea en archieven wordt een ozonconcentratie van 0 tot 2 µg/m³ aanbevolen.

Voor de bescherming van materialen is alleen een UN-ECE-aanbeveling voorhanden (UBA, 1996). Uit schaarse experimenten blijkt dat er reeds bij jaargemiddelde concentraties van 40 µg/m³ schade optreedt aan sommige gevoelige organische materialen zoals ondermeer verven en coatings. Die waarde ligt zeer dicht bij of zelfs beneden de huidige achtergrondconcentratie in grote delen van Europa.

6 Verbanden met andere thema's

6.1 Troposferisch ozon versus stratosferisch ozon (aantasting van de ozonlaag)

De toename van ozon in de omgevingslucht of troposfeer (onderste 10-12 km van de atmosfeer) staat in schril contrast met het tekort aan ozon in de bovenste lagen van de atmosfeer (de stratosfeer) boven sommige streken. Op die grote hoogte (tussen 15 en 50 km) is de beschermende *stratosferische ozonlaag* aangetast door de jarenlange uitstoot van ozonafbrekende stoffen (CFK's e.d.). Hierdoor wordt er meer schadelijke ultravioletstraling van de zon doorgelaten (zie themabeschrijving Aantasting van de ozonlaag). Dankzij het Montreal Protocol van 1987, een internationaal akkoord waarin verschillende werelddelegaties de afbouw van ozonafbrekende stoffen goedkeurden, is de ozonlaag aan haar herstel bezig. In de hogere stratosfeer vindt grootschalige circulatie van ozon plaats. Via de lagere stratosfeer vindt een netto-instream van ozon in de troposfeer plaats. Door het herstel van de stratosferische ozonlaag wordt verwacht dat de ozonconcentratie in de troposfeer in de komende decennia zou kunnen toenemen, vooral in het zuidelijk halfrond.

6.2 Fotochemische luchtverontreiniging en klimaatverandering

Het klimaat heeft invloed op ozon, omgekeerd is ozon ook één van de belangrijkste broeikasgassen. Veranderingen in het klimaat kunnen gevolgen hebben voor ozon, maar veel gevolgen zijn nog onzeker.

De meeste klimaatmodellen geven aan dat klimaatverandering de stratosferische circulatie zal versnellen door de opwarming van de aarde. Een versterking van de circulatie geeft aanleiding tot hogere ozonconcentraties in de lagere stratosfeer waardoor via instroom ook de troposferische ozonconcentraties kunnen toenemen. Naast de stratosferische circulatie speelt ook de circulatie van ozon en de ozonprecursoren in de troposfeer een rol. Verhoging van de temperaturen door klimaatverandering, afname van de bewolgingsgraad en veranderde circulatiepatronen (windrichting en -snelheid) zouden kunnen leiden tot het meer voorkomen van verhoogde ozonconcentraties. Anderzijds zou de afbraak van ozon in de troposfeer sneller verlopen door een hogere luchtvochtigheid. Klimaatverandering heeft ook indirect een invloed op de ozonvorming, bijvoorbeeld doordat de biogene emissies van NMVOS (zoals isopreen en terpenen) door bomen en planten en de emissie van NO_x uit de bodem veranderen. Troposferisch ozon speelt anderzijds een beduidende rol als broeikasgas, het is na CO₂ en CH₄ het belangrijkste antropogene broeikasgas. In tegenstelling tot andere broeikasgassen hangt de concentratie van troposferisch ozon sterk af van de locatie op het aardoppervlak. In gebieden zoals het noordpoolgebied (waar het aangevoerde ozon slechts langzaam afgebroken wordt) heeft de toename van de ozonconcentraties in de vorige eeuw aanzienlijk bijgedragen aan de opwarming.

6.3 Fotochemische luchtverontreiniging en verzuring & vermesting

Fotochemische luchtverontreiniging houdt ook verband met verzuring en vermesting. Allereerst is er de rechtstreekse bijdrage tot de verzuring door nitraten afkomstig van de depositie van NO_x, die ook als ozonprecursor optreedt. Maar er is ook een synergetisch effect van ozon en verzuring op de bosvitaliteit. Via de belasting van ozon wordt de stressbestendigheid van sommige bomen afgezwakt waardoor zij gevoeliger worden voor de effecten van de potentieel verzurende deposities van luchtcontaminanten. De depositie van NO_x leidt ook tot een te hoge stikstofdepositie die aanleiding is tot vermesting van de bodem.

6.4 Fotochemische luchtverontreiniging en zwevend stof

De bronnen van zwevend stof zijn divers, een gedeelte wordt rechtstreeks uitgestoten (primair zwevend stof), een gedeelte secundair gevormd (secundair zwevend stof). Gasvormige emissies, waaronder de ozonprecursor NO_x, vormen aërosolen (zoals ammoniumnitraat) en dragen zo in belangrijke mate bij tot de concentratie aan secundair fijn stof in de lucht. De emissie van NMVOS ligt aan de grondslag van de vorming van secundaire organische aërosolen (SOA) die een substantiële bron van fijn stof betekenen.

De concentraties aan zwevend stof in Vlaanderen worden ook beïnvloed door de zogenaamde randvoorwaarden, met name de luchtpolluenten afkomstig van buiten Vlaanderen die via de luchtmassa's Vlaanderen binnenstromen. Ozon is een belangrijke pollutent die 'van buiten' aangevoerd wordt. De aangevoerde ozonconcentraties hebben een indirect effect op de concentraties zwevend stof in Vlaanderen via hun invloed op de chemische reacties in de atmosfeer waarbij nitraten en sulfaten gevormd worden. (Deutsch *et al.*, 2010)

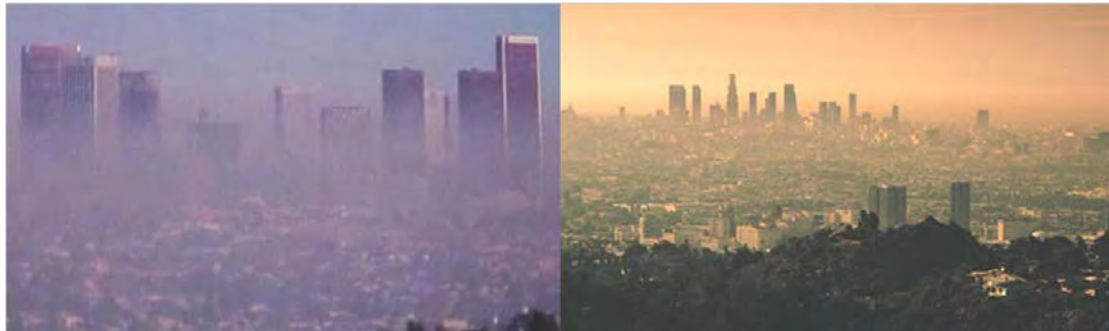
6.5 Zomersmog versus wintersmog

Het begrip 'smog' is samengesteld uit de woorden 'smoke' en 'fog' (rook en mist) en duidt een periode aan met te veel luchtverontreiniging. De term werd voor het eerst gebruikt na de ernstige luchtvervuilingsproblemen in Londen in de jaren 50 van de vorige eeuw. Door het massale gebruik van steenkool hing er tijdens windstille dagen een 'mist' van 'rook' over Londen.

Zomersmog of ozonsmog treedt op bij hoge ozonconcentraties in de lucht. Dit treedt op op warme en zonnige dagen, met lage windsnelheden en bij bepaalde samenstelling van NO_x en NMVOS in de lucht.

Wintersmog bevat geen ozon (onvoldoende warmte en zon) maar ontstaat als de concentraties aan zwevend stof te hoog zijn. Dit kan voorvallen bij stabiele meteorologische omstandigheden wanneer er weinig wind is en/of als er een koude luchtlag onder een warme luchtlag blijft hangen (temperatuursinversie).

Figuur 15: Vergelijkend beeld van wintersmog (links) en zomersmog (rechts)



Algemene conclusie uit de talrijke verbanden tussen fotochemische luchtverontreiniging en de andere thema's zoals zwevend stof, klimaatverandering, verzuring & vermesting is dat het van groot belang is dat de verschillende luchtverontreinigingsthema's beleidsmatig geïntegreerd aangepakt worden.

Referenties

Ashmore M., Emberson L., Karlsson P.E., Pleijel H. (2004) New directions: A new generation of ozone critical levels for the protection of vegetation in Europe. *Atmos. Environ.* **38**, 2213-2214.

belEUROS: Implementatie en uitbreiding van het EUROS model (RIVM) voor ozon beleidsondersteuning in België. De studie werd uitgevoerd in opdracht van DWTC door VITO, UCL, FPMONS, KMI en IRCEL. De modeltoepassingen worden door IRCEL uitgevoerd.

Buekers J., Torfs R., Deutsch F., Lefebvre W., Bossuyt M. (2012)) Inschatting ziektelast en externe kosten veroorzaakt door verschillende milieufactoren in Vlaanderen. Studie uitgevoerd door VITO in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA MIRA/2012/06, VITO.

de Leeuw F.A.A.M., Bogman F., van Aalst R. (2001) Air pollution by ozone in Europe in summer 2001, ETC/ACC, EEA, Copenhagen.

de Leeuw F.A.A.M. (2002) A set of emission indicators for long range transboundary air pollution, *Environmental Science & Policy*, **5**, 135-145.

Derwent R.G., Simmonds P.G., Manning A.J., Spain T.G. (2007) Trends over a 20-year period from 1987 to 2007 in surface ozone at the atmospheric research station, Mace Head, Ireland. *Atmospheric Environment*, **41**, 9091-9098.

Deutsch F., Vankerkom J., Veldeman N., Peelaerts W., Fierens F., Vanpoucke C., Trimpeneers E., Vancraeynest L., Bossuyt M. (2010) Verklarende factoren voor evoluties in luchtkwaliteit, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2010/07, VITO.

Finlayson-Pitts, Pitts Jr. (1997) *Science* 1997 Mei 16; 276: 1045-1051.

Fischer P., Brunekreef B., Lebreton E. (2004) Air pollution related deaths during the 2003 heat wave in the Netherlands, *Atmospheric Environment* **38**, 1083-1085.

Fuhrer J., Skärby L., Ashmore M.R. (1997) Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe, *Environmental Pollution*, **97**, 91-106.

Fuhrer J. (2000) Introduction to the special issue on ozone risk analysis for vegetation in Europe. *Environ. Pollut.* 109: 359-360.

Hoek G., Brunekreef B., Verhoeff A., van Wijnen J., Fischer P. (2000). Daily mortality and air pollution in the Netherlands, *Journal of the Air and Waste Management Association* **50 (8)**, 1380-1389.

Hooyberghs J., Mensink C., Dumont G., Fierens F. (2006) Spatial interpolation of ambient ozone concentrations from sparse monitoring points in Belgium, *J. Environ. Monit.* **8**, 1129-1135.

Jerrett M., Burnett R.T., Arden Pope III C., Ito K., Thurston G., Krewski D., Shi Y., Calle E., Thun M. (2009) Long-term ozone exposure and mortality, *New England Journal of Medicine* 360, 1085-1095.

Keating T. J., Farrell A. (1999) Transboundary Environmental Assessment: Lessons from the Ozone Transport Assessment Group, Technical Report NCEDR/99-02, NCEDR Oak Ridge National Laboratory, University of Tennessee, USA. (<http://www.ncedr.org/casestudies/otag/OtagItns.pdf>).

LRTAP (2000) <http://www.UN-ECE.org/env/lrtap>.

Ordóñez C., Brunner D., Staehelin J., Hadjinicolaou P., Pyle J.A., Jonas M., Wernli H., Prévôt A.S.H (2007), Strong influence of lowermost stratospheric ozone on lower tropospheric background ozone changes over Europe, *Geophysical Research Letters*, vol 34.

Parrish D.D., Millet D.B., Goldstein A.H. (2009), Increasing ozone in marine boundary layer inflow at the west coasts of North America and Europe, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 1303-1323.

Parrish D.D., Law K.S., Staehelin J., Derwent R., Cooper O.R., Tanimoto H., Volz-Thomas A., Gilje S., Scheel H.-E., Steinbacher M., Chan E. (2012), Long-term concentrations at northern mid-latitudes, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 11485-11504.

RIVM (1991) Nationale Milieuverkenning 1990 - 2010, RIVM, 1991, Bilthoven.

RIVM (2011) Dossier Ozon 2011.

Sartor F. (2004) Oversterfte in België tijdens de zomer 2003. IPH/EPI Reports nr. 2004 - 010,D/2004/2505/18, Wetenschappelijk Instituut Volksgezondheid, Brussel.

Simpson D., Ashmore M., Emberson L., Tuovinen J.-P., MacDougall M., Smith R.I. (2002) Stomatal ozone uptake over Europe: preliminary results. In: UN-ECE Workshop Establishing Ozone Critical Levels II, background paper, Göteborg, Sweden.

UBA (1996) Manual on methodologies for mapping critical loads/levels and geographical areas where they are exceeded. CLRTAP. Federal Environmental Agency (Umweltsbundesamt), tekst 71/96, Berlijn, Duitsland.

UN-ECE (1996) The 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution and its Protocols. United Nations, New York en Genève. (<http://www.UN-ECE.org>).

UN-ECE (2004) Mapping critical levels for vegetation. In Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends, pp. III1-III52. UN-ECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution.

Vingarzan R. (2004), A review of surface ozone background levels and trends, *Atmospheric Environment* **38**, 3431-3442.

Wild O., Fiore A.M., Shindell D.T. (2012). Modelling future changes in surface ozone: a parameterized approach, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 2037-2054.

WHO (2004) Health aspects of air pollution - answers to follow-up questions from CAFE, Bonn.

WHO (2013) Review of evidence on health aspects of air pollution - REVIHAAP project - First results.

Lijst met relevante websites

<http://www.ceip.at/>

<http://www.eea.europa.eu/themes/air/airbase/>

<http://www.emep.int>

<http://www.irceline.be>

<http://www.milieurapport.be>

<http://www.UN-ECE.org>

<http://www.UN-ECE.org/env/lrtap>

<http://www.vmm.be>

Begrippen

Achtergrondconcentratie: theoretisch gezien de concentratie van die stof in de lucht zonder de mondiale uitstoot ervan of van haar precursoren door menselijke activiteiten. In een ietwat verruimde betekenis is het de concentratie van een stof op een plaats en/of tijdstip of periode waar(op) er geen uitgesproken aanwijsbare verhoogde invloed is van de oorzaken van de verontreiniging.

AOT40ppb-bossen: overschot boven 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ van alle uurwaarden van de ozonconcentraties tussen 8u en 20u (Midden-Europese tijd) opgeteld tijdens de maanden april tot en met september.

AOT40ppb-vegetatie: overschot boven 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ van alle uurwaarden van de ozonconcentraties tussen 8 en 20 uur (Midden-Europese tijd) opgeteld tijdens de maanden mei, juni en juli.

AOT60ppb-max 8u: overschot boven 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ van de hoogste 8-uursgemiddelde ozonconcentratie per dag, opgeteld over alle dagen van een kalenderjaar.

Fotochemische luchtverontreiniging: de verontreiniging van de omgevingslucht met chemische stoffen als ozon (O_3), peroxyacetylnitrat, stikstofdioxide (NO_2), waterstofperoxide en andere stoffen die een oxiderende werking hebben.

Kriging: een ruimtelijke interpolatietechniek die steunt op de stochastische kenmerken van de ruimtelijke variatie van de gemeten concentratie van een pollutant in de omgevingslucht. Genoemd naar de Zuidafrikaanse goudmijningsingenieur en geostatisticus D.G. Krige ($\text{^}1919$).

NET60_{ppb}-max8u: aantal dagen per kalenderjaar waarop de hoogste 8-uursgemiddelde ozonconcentratie van die dag groter is dan 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ozonepisode: opeenvolgende dagen waarop er verhoogde ozonconcentraties in de omgevingslucht voorspeld of gemeten worden waarbij de kans bestaat dat op minstens één meetplaats de EU-drempel voor de verwittiging van de bevolking (180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gedurende 1 uur) overschreden kan worden.

Ozonflux: de hoeveelheid ozon die per eenheid van oppervlakte en tijd afgezet wordt ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$).

Precursor: voorloperstof : stof waaruit fotochemische luchtverontreiniging ontstaat door inwerking van zonlicht.

Relatief Risico (RR): het quotiënt van twee (absolute) risico's.

- In een cohortonderzoek (studie van een grote bevolkingsgroep over lange tijd) wordt daarbij de kans (het risico) dat een fenomeen zich voordoet in een blootgestelde groep gedeeld door de kans op voorkomen van ditzelfde fenomeen in een niet-blootgestelde groep.

- In een studie van tijdreeksen (bv. de tijdreeks van de dagelijkse sterftecijfers ten opzichte van de reeks met dagwaarden van de concentratie van een pollutant in de lucht) gaat het om de deling van de kans op sterfte in de onderzochte tijdreeks ten opzichte van de meerjaren gemiddelde kans op sterfte tijdens de beschouwde tijdreeks. Indien RR statistisch significant >1 is er een oversterfte.

Afkortingen

AOT: Accumulated exposure Over Threshold

CFK: chloorfluorkoolwaterstof

CMIP: Climate Model Intercomparison Project

COPD: chronisch obstructief longlijden

DALY : Disability Adjusted Life Years

DWTC: Diensten voor Wetenschappelijke, Technische en Culturele aangelegenheden

ECMWF: European Center for Medium range Weather Forecasting

EU: Europese Unie.

EEA: European Environmental Agency

EMEP: Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-Range Transmission of Air pollutants in Europe FEV₁: Forced Expiratory Volume 1s.

FPMONS: Faculté Polytechnique de Mons

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

IRCEL: Intergewestelijke Cel voor het Leefmilieu

KMI: Koninklijk Meteorologisch Instituut

LRTAP: Long-range Transboundary Air Pollution

MET: Midden-Europese tijd

NMVOS: alle vluchtige organische stoffen uitgezonderd methaan

RCP: Representative Concentration Pathways

RIVM: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (NI.)

RR: relatief risico

SOA: secundaire organische aërosolvorming

THAP: Task force on Hemispheric transport of Air Pollution

TOFP: (Tropospheric Ozone Forming Potential) het ozonvormend potentieel van elke precursor van ozon in de troposfeer

UCL: Université Catholique de Louvain

UN-ECE : United Nations Economic Commission for Europe

Vito: Vlaamse instelling voor technologisch onderzoek

VMM: Vlaamse Milieumaatschappij

VOS: vluchtige organische stoffen

WGO: Wereldgezondheidsorganisatie

WHO: World Health Organisation

Scheikundige symbolen

C₅H₈: isopreen

C₁₀H₁₆: terpenen

CH₄: methaan

CO: koolstofmonoxide

H₂O₂: waterstofperoxide

NO: stikstofmonoxide

NO₂: stikstofdioxide

NO_x: stikstofoxiden: de molaire som van NO en NO₂

O₃ : ozon

PAN: peroxyacetylnitraat

Eenheden

µg O₃/m³ : microgram (10⁻⁶ g) O₃ per kubieke meter lucht genormaliseerd weer te geven bij de standaard druk van 1013 hPa en temperatuur van 293 K.

ppb : (parts per billion): volumedeeltjes per miljard. 1 ppb ozon komt bij standaard druk (1013 hPa) en temperatuur (293 K) overeen met 1,995 µg/m³, afgerond dus 2 µg/m³.

(µg/m³).uren : het product van concentratie (µg/m³) met aantal uren, gebruikt in de AOT-waarde.

ppb.uren: het product van een fractie (ppb) met een aantal uren, gebruikt in de AOT-waarde (1 ppb.uur is voor ozon gelijk aan 2 (µg/m³).uur).