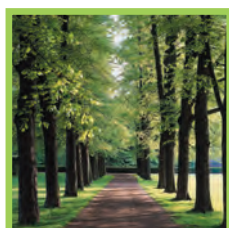


Ozonschade aan vegetatie:
Literatuurstudie en studie naar de haalbaarheid van
een indicator op basis van de ozonflux en naar de
implicaties voor de gebiedsdekkende berekening
via een luchtkwaliteitsmodel



Studie uitgevoerd in opdracht van
MIRA, Milieurapport Vlaanderen

Onderzoeksrapport

MIRA/2013/12, november 2013
VITO/2013/RMA/R/322

Ozonschade aan vegetatie: Literatuurstudie en studie naar de haalbaarheid van een indicator op basis van de ozonflux en naar de implicaties voor de gebiedsdekkende berekening via een luchtkwaliteitsmodel

Felix Deutsch¹, Karine Vandermeiren²

1 Unit Ruimtelijke Milieuaspecten, VITO
2 CODA-CERVA

**Studie uitgevoerd in opdracht van MIRA,
Milieurapport Vlaanderen**

MIRA/2013/12
VITO rapport 2013/RMA/R/322

November 2013



Documentbeschrijving

Titel

Ozonschade aan vegetatie: Literatuurstudie en studie naar de haalbaarheid van een indicator op basis van de ozonflux en naar de implicaties voor de gebiedsdekkende berekening via een luchtkwaliteitsmodel

Dit rapport verschijnt in de reeks MIRA Ondersteunend Onderzoek van de Vlaamse Milieumaatschappij. Deze reeks bevat resultaten van onderzoek gericht op de wetenschappelijke onderbouwing van het Milieurapport Vlaanderen. Dit rapport is ook beschikbaar via www.milieurapport.be.

Samenstellers

Felix Deutsch; Karine Vandermeiren
Unit Ruimtelijke Milieuaspecten, VITO; CODA-CERVA

Wijze van refereren

Deutsch F., Vandermeiren K. (2013), Ozonschade aan vegetatie: Literatuurstudie en studie naar de haalbaarheid van een indicator op basis van de ozonflux en naar de implicaties voor de gebiedsdekkende berekening via een luchtkwaliteitsmodel, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2013/12, VITO, CODA-CERVA.

Vragen in verband met dit rapport

Vlaamse Milieumaatschappij
Milieurapportering (MIRA)
Van Benedenlaan 34
2800 Mechelen
tel. 015 45 14 61
mira@vmm.be

D/2013/6871/055
ISBN 9789491385308
NUR 973/943

Inhoudstafel

| | |
|---|-----------|
| Documentbeschrijving..... | 2 |
| Inhoudstafel | 3 |
| Inhoudstafel figuren | 4 |
| Inhoudstafel tabellen..... | 5 |
| Samenvatting | 6 |
| Summary | 8 |
| 1 Inleiding..... | 10 |
| 2 Literatuurstudie ozonflux-indicatoren..... | 12 |
| 2.1 Historiek | 12 |
| 2.2 Van O ₃ -concentratie tot opname: van AOT naar POD | 13 |
| 2.3 Definitie en berekening van fytotoxische ozon dosis POD _Y | 14 |
| 2.4 Van O ₃ -opname tot effect..... | 16 |
| 2.5 Dosis-respons relaties en hun interpretatie | 17 |
| 3 Beschikbaarheid van invoerparameters voor de gebiedsdekkende berekening van de POD_Y..... | 20 |
| 3.1 Inleiding | 20 |
| 3.2 De berekening van de ozonconcentratie op gewashoogte | 21 |
| 3.3 De berekening van de stomataire conductiviteit via het DO ₃ SE-model | 22 |
| 3.3.1 De maximale stomataire conductiviteit g _{max} | 23 |
| 3.3.2 De fenologiefactor f _{phen} | 30 |
| 3.3.3 Beschikbaarheid van gegevens voor de ozonconcentratie (op gewashoogte), g _{max} en f _{phen} | 32 |
| 3.3.4 De lichtfactor f _{light} | 33 |
| 3.3.5 De temperatuurfactor f _T | 36 |
| 3.3.6 De waterdampdrukdeficit factor f _{(VP)D} | 36 |
| 3.3.7 De bodemvochtfactor f _{SW} (soil water factor)..... | 37 |
| 4 Plan van aanpak voor het bouwen van een model voor de berekening van de POD_Y voor Vlaanderen | 40 |
| 4.1 RIO..... | 40 |
| 4.2 DO ₃ SE en EMEP..... | 41 |
| 4.3 CHIMERE | 41 |
| 5 Conclusies | 44 |
| 6 Referenties | 45 |
| 7 Begrippen..... | 47 |
| 8 Afkortingen | 47 |

Inhoudstafel figuren

| | |
|---|----|
| Figuur 1: Verschil tussen de level I-benadering (gebaseerd op AOT40ppb) en de level II-benadering (ozonflux) voor de inschatting van de impact van ozon op landbouwgewassen (Europa, 1999) | 10 |
| Figuur 2: Bij de modellering van de O ₃ -opname dient rekening gehouden te worden met de atmosferische weerstand, grenslaagweerstand en stomataire weerstand van het gewas. Deze zijn op hun beurt afhankelijk van verschillende omgevings- en meer plantspecifieke factoren | 14 |
| Figuur 3: Invloed van stralingsintensiteit en temperatuur op relatieve stomataire conductiviteit g_{sto} van tarwe en aardappel (t.o.v. maximale g_{sto}) (zie Pleijel et al. (2007) voor verdere details en referenties) | 15 |
| Figuur 4: Dosis-respons relaties (met 95% betrouwbaarheidsinterval) tussen de relatieve opbrengst (totale graanopbrengst, 1000-korrel gewicht en proteïne-opbrengst) en de POD6 voor tarwe. De functies zijn gebaseerd op resultaten voor 5 cultivars in 3 of 4 Europese landen. | 18 |
| Figuur 5: Dosis-respons relatie (met 95% betrouwbaarheidsinterval) tussen de opbrengst en POD6 voor aardappel en tomaat..... | 19 |
| Figuur 6: Bodembedekkingskaart (Vlaanderen, opname 2001)..... | 25 |
| Figuur 7: Corine Landcover kaart met legende (België, 2006) | 26 |
| Figuur 8: Landgebruikskaart NARA 2013 (Vlaanderen, 2013)..... | 29 |
| Figuur 9: Zoom op de Landgebruikskaart NARA 2013 (Antwerpen en zuidoostelijke agglomeratie)... | 29 |
| Figuur 10: Illustratie van de fenologiefactor f_{phen} voor twee verschillende landgebruiksklassen DF: loofbos in Centraal- en Noord-Europa; MS: struiken/bosjes in het Middellandse Zeegebied (Simpson et al., 2012, Figuur S3)..... | 32 |
| Figuur 11: Schematische weergave van de LAI ontwikkeling doorheen het groeiseizoen | 35 |
| Figuur 12: Bodemkaart Vlaanderen beschikbaar bij AGIV (Vlaanderen, 2001)..... | 38 |
| Figuur 13: Maandgemiddelde bodemvochtkaart van GLDAS (Wereld, mei 2007) | 39 |
| Figuur 14: Ozonconcentratiekaart aangemaakt met behulp van de RIO-interpolatiemethode (België, 2009)..... | 41 |

Inhoudstafel tabellen

| | |
|---|----|
| Tabel 1: Level I grenswaarden op basis van de geaccumuleerde O_3 -concentraties boven 40 ppb (AOT40) die aanleiding kunnen geven tot nadelige effecten op verschillende vegetatietypes VPD = dampdrukdeficiet | 12 |
| Tabel 2: Grenswaarden voor negatieve O_3 -effecten op basis van POD_Y | 19 |
| Tabel 3: Parameters voor de berekening van de maximale stomataire weerstand via het DO_3SE -model (Simpson et al., 2012, Tabel S16) | 24 |
| Tabel 4: De 107 landgebruiksklassen van de NARA landgebruikskaart 2013 (Vlaanderen, 2013)..... | 27 |
| Tabel 5: Landgebruik-specifieke parameters voor de berekening van de stomataire weerstand..... | 30 |
| Tabel 6: Definitie van de fenologiefactor f_{phen} als functie van de dag van het jaar d_n , begin en eind van het groeiseizoen (d_{SGS} en d_{EGS}) en andere parameters zoals aangegeven in Tabel 5 (Simpson et al., 2012, Tabel S17) | 30 |
| Tabel 7: Bijkomende informatie voor de berekening van de fenologiefactor f_{phen} : start en einde van het groeiseizoen, aangegeven voor een locatie gelegen op 50 °N (Simpson et al., 2012; Tabel 3) | 31 |
| Tabel 8: Mogelijke bronnen voor de ozonconcentratie, voor de maximale stomataire conductiviteit en voor de fenologiefactor in Vlaanderen; bron 1 is momenteel de als meest geschikt beschouwde bron, bron 2 beschrijft een alternatieve bron in het geval van problemen met databeschikbaarheid | 32 |
| Tabel 9: Rekenregels voor de berekening van de LAI in functie van de dag van het jaar (d_n), start en eind van het groeiseizoen (d_{SGS} en d_{EGS}), L_S , L_E , LAI_{max} en LAI_{min} zoals aangegeven in Tabel 7..... | 35 |
| Tabel 10: Beschikbaarheid van gegevens voor de berekening van de lichtfactor f_{light} | 35 |
| Tabel 11: De parameters T_{min} , T_{opt} en T_{max} voor de berekening van de temperatuurfactor f_T | 36 |
| Tabel 12: De parameters f_{min} , D_{min} en D_{max} voor de berekening van de waterdampdruk deficit factor $f_{(VP)D}$ | 37 |
| Tabel 13: Beschikbaarheid van invoergegevens voor de berekening van f_T en $f_{(VP)D}$ | 37 |
| Tabel 14: Beschikbaarheid van invoergegevens voor de berekening van f_{SW} | 39 |

Samenvatting

Net zoals te hoge troposferische ozonconcentraties (O_3) nadelig zijn voor de menselijke gezondheid, zo ook kunnen planten hiervan nadelige gevolgen ondervinden. Ter bescherming van de vegetatie werden op Europees niveau in het verleden reeds O_3 -indicatoren voorgesteld op basis van de atmosferische O_3 -concentraties en blootstellingsduur. De blootstellingsindex AOT40 (Accumulated Ozone exposure Over a Threshold of 40 ppb) werd in de Europese richtlijn Luchtkwaliteit 2008/50/EG gedefinieerd als de sommatie van uurgemiddelde O_3 -concentraties boven 40 ppb (en verminderd met 40 ppb) van 8 tot 20u gedurende het groeiseizoen. In Vlaanderen wordt deze indicator opgevolgd in het kader van het MINA-plan 4 (2011-2015). De Europese langetermijndoelstelling is 3 000 ppb. (= 6 000 $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^3)\cdot\text{uren}$), de grenswaarde ter voorkoming van schade aan gevoelige landbouwgewassen en natuurlijke vegetatie.

Ondanks het feit dat de AOT reeds een belangrijke verbetering betekende t.o.v. vroegere risico-evaluaties, was de wetenschappelijke gemeenschap zich reeds van meet af aan bewust van de beperkingen. De O_3 -effecten zijn immers in eerste instantie gecorreleerd aan de hoeveelheid O_3 die de plant ook effectief binnendringt en deze vormt slechts een deel van de O_3 -concentratie in de omgevingslucht. Deze opname gebeurt via de huidmondjes (stomata) in het blad waarlangs ook de CO_2 en H_2O uitwisseling plaatsvindt. De regeling van de openingsgraad van deze huidmondjes (stomataire conductiviteit) laat de plant toe om de transpiratie- en fotosyntheseprocessen aan te passen aan de omgevingscondities. Bijgevolg is ook de O_3 -opname afhankelijk van omgevingsfactoren (temperatuur, lucht- en bodemvocht, lichtintensiteit ...) en specifieke plantkarakteristieken (aantal huidmondjes, ontwikkelingsstadium ..., Figuur 2).

De laatste 10 jaar werden er dan ook belangrijke inspanningen geleverd ter ontwikkeling van methodes om deze O_3 -opname te modelleren en betrouwbare dosis-respons relaties op te bouwen op basis van de O_3 -flux om zo tot een meer realistische inschatting van de O_3 -schade te komen. Voor de berekening van de O_3 -flux worden multiplicatieve modellen voor stomataire conductiviteit voorgesteld. Door middel van het DO_3SE -model (Deposition of Ozone and Stomatal Exchange) kan de stomataire O_3 -flux voor elk daglichtuur berekend worden. Het bleek tevens dat de meest significante dosis-effect relaties bekomen werden door bij de sommatie over het groeiseizoen een fluxdrempelwaarde Y in rekening te brengen, naar analogie met de AOT40 (Figuur 4 en 5). Dit resulteerde in een nieuwe indicator voor inschatting van het risico op opbrengstvermindering of afname van biomassa van landbouwgewassen, bosbomen en grasland: de **fytoxische Ozon Dosis (Phytotoxic Ozone Dose) POD_Y** ($\text{mmol } O_3 \text{ m}^{-2} \text{ bladoppervlak}$), d.i. de som van het verschil tussen de uurgemiddelde stomataire O_3 -flux en Y $\text{nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, geaccumuleerd over de relevante tijdsperiode tijdens daglichturen.

De toepassing van deze nieuwe indicator voor risico-evaluatie van O_3 -schade aan vegetatie kan op verschillende manieren gebeuren:

- Berekening van de POD_Y op basis van een beperkt aantal gevalideerde gewasspecifieke modellen (tarwe, aardappel, tomaat, berk/beuk, spar, grasland) en vergelijking met de grenswaarden voor een specifiek effect. Overschrijding van deze grenswaarde betekent dat er een bepaald negatief effect kan verwacht worden (Tabel 2). Deze modellen zijn vooral geschikt om de O_3 -impact eerder op lokale en regionale schaal te kwantificeren. In combinatie met gegevens i.v.m. bodembedekking kunnen deze ook gebruikt worden voor een inschatting van de economische schade.
- Berekening van de POD_Y op basis van een vereenvoudigd model voor een generieke receptor, representatief voor een bepaald vegetatietype (akkerbouwgewas, bosbomen ...). Dit is niet gekoppeld aan grenswaarden, maar de berekende O_3 -dosis wordt beschouwd als een maat voor het risico op O_3 -schade. Deze methode is vooral geschikt voor meer grootschalige modellering, inclusief geïntegreerde risico-evaluaties.

Naast deze lange-termijn indicator voor de risico-evaluatie van meer chronische O_3 -effecten, wordt ook een verbetering van de korte-termijn indicator voor zichtbare schade voorgesteld: $\text{AOT30}_{\text{VPD}}$. Hierbij wordt rekening gehouden met de invloed van dampdruk (VPD) op de stomataire O_3 -flux. Deze is vooral nuttig voor de inschatting van bladschade aan groentegewassen waarvan de economische waarde sterk afhankelijk is van het visueel aspect (bv. spinazie, sla ...). De grenswaarde voor

zichtbare schade (op minstens 10% van de bladeren) is overschreden als de $AOT30_{VPD}$ tijdens daglichturen over 8 dagen 0,16 ppm h overschrijdt.

Via de Fortran versie van het DO_3SE -model kunnen ook gebiedsdekkende berekeningen van de POD uitgevoerd worden. Deze versie van DO_3SE werd geïmplementeerd in het Europese luchtkwaliteitsmodel van EMEP. Deze implementatie kan dan ook als leidraad dienen voor de opbouw van een Vlaams POD-model.

De methodologie voor de berekening van de stomataire conductiviteit is op zich redelijk complex, maar werd al vereenvoudigd opgenomen in het DO_3SE -model om een berekening van de POD in de praktijk überhaupt mogelijk te maken. Het probleem ligt immers vooral in de vele omgevingsvariabelen die nodig zijn om de POD te kunnen berekenen, waaronder bijvoorbeeld fotosynthetisch actieve straling, bodemvocht, groeiseizoen van gewassen, etc. Bij de koppeling van DO_3SE aan het EMEP model werd nog eens een aantal vereenvoudigingen uitgevoerd omwille van problemen met sommige invoerparameters.

Wij hebben ons in dit rapport vergaand georiënteerd aan de DO_3SE -versie zoals deze geïmplementeerd is in het EMEP model. De meest voor de hand liggende manier om een vergelijkbaar model voor Vlaanderen te construeren zou een koppeling van DO_3SE aan het Chimere-model zijn. Dit state-of-the-art luchtkwaliteitsmodel is operationeel bij IRCEL en wordt zowel voor assessments alsook voor voorspellingen gebruikt. De implementatie van DO_3SE in "een" regionaal luchtkwaliteitsmodel is in ieder geval noodzakelijk, gezien in deze modellen een groot deel van de voor DO_3SE noodzakelijke invoer al aanwezig is.

Het onderzoek naar de beschikbaarheid van de nodige meteorologische invoerparameters (en van de hieruit afgeleide parameters) werd om deze reden uitgevoerd uitgaande van de aanname dat DO_3SE aan Chimere zal gekoppeld worden. M.b.t. de meteorologische invoerparameters werd duidelijk dat alle nodige basis-parameters in Chimere aanwezig zijn. M.b.t. bodemvocht kan de in Chimere aanwezige parameter omgerekend worden naar de nodige invoer voor DO_3SE . Voor een aantal invoerparameters staan er ook alternatieve bronnen ter beschikking, o.a. m.b.t. bodemvocht en landgebruiks-informatie.

Als bron van de ozonconcentraties stellen we voor de uurlijkse waarden via de RIO interpolatiemethode te gebruiken. Deze sluiten zeer nauw aan bij de metingen, met als voordeel dat er een gebiedsdekkend concentratieveld bestaat. De berekening van de chemische omzettingen zou in Chimere kunnen afgezet worden en de RIO ozonconcentraties ingelezen worden. Deze concentraties dienen echter nog omgerekend worden naar de relevante ozonconcentratie op gewashoogte. Naargelang de beschouwde vegetatie (bv. landbouwgewassen, bossen) moet dus met een andere gewashoogte rekening gehouden worden. Dit kan ofwel via het in Chimere aanwezige depositiemodel ofwel via de in de Mapping Manual aangegeven conversiefactoren.

De studie heeft dus enerzijds aangetoond dat alle nodige invoerparameters voor DO_3SE ofwel aanwezig zijn voor Vlaanderen ofwel kunnen op geparametriseerde manier berekend worden. De studie heeft anderzijds aangetoond dat we in Vlaanderen met de modellen Chimere en RIO alsook met de versie van DO_3SE die in het EMEP model geïmplementeerd is over alle belangrijke bouwstenen beschikken om een Vlaamse POD-model te bouwen. De toegevoegde waarde van de inschatting van de ozonschade aan gewassen op basis van de POD t.o.v. een inschatting op basis van de $AOT40$ is zodanig groot dat de nog nodige inspanning voor de constructie van een POD-model voor Vlaanderen als gerechtvaardigd mag beschouwd worden.

Summary

Elevated tropospheric ozone concentrations (O_3) are not only harmful for human health, but they may also have detrimental effects on agricultural and horticultural crops, trees, grassland and natural ecosystems. In the past, an O_3 exposure index and critical levels for the protection of vegetation have been agreed upon at European level based on atmospheric O_3 concentrations and exposure time. According to the European Air Quality guideline 2008/50/EG, the AOT40 (Accumulated Ozone exposure over a Threshold of 40 ppb) was defined as the sum of hourly O_3 concentrations above a cut-off of 40 ppb, from 8 to 20 h during the growing season. This indicator is presently being used in MINA-plan 4 (2011-2015) to monitor the evolution of the risk for O_3 damage to vegetation in Flanders. The European long term objective is 3000 ppb.h (=6000 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).h), the critical level for O_3 damage to sensitive crops and natural vegetation.

Despite the significant improvement in comparison to previous risk assessments, the scientific community has always been well aware of the limitations of this concept by the fact that any factor which may influence a plant's response to O_3 is largely ignored. The O_3 impact is primarily correlated to the amount of O_3 entering the plant which represents only a part of the surrounding atmospheric O_3 concentration. O_3 uptake is controlled by the degree of opening of the leaf stomata (stomatal conductance), that also regulate CO_2 and H_2O exchange. This mechanism allows the plant to adapt the degree of transpiration and photosynthetic activity to changes in environmental conditions. Consequently, also O_3 uptake is dependent upon climatic changes (temperature, air and soil moisture, irradiance ...) and plant-specific characteristics (number of stomata, phenology ..., Figure 2).

During the last 10 years there has been an intensive development of methods for the estimation of O_3 uptake by plants and to obtain reliable dose-response relationships based on the O_3 flux in order to more accurately assess the effects of O_3 . For this purpose, multiplicative models of stomatal conductance, such as the DO_3SE model (Deposition of Ozone and Stomatal Exchange), have been suggested as a basis for calculating the hourly O_3 flux. In deriving dose-response relationships, it has also been observed that the best correlations between effect and accumulated stomatal flux were obtained when using a stomatal flux threshold Y (Figure 4 and 5). This resulted in a new indicator for estimating the O_3 impact on yield and biomass accumulation of crops, forest trees and grassland: the **Phytotoxic Ozone Dose POD_Y** ($\text{mmol } O_3 \text{ m}^{-2} \text{ plant leaf area}$), which is the sum of the hourly stomatal O_3 flux over a threshold of $Y \text{ nmol } O_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ accumulated during daylight hours over the appropriate time-window.

The POD_Y value can be applied for the risk assessment of O_3 damage to vegetation in different ways:

- POD_Y is calculated on the basis of a validated species-specific stomatal flux model (available for wheat, potato, tomato, birch/beech, Norway spruce, grassland) and compared to the stomatal flux based critical level above which direct adverse effects may occur according to present knowledge (Table 2). This application is suitable for mapping and quantifying impacts at local and regional scale. In combination with data on land cover this can be used for assessing economic losses.
- POD_Y is calculated on the basis of a simplified flux model that is parameterised for a generic species representative for a certain vegetation type (crops, forests ...) and is specifically designed for application on large-scale modelling, including integrated assessment modelling. No critical levels are defined and the calculated O_3 uptake is viewed as an indicator of the degree of risk of negative impacts.

Next to the long term indicator for risk assessment of chronic O_3 exposure, there have also been some recent improvements with regard to the short term O_3 indicator to estimate the risk for acute, visible O_3 injury. The $\text{AOT30}_{\text{VPD}}$ (VPD-modified concentration accumulated over a threshold concentration of 30 ppb) takes into account the modifying influence of vapour pressure deficit (VPD) on the stomatal O_3 flux. This is especially useful to estimate the likelihood of visible injury on leafy vegetables where leaf injury reduces the quality and market value (e.g. spinach, lettuce ...). The critical level for visible injury (on at least 10% of the leaf area) is exceeded if the $\text{AOT30}_{\text{VPD}}$, accumulated during daylight hours over 8 days, is higher than 0.16 ppm h.

A Flanders-wide calculation of the POD can be achieved via the Fortran version of the DO₃SE model. This version of DO₃SE was implemented into the European air quality model hosted by EMEP (EMEP model). This implementation can hence serve as a guide for building a Flemish POD model.

The methodology for the calculation of the stomatal conductance in itself is quite complex, but has been included into the DO₃SE model in a simplified way in order to facilitate the calculation of the POD in practice. The problem can be situated, after all, especially in the numerous environmental variables needed to calculate the POD, including, for example photosynthetically active radiation, soil moisture, growing season of crops, etc. During the implementation of DO₃SE into the EMEP model once again a number of simplifications has been carried out because of problems with some input parameters.

We have oriented ourselves to a large extent in this report to the DO₃SE version as it is implemented in the EMEP model. The most obvious way to construct a similar model for Flanders would be a coupling of DO₃SE to the Chimere model. This state-of-the-art air quality model is operational at IRCEL and is used both for assessments and for air quality forecasts. The implementation of DO₃SE in "a" regional air quality model is in any case necessary because of the presence of a large part of the necessary input in these models.

The investigation of the availability of the necessary meteorological input parameters (and the derived parameters) was for this reason carried out starting from the assumption that DO₃SE will be implemented into Chimere. With respect to the meteorological input parameters it became clear that all the necessary basic parameters are present in Chimere. Concerning soil moisture, the parameter present in Chimere can be converted to the necessary input for DO₃SE. For a number of input parameters, there are also alternative sources available, such as for soil moisture and land use information.

As the source of ozone concentrations, we propose to use hourly values from the RIO interpolation method. Those are very close to the measurements, however with the advantage of area covering concentration fields. The calculation of the chemical transformations may be turned off in Chimere and the ozone concentrations originating from RIO are read. Those concentrations have yet to be converted into the relevant ozone concentrations on vegetation height. Depending on the vegetation under consideration (e.g. agricultural crops, forests) another vegetation height must be taken into account. This can be carried out either through the deposition model present in Chimere or through the conversion factors reported in the Mapping Manual.

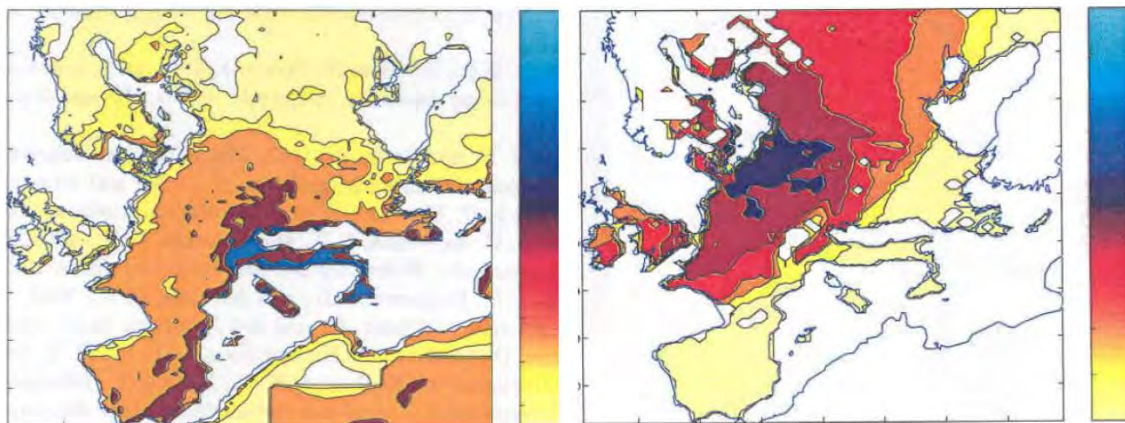
Summarizing, this study has shown on the one hand that all relevant input parameters for DO₃SE are either available for Flanders, or can be calculated in a parameterized way. On the other hand the study has shown that with the Chimere and RIO models and with the version of DO₃SE implemented in the EMEP model, all important building blocks exist to construct a Flemish POD model. The added value of an estimate of the ozone damage to vegetation based on the POD compared to an estimate based on the AOT40 is so large that the effort necessary for the construction of a POD model for Flanders seems absolutely justified.

1 Inleiding

In deze studie werd onderzoek verricht naar de haalbaarheid van een indicator voor de beschrijving van de ozonschade aan vegetatie in Vlaanderen, gebaseerd op de ozonflux. In tegenstelling tot indicatoren die gebaseerd zijn op de atmosferische ozonconcentratie levert de ozonflux een inschatting van de ozonschade op basis van de hoeveelheid ozon die een plant effectief opneemt via de huidmondjes. Deze benadering vertoont een beduidend hogere correlatie met de uiteindelijke plantrespons.

De verschillen tussen een inschatting van de ozonschade aan vegetatie op basis van de ozonconcentratie (bv. AOT40) en deze op basis van de ozonflux kunnen zeer groot zijn. Figuur 1 toont twee berekeningen uitgevoerd via het EMEP model: de afbeelding aan de linkerkant toont waar zich er in Europa in de periode mei t.e.m. juli 1999 de hoogste ozonconcentraties (AOT40) voorgedaan hebben, de afbeelding aan de rechterkant toont een risico-inschatting voor juni 1999 o.b.v. de ozonflux. Het wordt duidelijk dat in het geval van een beoordeling op basis van de ozonflux de gebieden met het hoogste risico niet langer in Zuid-Europa (vooral Italië) liggen maar dat deze gebieden verschuiven naar Centraal- en Noordwest-Europa (Polen, Duitsland, Denemarken, Nederland, België).

Figuur 1: Verschil tussen de level I-benadering (gebaseerd op AOT40ppb) 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).

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

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).

Een inschatting gebaseerd op de ozonflux is echter methodologisch beduidend veeleisender dan een inschatting op basis van de ozonconcentratie. Een potentieel struikelblok voor de toepassing ervan zijn de vele invoerparameters die mogelijks niet (of niet met voldoende nauwkeurigheid) gebiedsdekkend voor Vlaanderen beschikbaar zijn.

Het in deze studie verrichte onderzoek kan onderverdeeld worden in drie luiken:

In het eerste luik werd een literatuurstudie uitgevoerd naar de stand van de wetenschap inzake methodologieën om de schade aan planten op basis van de ozonflux te beschrijven. Verder werd er op zoek gegaan naar de meest geschikte indicator hiervoor. In het tweede luik werd nagegaan welke invoerparameters nodig zijn om de voorgestelde indicator gebiedsdekkend voor Vlaanderen te berekenen. Daarnaast werd onderzocht of (en waar) deze parameters beschikbaar zijn of hoe zij kunnen berekend of ingeschat worden met een voldoende mate aan nauwkeurigheid. In het derde luik werd onderzocht op welke manier de berekening van een dergelijke indicator praktisch zou kunnen

uitgevoerd worden. Er werd nagegaan welke concrete stappen hiervoor nodig zijn en op welke manier een model voor de berekening van een ozonflux-indicator zou kunnen opgebouwd worden.

Dit eindrapport beschrijft de resultaten van het uitgevoerde onderzoek en is als volgt gestructureerd: In Hoofdstuk 2 beschrijven we het uitgevoerde literatuuronderzoek en de keuze van de meest geschikte ozonfluxindicator. In Hoofdstuk 3 beschrijven we de methodologie voor de berekening van de ozonfluxindicator stap voor stap en gaan de beschikbaarheid van alle invoerparameters na voor Vlaanderen. In Hoofdstuk 4 tenslotte gaan we na op welke manier we op de meest efficiënte wijze een model zouden kunnen bouwen om een ozonfluxindicator te kunnen berekenen voor Vlaanderen, waarbij we maximaal gebruik maken van bestaande databanken en modellen.

2 Literatuurstudie ozonflux-indicatoren

* Deze literatuurstudie is grotendeels gebaseerd op de grenswaarden en modellen zoals voorgesteld in de meest recente versie van de Mapping Manual (Mills et al., 2011), samengesteld door de meest prominente Europese experts en zoveel mogelijk rekening houdend met de huidig beschikbare kennis.

2.1 Historiek

Net zoals te hoge troposferische ozonconcentraties (O₃) nadelig zijn voor de menselijke gezondheid, zo ook kunnen planten hiervan nadelige gevolgen ondervinden. Ter bescherming van de vegetatie werden op Europees niveau in het verleden reeds O₃-indicatoren voorgesteld op basis van de atmosferische O₃-concentraties en blootstellingsduur. Het Göteborg protocol van 1999 is het eerste verdrag dat onder de Conventie voor Lange-Afstands- en Grensoverschrijdende Luchtverontreiniging (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP, <http://www.unece.org/env/lrtap/executivebody/welcome.html>) specifiek aandacht besteedt aan de controle van O₃-verontreiniging. Door de beperkte informatie in verband met dosis-respons relaties werden hierbij nog relatief eenvoudige indicatoren en grenswaarden voorgesteld (zogenaamde Critical Level I). De blootstellingsindex AOT40 (Accumulated Ozone exposure Over a Threshold of 40 ppb) werd in de Europese richtlijn Luchtkwaliteit 2008/50/EG gedefinieerd als de sommatie van uurgemiddelde O₃-concentraties boven 40 ppb (en verminderd met 40 ppb) van 8 tot 20u gedurende het groeiseizoen. Op basis van experimentele dosis-respons relaties tussen deze AOT40 en het optreden van zichtbare schade of opbrengstreductie, konden aldus grenswaarden gedefinieerd worden die bij overschrijding een risico betekenen voor de meest gevoelige gewassen en bomen (Tabel 1).

Tabel 1: Level I grenswaarden op basis van de geaccumuleerde O₃-concentraties boven 40 ppb (AOT40) die aanleiding kunnen geven tot nadelige effecten op verschillende vegetatietypes
VPD = dampdrukdeficiet

| vegetatie type | schade | grenswaarde (AOT40) |
|--|-------------------------------------|---|
| landbouwgewassen & natuurlijke vegetatie | > 5% opbrengstreductie | 3000 ppb h ged. 3 maanden (mei-juli) |
| | zichtbare schade | 500 ppb h ged. 5 dagen als VPD > 1,5 kPa |
| | | 200 ppb h ged. 5 dagen als VPD < 1,5 kPa |
| bomen | > 10% reductie van de biomassa/jaar | 10.000 ppb h ged. 6 maanden (april - september) |

Bron: Kärenlampi en Skarby (1996)

Deze zogenaamde Critical Level I benadering betekende toen reeds een belangrijke verbetering van de bestaande risico-evaluaties maar de toepasbaarheid ervan werd beperkt door het feit dat de O₃ impact vooral gerelateerd is aan de eigenlijke ozonopname (de zgn. O₃-flux) die beïnvloed wordt door een veelheid aan plantspecifieke en omgevingsfactoren. 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 O₃-regime in een bepaalde regio en voor een welbepaald gewas. Voor een economische kosten-baten analyse van politieke maatregelen ter reductie van de atmosferische ozonconcentratie, is dit echter een absolute noodzaak.

De wetenschappelijke gemeenschap was zich dan ook van bij het begin bewust dat een verdere verbetering en verfijning van de methodologie voor de inschatting van ozonschade (de zogenaamde Level II benadering) absoluut noodzakelijk was (Gerzensee Workshop, 1999; Fuhrer and Achermann, 1999; Fuhrer, 2000). Dit kan op verschillende manieren gebeuren:

- modificatie van de berekening van AOT-waarden door een correctiefactor f_{VPD} toe te passen die rekening houdt met de invloed van Vapour Pressure Deficit op de stomataire O₃-flux (VPD-modified O₃ concentration $[O_3]_{VPD} = f_{VPD} * [O_3]$). Deze index kan gebruikt worden voor risico-

evaluatie van zichtbare schade ten gevolge van een korte O_3 -episode. Dit is vooral nuttig voor groentegewassen waarvan de economische waarde sterk beïnvloed wordt door eventuele bladschade (bv. spinazie, sla ...). De grenswaarde voor zichtbare schade (op minstens 10% van de bladeren) is overschreden als de $AOT30_{VPD}$ tijdens daglichturen over 8 dagen 0.16 ppm.h overschrijdt (Karlsson et al., 2003a; Karlsson et al., 2004).

- ontwikkeling van een O_3 -fluxmodel waarbij de O_3 -opname kan gemodelleerd worden op basis van veranderingen in stomataire conductiviteit ten gevolge van omgevingsfactoren en plantspecifieke eigenschappen. Hierbij worden de effecten gerelateerd aan de geaccumuleerde O_3 -opname, de fytotoxische Ozon Dosis POD.

Tijdens de UN-ECE Expert Panel meeting in Harrogate (2002) en de Ozone Critical Level II meeting in Göteborg (2002; Karlsson et al., 2003b) werd bevestigd dat de O_3 -fluxmodellen die op dat moment beschikbaar waren voor tarwe, aardappel en beuk/berk voldoende betrouwbaar waren om grenswaarden voor O_3 -schade te definiëren op basis van de berekende O_3 -opname (Ashmore et al., 2004). Voor een geïntegreerde risicobeoordeling op grotere schaal werd een "worst-case" scenario voorgesteld voor generische gewassen en bosbomen (Obergrugl Workshop, 2005; Wieser and Tausz, 2006; ICP-Vegetation Task Force Meetings). Dit model is niet gekoppeld aan grenswaarden, maar gaat er van uit dat een toenemende flux gepaard gaat met een toenemend risico. Tijdens de Ispra Workshop (2009, UNECE 2010) en de 23^{ste} Task Force Meeting van ICP Vegetation (2010, Harmens et al., 2010) werden de grenswaarden herzien, indien nodig verbeterd en opgenomen in de Mapping Manual – revision 2011 (Mills et al., 2011).

2.2 Van O_3 -concentratie tot opname: van AOT naar POD

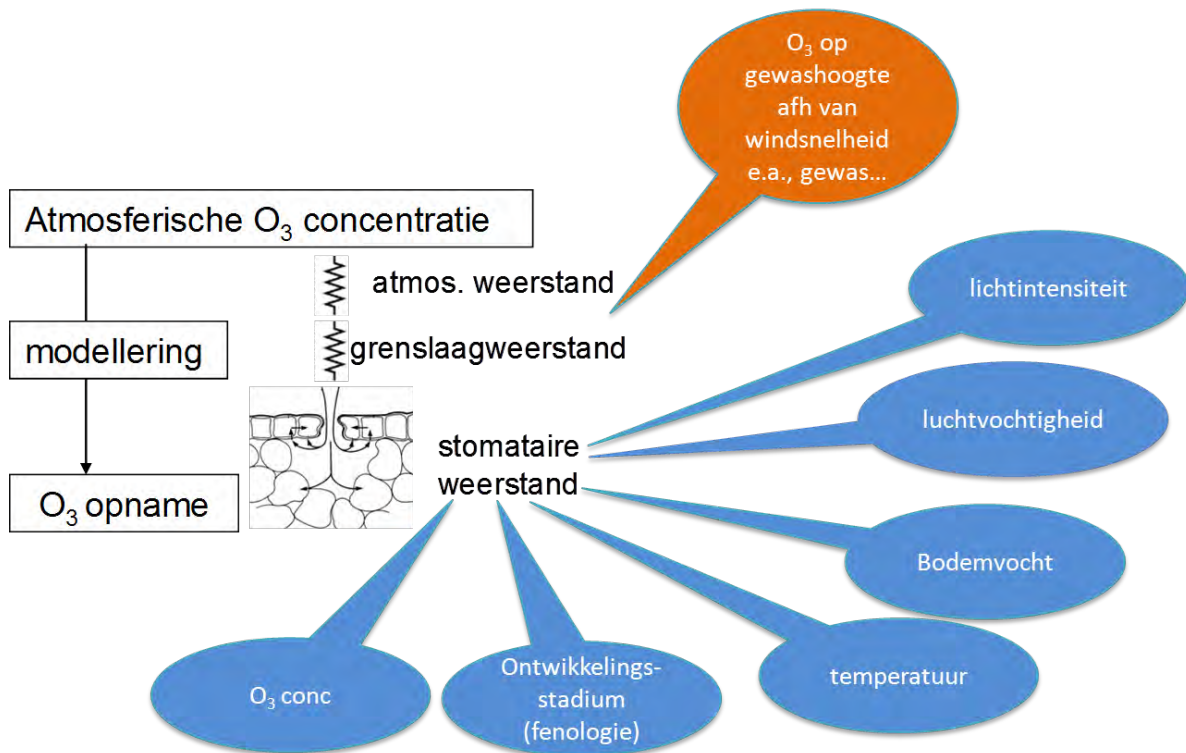
De relatie tussen de O_3 -concentraties op EMEP (European Modelling and Evaluation Programme) referentiehoogte (50 m) en de uiteindelijke opname door de plant is op verschillende niveaus afhankelijk van allerlei omgevingsfactoren (Figuur 3):

1. De extrapolatie van de O_3 -concentratie gemeten op referentiehoogte naar de eigenlijke concentratie op gewashoogte wordt bepaald door de *aerodynamische weerstand* (of soms ook *atmosferische weerstand* genoemd) en de *grenslaagweerstand*. De aerodynamische weerstand wordt bepaald door turbulentie, gedreven door mechanische (wind) en thermische krachten (convectie). Bij windstilte wordt atmosferisch transport vooral door moleculaire diffusie gedreven. Gedurende zonnige dagen worden de luchtlagen in belangrijke mate door opstijgende lucht gemengd. Menging van de luchtlagen door wind is ook afhankelijk van de wrijving met het aardoppervlak. Hoe ruwer het vegetatie-oppervlak, des te meer mechanische turbulentie geproduceerd wordt bij een bepaalde windsnelheid. Vandaar dat de aerodynamische weerstand voor O_3 -transport groter is voor akkerbouwgewassen dan voor naaldbomen. De (blad)grenslaag is een stabiele, quasi laminaire luchtlaag die het blad of het gewas als een enveloppe omgeeft. De grenslaagweerstand is in de eerste plaats afhankelijk van de windsnelheid (grenslaag wordt dunner bij hogere windsnelheid) en van bladkarakteristieken zoals oriëntatie, grootte en vorm, epidermis en beharing.

2. De *stomataire weerstand* is bepalend voor de hoeveelheid O_3 die op gewashoogte door het blad wordt opgenomen. O_3 dringt in de plant via de huidmondjes (= stomata). Naarmate deze meer geopend zijn, zal er meer O_3 in het blad kunnen binnendringen. De stomataire conductiviteit g_{sto} (= stomataire weerstand⁻¹) wordt bepaald door het aantal huidmondjes, hun grootte, anatomische karakteristieken van de sluitcellen en grootte van de stomataire opening. Deze kenmerken zijn eigen aan de plant en veranderen niet op korte termijn. De openingsgraad van de huidmondjes daarentegen is afhankelijk van velerlei omgevingsfactoren. Droge klimaatomstandigheden met hoge temperaturen, weinig bodemvocht en lage luchtvochtigheid hebben een sluiting van de huidmondjes tot gevolg om transpiratie en overmatig vochtverlies van de plant tegen te gaan.

Het is dus duidelijk dat wat betreft aerodynamische en stomataire weerstand, periodes met hoge O_3 -concentraties vaak gepaard gaan met omgevingsfactoren die de eigenlijke ozonopname beperken. Vandaar dat een duidelijk onderscheid dient gemaakt te worden tussen het begrip *ozonblootstelling*, die bepaald wordt door de concentratie en tijd, terwijl de *ozonopname* daarenboven afhankelijk is van de stomataire conductiviteit die beïnvloed wordt door plantspecifieke kenmerken en omgevingsfactoren.

Figuur 2: Bij de modellering van de O₃-opname dient rekening gehouden te worden met de atmosferische weerstand, grenslaagweerstand en stomataire weerstand van het gewas. Deze zijn op hun beurt afhankelijk van verschillende omgevings- en meer plantspecifieke factoren



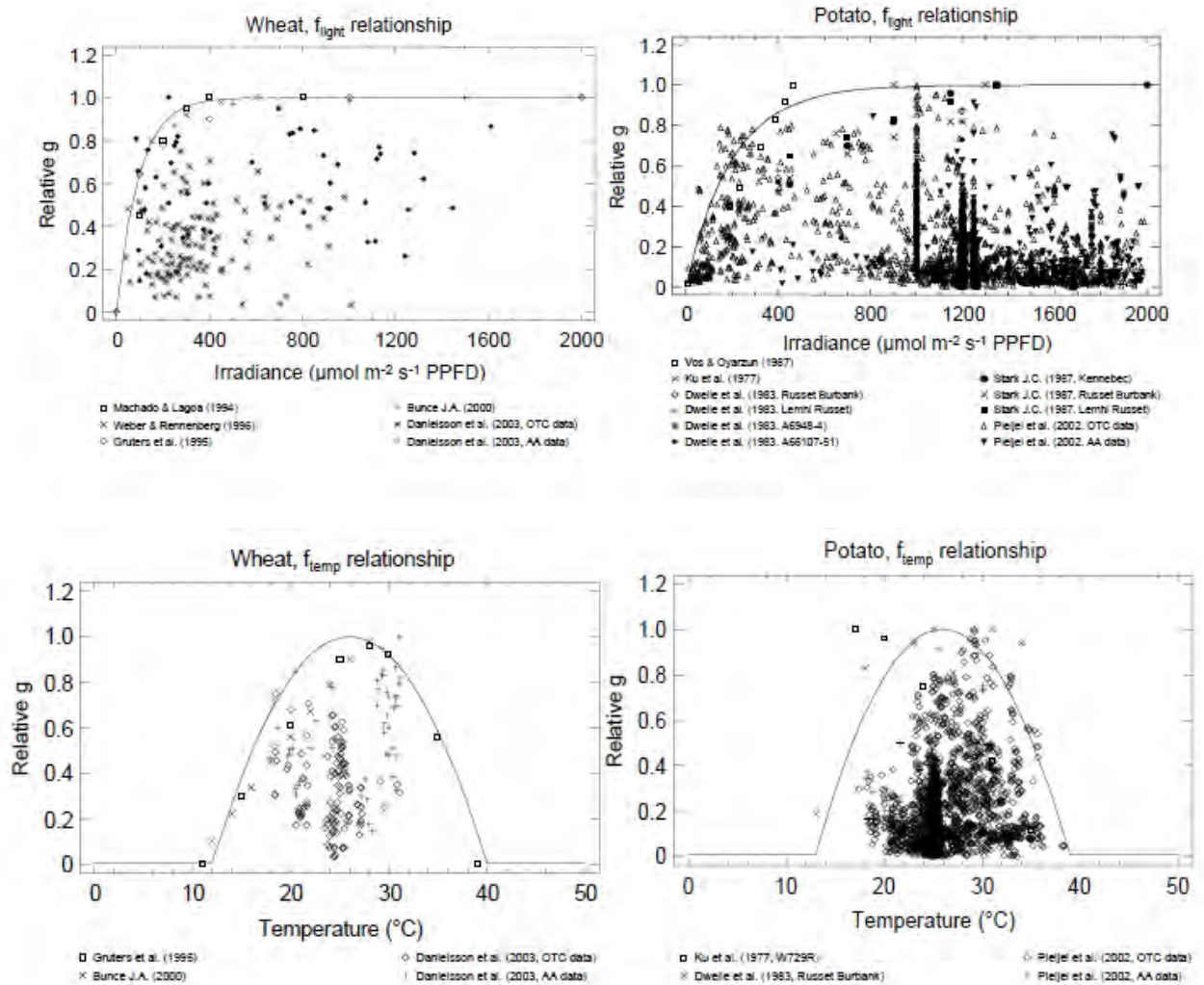
Bron: CODA

2.3 Definitie en berekening van fytotoxische ozon dosis POD_Y

POD_Y ($\text{mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ Plant Leaf Area (PLA)}$) is de geaccumuleerde stomataire O₃-flux per m² bladoppervlak, tijdens daglichturen en boven een flux drempelwaarde van $Y \text{ nmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA s}^{-1}$.

Deze O₃-indicator geeft een berekening van de hoeveelheid O₃ die de stomata binnendringt en houdt daarbij rekening met de invloed van luchttemperatuur, luchtvochtigheid, lichtintensiteit, bodemvocht, O₃-concentratie en ontwikkelingsstadium van de plant. De stomataire conductiviteit wordt voor elk gewas door elk van deze parameters op een andere manier beïnvloed (Figuur 3).

Figuur 3: Invloed van stralingsintensiteit en temperatuur op relatieve stomataire conductiviteit g_{sto} van tarwe en aardappel (t.o.v. maximale g_{sto}) (zie Pleijel et al. (2007) voor verdere details en referenties)



Bron: Pleijel et al. (2007)

De berekening kan gebeuren volgens bestaande en gevalideerde receptorspecifieke stomataire O_3 -fluxmodellen (tarwe, aardappel, tomaat, berk/beuk, spar, grasland/klaver). Deze modellen zijn vooral geschikt om de O_3 -impact eerder op lokale en regionale schaal te kwantificeren. Daarnaast kan de POD ook op een ruimere schaal toegepast worden op basis van een vereenvoudigd fluxmodel dat ontwikkeld en geparametriseerd werd voor een generieke receptor, representatief voor een bepaald vegetatietype (akkerbouwgewas, bosbomen ...)

Voor de berekening van de totaal geaccumuleerde O_3 -flux (opname) POD_Y door (zonbelichte) bladeren dienen volgende stappen ondernomen te worden, rekening houdend met de receptor-specifieke parametrisatie:

1. Bepaling van de relevante accumulatieperiode (groeiperiode van specifiek of generiek gewas).
2. Berekening van uurgemiddelde O_3 -concentratie op gewashoogte $c(z_1)$ (= top van het bladerdek) voor elk daglichtuur van de accumulatieperiode (zie verder). Het bovenste bladerdek ontvangt de meeste zonnestraling en deze bladeren beschikken over de hoogste gasuitwisselingscapaciteit zowel wat betreft CO_2 als O_3 . Deze bladeren leveren dan ook de grootste bijdrage tot de biomassa-productie, maar ook tot de O_3 -opname.
3. Berekening van uurgemiddelde stomataire conductiviteit g_{sto} voor elk daglichtuur op basis van het stomatair flux algoritme. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van het DO_3SE -model (Deposition

of Ozone for Stomatal Exchange <http://sei-international.org/do3se>), gebaseerd op Emberson et al. (2000).

4. Berekening van de uurgemiddelde stomataire O_3 -flux (F_{st} , $\text{nmol } O_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA s}^{-1}$) = uurgemiddelde stomataire conductiviteit x uurgemiddelde O_3 -concentratie op gewashoogte.
5. Deze uurgemiddelde stomataire O_3 -flux wordt vervolgens verminderd met de fluxdrempelwaarde Y en vermenigvuldigd met 3600 om de totaal geaccumuleerde O_3 flux/uur boven de drempelwaarde Y te bekomen ($F_{st}Y$, $\text{nmol } O_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA u}^{-1}$). De drempelwaarde (threshold) is de flux waarboven de schadelijke effecten zich beginnen te accumuleren (cfr. 40 ppb voor AOT40). Deze drempelwaarde is afhankelijk van de receptor in kwestie omdat ze samenhangt met de defensiecapaciteit (antioxidatief vermogen) van het gewas (Pleijel et al., 2007).
6. Berekening van POD_Y ($\text{mmol m}^{-2} \text{ PLA}$) = som van alle $F_{st}Y$ waarden (u^{-1}) tijdens daglichturen gedurende de receptor-specifieke accumulatieperiode.

De uiteindelijk bekomen POD_Y waarde kan vervolgens vergeleken worden met de (receptorspecifieke) grenswaarden (critical levels) om na te gaan of de limietwaarde voor een bepaald schadelijk effect al dan niet overschreden werd (zie verder onder dosis-respons relaties), dan wel 'as such' geïnterpreteerd worden als een indicator voor het risico op negatieve effecten.

2.4 Van O_3 -opname tot effect

Het effect van een bepaalde opgenomen hoeveelheid O_3 kan sterk verschillen van plantensoort tot plantensoort en zelfs tussen verschillende cultuurvariëteiten binnen één soort. Dit laatste is o.a. afhankelijk van de antioxidantia in de apoplast (extracellulair) en de daaropvolgende biochemische reacties in de symplast (intracellulair).

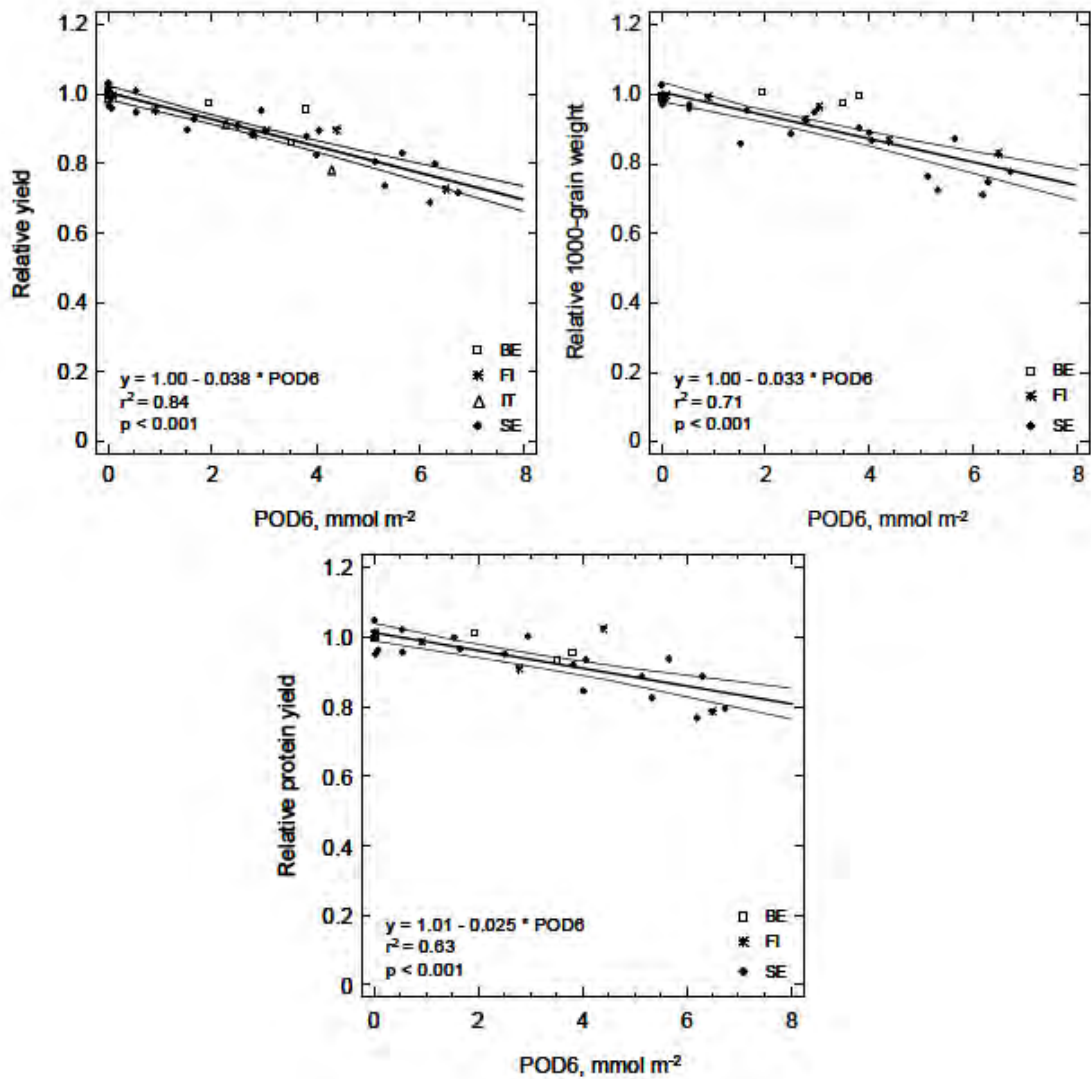
Na opname door de stomata wordt O_3 in de waterige matrix van de celwand, de apoplast, grotendeels omgezet tot reactieve zuurstofspecies (ROS) bestaande uit hydroxylradicalen (OH^*), superoxide-anionen (O_2^*), waterstofperoxide (H_2O_2) en peroxy radicalen. Over het algemeen wordt aangenomen dat de meeste schade te wijten is aan het sterk oxidatief vermogen van deze componenten. Ook celmembranen blijken zeer gevoelig te zijn voor O_3 -aantasting waardoor de celinhoud verloren gaat en celdood optreedt. De ROS die de cel binnendringen, kunnen wijzigingen in enzymactiviteit teweeg brengen en DNA schade veroorzaken. Zowel in de apoplast als in de symplast bevinden zich een aantal defensiemechanismen zoals antioxidantia (ascorbaat, fenolen, polyamines) en anti-oxidatieve enzymen (peroxidasen, superoxide dismutase (SOD) ...) die bescherming kunnen bieden tegen O_3 en ROS (Barnes et al., 2002). De plant zal pas schade ondervinden wanneer het antioxidantief verdedigingssysteem van de plant niet langer in staat is de verspreiding van O_3 en daarvan afgeleide reactieve zuurstofspecies (ROS zoals OH^* , superoxide) in de cel tegen te gaan, noch teweeggebrachte veranderingen te compenseren. De plantenschade die ontstaat, varieert naargelang de intensiteit en duur van de O_3 -blootstelling, de gevoeligheid en het ontwikkelingsstadium van de plant, maar wordt ook in belangrijke mate bepaald door omgevingsfactoren die de stomataire opname beïnvloeden (Plöchl et al., 2000).

Acute schade wordt veroorzaakt door hoge atmosferische concentraties gedurende een korte blootstellingsperiode (enkele opeenvolgende dagen). De toxische reacties van O_3 of ROS met celbestanddelen leidt tot celdood wat tot uiting komt in de vorm van fijne stippeling op de bovenzijde van het blad, grotere necrosen tussen de nerven (ook zichtbaar aan de onderzijde van het blad), bronzing en chlorose (verbleking). Een langdurige blootstelling aan lagere concentraties kan aanleiding geven tot minder zichtbare, maar toch belangrijke "chronische" schade op fysiologisch en biochemisch niveau die uiteindelijk groei- en opbrengstreducties tot gevolg hebben. Dit betekent dat productieverlies kan optreden zonder zichtbare schade en omgekeerd. Productieverlies kan ontstaan doordat de biosynthese over langere periode geremd wordt door verminderde fotosynthese-capaciteit en/of een kortere vegetatieperiode ten gevolge van vervroegde afrijping ("senescentie"). Bovendien kan er een verhoogde vraag optreden naar energie en assimilaten voor herstel van aangetaste celstructuren en -functies, ten koste van de uiteindelijke biomassa-productie. De plant komt hierdoor in een constante stresssituatie terecht waardoor hij minder in staat is om afweer te bieden aan andere ongunstige omgevingsfactoren en stresscondities. Er kan ook een verschuiving optreden in de verdeling van de assimilaten over verschillende plantendelen. Wat betreft kwaliteitseffecten bestaat er momenteel minder informatie, maar dit aspect mag zeker niet onderschat worden (Piikki et al., 2008; Vandermeiren et al., 2005, 2012).

2.5 Dosis-respons relaties en hun interpretatie

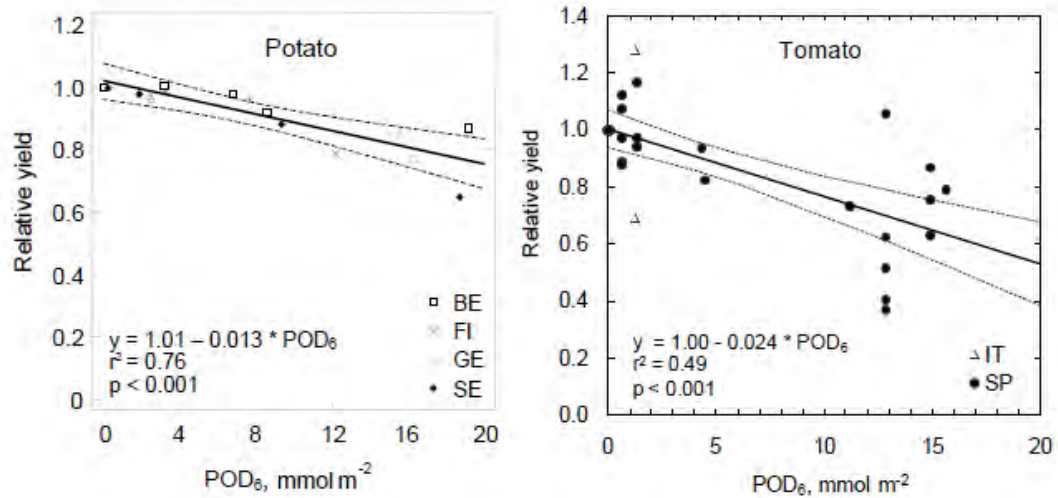
Om een bepaalde O_3 -opname te kunnen relateren aan één of ander effect, dient men te beschikken over statistische significante dosis-respons relaties. Deze respons kan gaan van zichtbare schadesymptomen tot kwaliteitseffecten, maar de meeste beschikbare gegevens staan in verband met de opbrengst van economisch waardevolle gewassen (tarwe, aardappelen ...). Hierbij werden de beste correlaties met de O_3 -dosis verkregen wanneer rekening werd gehouden met een drempelwaarde Y voor stomataire flux (Danielsson et al., 2003; Pleijel et al., 2002). Voor tarwe, aardappel en tomaat bleek een drempelwaarde van $6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ de meest significante resultaten op te leveren (Pleijel et al., 2007; Calvo et al., 2007). Op basis van open-top chamber experimenten met veldgewassen in verschillende Europese landen konden o.a. voor aardappel, tarwe en tomaat betrouwbare dosis-respons relaties berekend worden tussen de relatieve opbrengst (RY) en de stomataire O_3 -flux (F_{st}) gebaseerd op de principes beschreven in Fuhrer (1994) (Figuur 4 en Figuur 5). In de afwezigheid van O_3 -effecten heeft de relatieve opbrengst een maximale waarde van 1 (=100%).

Figuur 4: Dosis-respons relaties (met 95% betrouwbaarheidsinterval) tussen de relatieve opbrengst (totale graanopbrengst, 1000-korrel gewicht en proteïne-opbrengst) en de POD6 voor tarwe. De functies zijn gebaseerd op resultaten voor 5 cultivars in 3 of 4 Europese landen.



Bron: Mills et al. (2011), Piikki et al. (2008), Pleijel et al. (2007)

Figuur 5: Dosis-respons relatie (met 95% betrouwbaarheidsinterval) tussen de opbrengst en POD_6 voor aardappel en tomaat



Bron: Calvo et al. (2007), Gerosa et al. (2008), Mills et al. (2011), Pleijel et al. (2007)

Deze dosis-respons relaties geven dus een indicatie van de relatieve opbrengstvermindering ten gevolge van een bepaalde O_3 -opname en laten tevens toe om de grenswaarde te bepalen waarboven een negatief O_3 -effect kan verwacht worden (Tabel 2).

Tabel 2: Grenswaarden voor negatieve O_3 -effecten op basis van POD_Y

| (a) Flux-based critical levels | | | |
|--|--------------------------------|-----------|--|
| Receptor | Effect (per cent reduction) | Parameter | Critical level ($mmol\ m^{-2}$ PLA) |
| Wheat | Grain yield (5%) | POD_6 | 1 |
| Wheat | 1000 grain weight (5%) | POD_6 | 2 |
| Wheat | Protein yield (5%) | POD_6 | 2 |
| Potato | Tuber yield (5%) | POD_6 | 5 |
| Tomato | Fruit yield (5%) | POD_6 | 2 |
| Norway spruce | Biomass (2%) | POD_1 | 8 |
| Birch and beech | Biomass (4%) | POD_1 | 4 |
| Productive grasslands (clover) | Biomass (10%) | POD_1 | 2 |
| Conservation grasslands (clover) | Biomass (10%) | POD_1 | 2 |
| Conservation grasslands (<i>Viola</i> spp), provisional | Biomass (15%) | POD_1 | 6 |

PLA: Plant Leaf Area

Bron: Mills et al. (2011)

3 Beschikbaarheid van invoerparameters voor de gebiedsdekkende berekening van de POD_Y

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zullen we stap voor stap nagaan hoe de POD_Y kan berekend worden voor Vlaanderen. De methodologie wordt in detail besproken en we gaan na of en waar de benodigde invoerparameters aanwezig zijn (of hoe ze kunnen berekend of ingeschat worden) om de fytotoxische ozondosis (POD) gebiedsdekkend voor Vlaanderen te berekenen. We gaan stap voor stap door de nodige berekeningen, telkens met het oog op de noodzakelijke invoerparameters en hun beschikbaarheid.

In hoofdstuk 4 van dit eindrapport gaan we vervolgens in op de praktische randvoorwaarden om effectief de POD_Y te berekenen. Wat is er nog nodig om een model voor de berekening van de POD op te zetten en op welke manier kunnen we hierbij zo veel mogelijk gebruik maken van bestaande data(banken), modellen, metingen etc.

We herhalen even de drie belangrijke formules voor de berekening van de POD_Y . De geaccumuleerde stomataire ozonflux boven een drempelwaarde van Y over het groeiseizoen heen wordt berekend gebruikmakend van de volgende formules:

$$POD_Y = \int \max(F_{st} - Y, 0) dt$$

De stomataire ozonflux F_{st} wordt hierbij berekend volgens

$$F_{st} = g_{sto} * O_3(z_1)$$

met

F_{st} = stomataire ozonflux

g_{sto} = stomataire conductiviteit

$O_3(z_1)$ = ozonconcentratie op gewashoogte.

De stomataire conductiviteit kan berekend worden volgens

$$g_{sto} = g_{max} f_{phen} f_{light} \max(f_{min}, f_T f_D f_{SW})$$

met

g_{max} : maximale stomataire conductiviteit

f_{phen} : fenologiefactor: invloed tijd van het jaar (cfr. groeiseizoen)

f_{light} : lichtfactor: aanwezigheid van fotosynthese-actieve straling

f_{min} : minimum stomataire conductiviteit

f_T : temperatuurfactor (invloed van koude en hitte)

$f_{(VP)D}$: vapour pressure deficit factor (factor voor limitatie door luchtvochtigheid)

f_{SW} : bodemvochtfactor (invloed van droogte)

De berekening van de stomataire conductiviteit is het belangrijkste onderdeel van de berekening van de POD. Kunnen we de stomataire conductiviteit en de ozonconcentratie op gewashoogte berekenen dan staat er in principe niets meer in de weg om de POD te berekenen. De verdere analyse spitst zich dan ook toe op deze twee parameters. In hoofdstuk 3.2 gaan we in op de berekening van de ozonconcentratie op gewashoogte en in hoofdstuk 3.3 op de berekening van de stomataire conductiviteit.

3.2 De berekening van de ozonconcentratie op gewashoogte

Het recent uitgevoerde MIRA project rond de bepaling van de best beschikbare generieke concentratiekaarten luchtkwaliteit voor België voor historische jaren (Maiheu et al., 2012) heeft aangetoond dat de meest "correcte" concentratiekaarten aangemaakt worden met behulp van de RIO-interpolatiemethode (Janssen et al., 2008, 2012). Dit is ook het geval voor ozon. Het is dan ook de bedoeling om uiteindelijk de POD te berekenen voor Vlaanderen, vertrekkend van de geïnterpoleerde observaties van de RIO-methode.

RIO berekent O₃-concentraties op 3 m hoogte boven de grond. De omrekening naar gewashoogte kan ofwel uitgevoerd worden via een depositiemodel ofwel via conversiefactoren. Beide methodes worden hier kort toegelicht.

- 1) Voor het depositiemodel, dat in de meeste gevallen een onderdeel is van een Chemisch Transportmodel (CTM) zoals Chimere, BelEUROS of AURORA, zijn, ideaal gezien, voor zover mogelijk 'lokale' meteorologische data nodig (bv. uit metingen). In de praktijk is dit echter nauwelijks mogelijk, of toch alleen maar voor een lokale berekening. Op het regionale niveau worden meestal gridcel-gemiddelde waarden afkomstig van een meteorologisch model gebruikt. In de meeste CTM's die we in Vlaanderen gebruiken (Chimere, BelEUROS, AURORA) is de meteo-invoer afkomstig van het ECMWF-model, het Europese meteomodel van het "European Centre for Medium-range Weather Forecast" in Reading, VK. Door de massale hoeveelheid van data-assimilatie waarmee het ECMWF model gecorrigeerd wordt liggen de modelwaarden (in vergelijking met andere meteomodellen) dicht bij de metingen.

Daarnaast zijn er ook 'lokale' gegevens nodig m.b.t. de ruwheidslengte en de hoogte van de vegetatie.

Voor de omrekening van de ozonconcentratie op 3 m hoogte naar de ozonconcentratie op een andere hoogte zou via het CTM gebruik gemaakt kunnen worden van de weerstandsbenadering, waarbij men onderscheid maakt tussen drie verschillende depositie-weerstanden:

- » Ra: aerodynamische weerstand
- » Rb: quasi laminaire grenslaag weerstand
- » Rc: canopy weerstand

- 2) Een tweede mogelijkheid bestaat erin om gebruik te maken van (simpele) conversiefactoren, zoals beschreven in de "Mapping Manual" (Mills et al., 2011). Tabel 3.7 op bladzijde III-16 van de Mapping Manual geeft typische ozongradiënten boven landbouwgewassen, grasland en bossen, in functie van de hoogte boven de grond. Deze gradiënten kunnen gebruikt worden voor de omrekening van de ozonconcentratie op één hoogte naar de concentratie op een andere hoogte.

Als voorbeeld hebben we hier de conversiefactoren berekend voor ozon voor de omrekening van O₃-concentraties op 3 m hoogte (cfr. RIO) naar ozonconcentraties op 1 m, 0,1 m en 20 m hoogte:

- voor landbouwgewassen (1 m hoogte): 0,93
- voor grasland (0,1 m hoogte): 0,77
- voor bossen (20 m hoogte): 1,04

Het wordt dus duidelijk dat de ozonconcentratie uit RIO, representatief voor een hoogte van 3 m, niet zomaar kan gebruikt worden voor landbouwgewassen en zeker niet voor graslanden. Een grasland met een hoogte van 10 cm is bijvoorbeeld gemiddeld maar aan 77 % van de ozonconcentratie op 3 m hoogte blootgesteld.

De conclusies m.b.t. deze twee mogelijkheden zijn:

- Het is in principe mogelijk om de ozonconcentratie afkomstig van RIO om te rekenen naar een ozonconcentratie relevant voor de verschillende vegetatietypes, gebruikmakend van de meteorologische informatie uit het ECMWF-model, zoals aanwezig bijvoorbeeld in het CHIMERE-model.

- Het is echter veel eenvoudiger om gebruik te maken van simpele (constante) conversiefactoren, zoals voorgesteld in de “Mapping Manual”.
- Een bijkomend aandachtspunt is dat we niet de ozonconcentratie zullen gebruiken die Chimere zelf berekent, o.a. op basis van de aanwezige meteo-informatie, maar dat we in plaats daarvan de ozonconcentraties uit RIO willen gebruiken. Met andere woorden, indien we de meteo-informatie uit ECMWF/Chimere gebruiken om de ozonconcentratie uit RIO om te rekenen, dan kunnen deze twee gegevens mogelijks helemaal niet bij elkaar passen. “Mist” Chimere bijvoorbeeld een ozonpiek, en is dit te wijten aan gebrekkige meteo-informatie, dan zal ook de omrekening van de ozonconcentratie uit RIO met diezelfde gebrekkige meteo waarschijnlijk geen goed resultaat opleveren. De vraag stelt zich dus of deze veel ingewikkeldere methode via het meteo- en depositiemodel van Chimere überhaupt veel meerwaarde heeft t.o.v. een conversie op basis van de gradiënten beschreven in de Mapping Manual.

3.3 De berekening van de stomataire conductiviteit via het DO₃SE-model

Het belangrijkste onderdeel van de berekening van de POD is de berekening van de stomataire conductiviteit. Deze is echter afhankelijk van vele verschillende parameters, zodat de berekening ervan geen triviale opgave is. Dit is ook de reden dat er al vanaf het jaar 2000 aan een software gewerkt wordt om de stomataire conductiviteit te berekenen, namelijk het DO₃SE-model (o.a. Emberson et al., 2000; Büker et al., 2012). Ondertussen is het DO₃SE-model in hoge mate aanvaard door de wetenschappelijke wereld als “de” standaardmethode voor de berekening van ozonfluxen naar vegetatie toe.

De keuze voor het DO₃SE-model om de stomataire conductiviteit te berekenen voor Vlaanderen ligt dan ook voor de hand, ook omwille van de beschikbaarheid van deze software.

De centrale vergelijking voor de berekening van de stomataire conductiviteit g_{sto} is het belangrijkste onderdeel van het DO₃SE-model.

$$g_{sto} = g_{max} f_{phen} f_{light} \max(f_{min}, f_T f_D f_{SW})$$

De stomataire conductiviteit wordt in feite per vegetatietype berekend, vertrekkende vanuit de maximale stomataire conductiviteit g_{max} . Afhankelijk van de omgevings situatie is de momentele stomataire conductiviteit in vele gevallen echter kleiner dan de maximale, en dit wordt in DO₃SE berekend via een zestal factoren, die allemaal een waarde tussen 0 en 1 kunnen aannemen en zo tot een bepaalde vermindering van de stomataire conductiviteit leiden. Om een simpel voorbeeld te noemen, hebben loofbomen in de winter geen bladeren, neemt de fenologiefactor f_{phen} de waarde nul aan en is de stomataire conductiviteit dus ook nul. De fenologie- en de lichtfactor wegen volledig door op de waarde van de stomataire conductiviteit, van de resterende factoren (minimale stomataire conductiviteit, temperatuurfactor, waterdampdruk deficitfactor en bodemvochtfactor) wordt alleen de factor met de hoogste waarde in rekening gebracht.

Er bestaan twee versies van het DO₃SE-model: een desktop versie met interface, waarmee een berekening kan uitgevoerd worden voor één locatie, en een Fortran code voor de integratie in een CTM, waarmee in principe gebiedsdekkende berekeningen uitgevoerd kunnen worden. Beide versies zijn vrij beschikbaar, de desktop versie via <http://sei-international.org/do3se> en de Fortran versie als onderdeel van het EMEP model (https://wiki.met.no/emep/page1/emepmscw_opensource).

Voor de doeleinden van deze studie is alleen de Fortran versie relevant. Wanneer we in het vervolg over het “DO₃SE” model spreken wordt altijd de Fortran code bedoeld, omdat alleen deze versie van DO₃SE toelaat berekeningen voor verschillende locaties in één keer uit te voeren. De desktop versie werd alleen ter informatie geraadpleegd, omdat deze met een gedetailleerdere handleiding voorzien is.

De Fortran code van DO₃SE is momenteel bij ons weten alleen geïmplementeerd in het EMEP MSC-W luchtkwaliteitsmodel (Simpson et al., 2012), of kort het EMEP model genoemd. Het EMEP model is “het” Europese regionale luchtkwaliteitsmodel dat in grote omvang gebruikt wordt voor de voorbereiding en evaluatie van het Europese luchtkwaliteitsbeleid. O.a. de NEC-plafonds, de

koppeling met het GAINS model etc. maken van het EMEP model het Europese standaard CTM. De resolutie waarmee het EMEP model rekt is ondertussen variabel gemaakt. Vroeger werd altijd een resolutie van 50 km over heel Europa gebruikt, maar nu kan men ook met EMEP met hogere resoluties werken.

Door de implementatie van DO₃SE in het EMEP model werd voor de eerste keer de gebiedsdekkende berekening van de POD voor heel Europa mogelijk. We stellen voor om een gelijkaardige aanpak te volgen voor Vlaanderen. De manier hoe DO₃SE geïntegreerd is in het EMEP-model en hoe de verschillende invoerparameters berekend worden is beschreven in:

Simpson D et al. (2012) The EMEP MSC-W chemical transport model – technical description, Atmos. Chem. Phys. 12, 7825-7865 (wetenschappelijk artikel + supplementary material).

In het vervolg zullen we de belangrijkste vergelijkingen, tabellen en figuren uit deze publicatie bespreken. De manier van implementatie in het EMEP model vormt de leidraad hoe een implementatie in bijvoorbeeld Chimere zou kunnen gerealiseerd worden. Zie hiervoor ook het hoofdstuk 4 van dit rapport.

3.3.1 De maximale stomataire conductiviteit g_{max}

Tabel 3 toont de g_{max} waarden voor verschillende landgebruiksklassen zoals gebruikt in het EMEP model. De landgebruiksklassen CF (naaldbossen, gematigde/noordelijke gebieden), DF (loofbossen, gematigde/noordelijke gebieden), TC (landbouwgewassen, gematigde/noordelijke gebieden) en GR (graslanden) zijn interessant voor onze toepassing, representeren ze toch de meest voorkomende vegetatievormen in Vlaanderen. De drie laatste codes (IAM_CR, IAM_DF en IAM_MF) representeren generieke species die toegevoegd werden in het EMEP model om informatie op Europese schaal te leveren aan de “integrated assessment community”.

Tabel 3: Parameters voor de berekening van de maximale stomataire weerstand via het DO_3SE -model (Simpson et al., 2012, Tabel S16)

| code | Landcover | h | Code | g_{max}^m |
|---------------------|----------------|--------|--------|-------------|
| Λ_c | | m | | † |
| CF | T/B conif | 20^2 | CF | 140 |
| DF | T/B decid | 20^2 | DF | 150 |
| NF | Med. needle | 8 | NF | 200 |
| BF | Med. broadleaf | 15 | BF | 200 |
| TC | T/B crop | 1 | TC | 300 |
| MC | Med. crop | 2 | MC | 300 |
| RC | Root crop | 1 | RC | 360 |
| SNL | Moorland | 0.5 | SNL | 60 |
| GR | Grass | 0.3 | GR | 270 |
| MS | Med. scrub | 2 | MS | 200 |
| WE | Wetlands | 0.5 | | |
| TU | Tundra | 0.5 | | |
| DE | Desert | 0 | | |
| W | Water | 0 | | |
| ICE | Ice | 0 | | |
| U | Urban | 10 | IAM_CR | 500 |
| IAM_CR ³ | Generic crop | 1 | IAM_DF | 150 |
| IAM_DF ³ | Generic DF | 20 | IAM_MF | 175 |
| IAM_MF ³ | Generic MF | 8 | | |

IAM_CR: generieke landbouwgewassen voor Integrated Assessment Modelling

IAM_DF: generieke loofbos voor Integrated Assessment Modelling

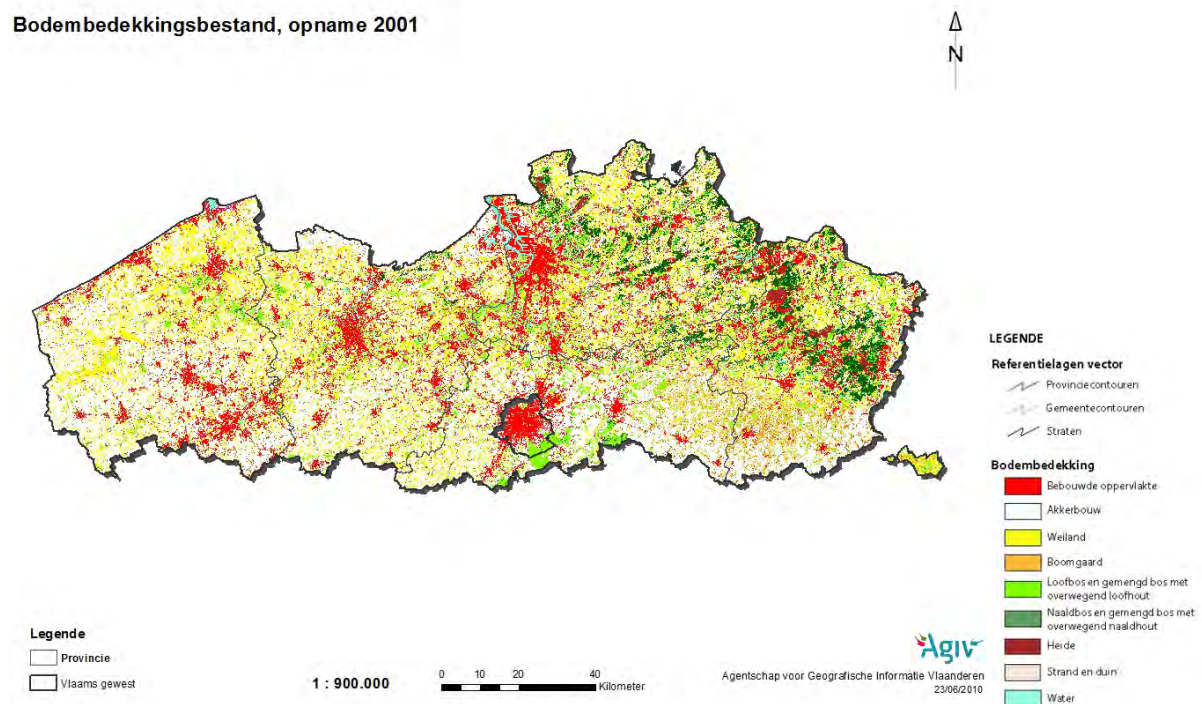
Bron: Simpson et al. (2012)

Deze 4 landgebruiksklassen (CF, DF, TC en GR) zouden moeten gekoppeld worden aan een Vlaamse landgebruikskartaar om berekeningen voor de specifieke gebieden waar deze vegetatietypes voorkomen uit te voeren.

Figuur 6 toont de bij AGIV (Geoloket) aanwezige bodembedekkingskartaar voor Vlaanderen. Deze bevat een behoorlijke maat aan detail en heeft een resolutie van 15 m. De bodembedekkingstypes akkerbouw, weiland, loofbos en naaldbos zouden kunnen gekoppeld worden aan respectievelijk de EMEP landgebruiksklassen TC, GR, DF en CF. De vraag stelt zich echter in hoeverre deze kartaar met gegevens voor 2001 nog actueel genoeg is. Het zou uiteraard beter zijn een landgebruikskartaar met recentere gegevens te kunnen gebruiken.

Figuur 6: Bodembedekkingskaart (Vlaanderen, opname 2001)

Bodembedekkingsbestand, opname 2001



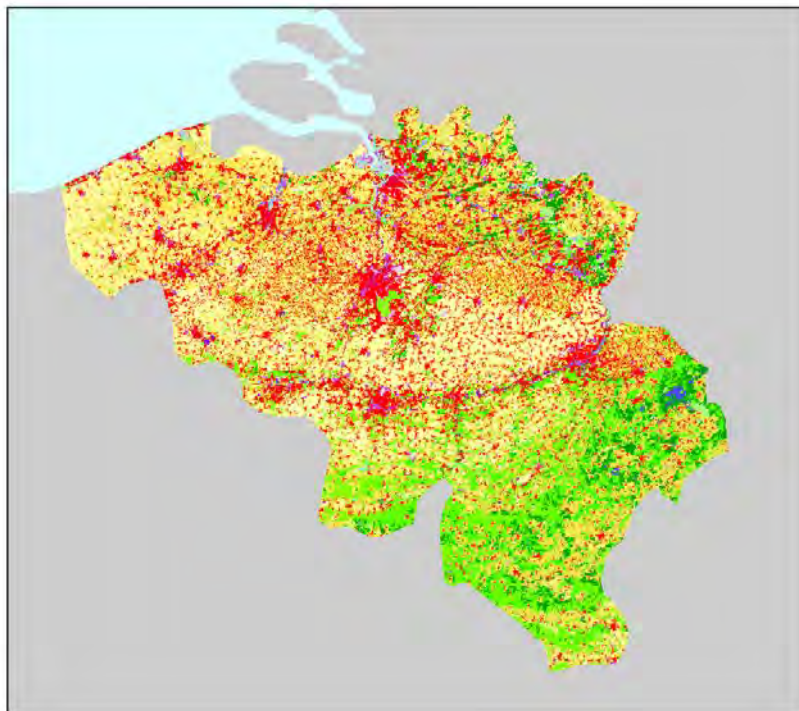
Bron: AGIV Geoloket (<http://geo-vlaanderen.agiv.be/geo-vlaanderen/bodemgebruik/>)

Bij AGIV staat ook een bodemgebruikskaart ter beschikking. Deze heeft echter al té veel verschillende niet-vegetatie landgebruiksklassen, hetgeen de toewijzing waarschijnlijk onnodig ingewikkeld maakt. De gegevens van deze kaart dateren ook van 2001.

Een tweede alternatief zou de Corine Land Cover kaart van 2006 (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/corine-land-cover-2006-by-country>) kunnen zijn. Deze landgebruikskaart heeft een resolutie van 100 m en het landgebruik wordt beschreven door middel van 44 landgebruiksklassen. Deze kaart wordt veelvuldig gebruikt in verschillende toepassingen in heel Europa en vandaag al gebruikt in Vlaanderen voor de berekening van de huidige indicator voor ozonschade aan planten (“Akkergronden met verminderde graanopbrengst door ozonblootstelling”) en ook in de RIO-interpolatiemethode.

Figuur 7 toont de Corine Landcover kaart 2006 voor België en de bijhorende legende.

Figuur 7: Corine Landcover kaart met legende (België, 2006)



Bron: Europees Milieugentschap EEA (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/corine-land-cover-2006-by-country>)

Een derde alternatieve landgebruikskaart zou de NARA 2013 landgebruikskaart kunnen zijn, die recent op VITO aangemaakt werd. Deze bevat zowel een zeer hoge mate aan geografische detailinformatie (resolutie van 10 m) alsook met een indeling in 117 (vooral vegetatie-gerelateerde) landgebruiksklassen een zeer gedetailleerde beschrijving van de verschillende vegetatietypes in Vlaanderen. Zo kan bijvoorbeeld op basis van deze kaart de ligging van een hele reeks van teelten bepaald worden, o.m. de teelt van aardappelen en deze van granen. (Een specifiek onderscheid naar types van granen (zoals tarwe etc.) is echter niet mogelijk op basis van deze kaart.) De geografische informatie die in deze kaart verwerkt is representeert de toestand 2005-2010.

Deze kaart zou echter reeds gebruikt kunnen worden om, in afwachting van een indicator op basis van de ozonflux, de huidige indicator "Akkergronden met verminderde graanopbrengst door ozonblootstelling" te verbeteren m.b.t. de beschikbare geografische informatie. Momenteel wordt deze indicator immers berekend op basis van de oppervlakte akkerland, waarbij in principe verondersteld wordt dat al het akkerland bedekt is met tarwe. Een verbetering zou dus kunnen bestaan uit het gebruik van de oppervlakte akkerland waarop granen verbouwd worden. Deze informatie kan gehaald worden uit de NARA 2013 landgebruikskaart.

Tabel 4 toont de 117 landgebruiksklassen van de NARA/VITO landgebruikskaart 2013.

Tabel 4: De 107 landgebruiksklassen van de NARA landgebruikskaart 2013 (Vlaanderen, 2013)

| Landgebruikskaart NARA versie 2013 | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------------|-----------------------------|-------------------|------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------|------|-------------------|--|--|------|-----------|--------------------------------------|--------------------|
| code | Niveau1 | Niveau2 | Niveau3 | code | Niveau1 | Niveau2 | Niveau3 | code | Niveau1 | Niveau2 | Niveau3 | code | Niveau1 | Niveau2 | Niveau3 |
| 0 | Overig | | | 29 | | naaldbos grove den | naaldbos grove den | 58 | | | vlas en hennep voedergewassen | 87 | | | laag groen |
| 1 | ander groen | ander hoog groen | ander hoog groen | 30 | | | Grove den | 59 | | | andere voedergewassen | 88 | | | overig |
| 2 | | ander laag groen | ander laag groen | 31 | | | Grove den + loofhout | 60 | | | bieten | 89 | industrie | | bebouwd |
| 3 | | ruigten & pioniersvegetatie | pioniersvegetatie | 32 | halfnatuurlijk grasland | voedselarm droog grasland | voedselarm droog grasland | 61 | | boomgaard (hoogtam) | boomgaard (hoogtam) | 90 | | | hoog groen |
| 4 | | struweel | struweel | 33 | | voedselarm nat grasland | voedselarm nat grasland | 62 | | boomgaard (laagtam) | boomgaard (laagtam) | 91 | | | laag groen |
| 5 | bos | loofbos ander | loofbos ander | 34 | | voedselrijk droog grasland | voedselrijk droog grasland | 63 | | cultuurgrasland permanent | cultuurgrasland permanent | 92 | | | overig |
| 6 | | Ander loofhout | | 35 | | voedselrijk nat grasland | voedselrijk nat grasland | 64 | | blijvend grasland | blijvend grasland | 93 | | Infrastructuur | Infrastructuur |
| 7 | | Beuk | | 36 | heide | droge heide | droge heide | 65 | | cultuurgrasland permanent | cultuurgrasland permanent | 94 | | militaire voorziening | bebouwd |
| 8 | | Beuk + naaldhout | | 37 | | vochtige en natte heide | vochtige en natte heide | 66 | | bomen (> 50 bomen per ha) | bomen (> 50 bomen per ha) | 95 | | | hoog groen |
| 9 | | Eik | | 38 | | kaal zand | kaal zand | 67 | | cultuurgrasland tijdelijk | cultuurgrasland tijdelijk | 96 | | | laag groen |
| 10 | | Eik + naaldhout | | 39 | | kustduin (andere) | kustduin (andere) | 68 | | graszoden | graszoden | 97 | | | overig |
| 11 | | loofbos ander | | 40 | | strand | strand | 69 | | fruit (kweek planten) | fruit (kweek planten) | 98 | | recreatie & sportterrein | bebouwd |
| 12 | | loofbos populier | | 41 | landbouw | akker | akker | 70 | | groenten | groenten | 99 | | | hoog groen |
| 13 | | Ander loofhout + naaldhout | | 42 | | | aardappelen | 71 | | jongplanten voor de sierteelt | jongplanten voor de sierteelt | 100 | | | laag groen |
| 14 | | loofbos populier | | 43 | | | aardbeiplanten | 72 | | | | 101 | | | overig |
| 15 | | Populier | | 44 | | | braak | 73 | | | | 102 | | Residentiele (commerciële) bebouwing | bebouwd |
| 16 | | Populier + naaldhout | | 45 | | | eichorei enwithoudende gewassen | 74 | | sierplanten | sierplanten | 103 | | | hoog groen |
| 17 | | naaldbos ander | | 46 | | | | 75 | | sierteelt | sierteelt | 104 | | | laag groen |
| 18 | | Ander naaldhout | | 47 | | | fruit en noten | 76 | | korte omloophout | korte omloophout | 105 | | | overig |
| 19 | | Ander naaldhout + loofhout | | 48 | | | graan | 77 | | | Korrelmaïs | 106 | | | chamignons (loods) |
| 20 | | Douglas | | 49 | | | hop | 78 | | | silomais | 107 | | | landbouwgebouwen |
| 21 | | Douglas + loofhout | | 50 | | | houtachtige gewassen | 79 | moeras | loofbos alluviaal (vallei- en moerasbos) | loofbos alluviaal (vallei- en moerasbos) | 108 | | Commerciële/diensen/lichte industrie | bebouwd |
| 22 | | Fijnspar | | 51 | | | Roelzaad ophoudende zaden | 80 | | moeras | moeras | 109 | | | hoog groen |
| 23 | | Fijnspar + loofhout | | 52 | | | oiltantegras, mariadistel | 81 | | rietland | rietland | 110 | | | laag groen |
| 24 | | Lork | | 53 | | | overige gewassen | 82 | stikke en schorre | slikke en schorre | slikke en schorre | 111 | | | overig |
| 25 | | Lork + loofhout | | 54 | | | | 83 | | schorre | schorre | 112 | | zeehaven | bebouwd |
| 26 | | naaldbos ander | | 55 | | | raapzaad | 84 | | slik | slik | 113 | | | hoog groen |
| 27 | | Zwarte den | | 56 | | | suikerbieten | 85 | urbaan | horeca | bebouwd | 114 | | | laag groen |
| 28 | | Zwarte den + loofhout | | 57 | | | tabak | 86 | | | hoog groen | 115 | | | overig |
| | | | | | | | | | | | | 116 | water | water | water |

Bron: VITO

Er zou dus een keuze moeten gemaakt worden uit de 4 voorgestelde kaarten:

- AGIV bodembedekking: toestand 2001, resolutie 15 m;
- AGIV bodemgebruik: toestand 2001, resolutie 15 m;
- CORINE Landcover: toestand 2006, resolutie 100 m;
- NARA/VITO landgebruik: toestand 2005-2010, resolutie 10 m.

Naar tijdsaspect is de NARA/VITO kaart de meest recente en ze heeft ook de hoogste resolutie. Deze kaart kan op 3 detailniveaus gebruikt worden: niveau 3 heeft 117 landgebruiksklassen, niveau 2 heeft 37 klassen (waarvan een 24-tal vegetatieklassen), niveau 1 heeft slechts 10 klassen, waarvan 8 vegetatieklassen zijn. Dit biedt heel wat flexibiliteit naar de manier van POD berekening toe: Indien de POD berekening zal gebaseerd worden op eerder generieke vegetatietypes (landbouwgewassen, loofbossen, naaldbossen, grasland), dan kan niveau 1 van deze kaart gebruikt worden. Het gebruik van niveau 3 van deze kaart is daarentegen zinvol indien we zouden beslissen de POD berekening voor heel specifieke vegetatietypes uit te voeren, bijvoorbeeld voor aardappelen en granen. Voor deze twee types van planten werd al veel onderzoek verricht naar de specifieke dosis-respons functies voor de blootstelling aan ozon (zie o.a. de Mapping Manual voor details). Zo kan er bijvoorbeeld berekend worden welk opbrengstverlies er bij een bepaalde POD_{γ} waarde veroorzaakt wordt. Dergelijk gedetailleerde informatie m.b.t. opbrengstverlies is voor andere vegetatietypes in vele gevallen niet beschikbaar.

Naar productiewijze is de NARA/VITO kaart samengesteld uit verschillende kaarten: biologische waardering, landbouwgebruikspcelen, kadasterkaart, en specifieke sectorale kaarten (havens, luchthavens, bedrijfsgebouwen). Deze kaart representeert dus de meest realistische weergave van het landgebruik in de tijd en in plaats. Een bijkomend voordeel is dat de NARA/VITO landgebruikskkaart de best gedocumenteerde kaart is en dat maakt dat de vereenvoudiging naar bv. 4 vegetatieklassen daar het meest haalbaar zal zijn. Recent is men ook in het VLOPS luchtkwaliteitsmodel overgestapt naar de NARA/VITO landgebruikskkaart.

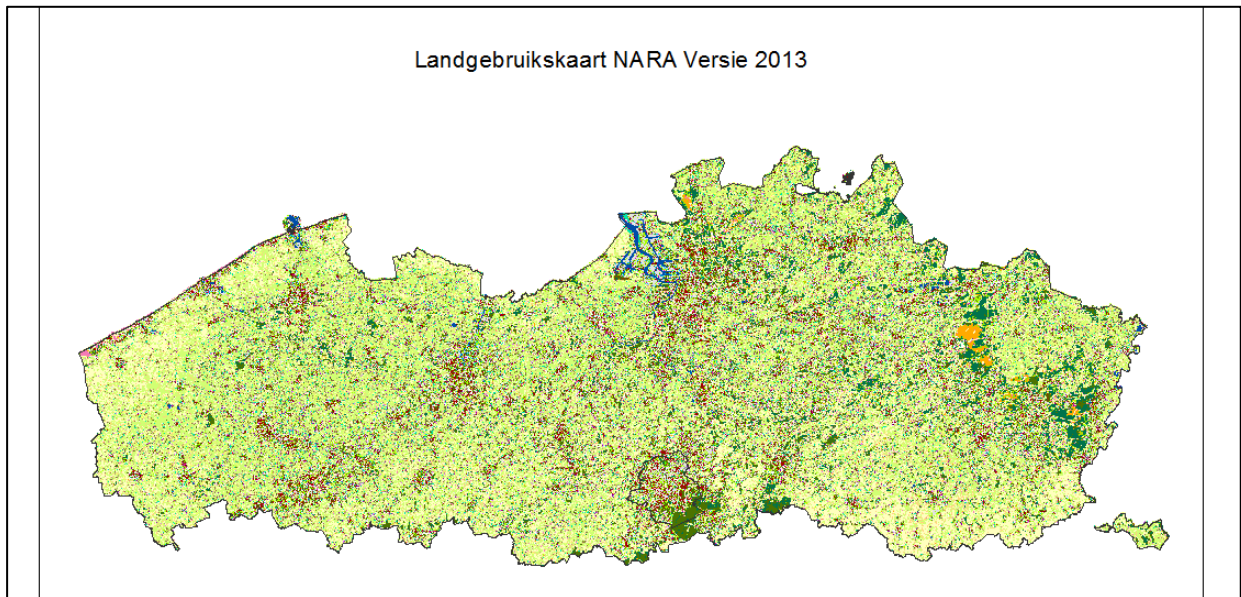
De AGIV kaarten daarentegen zijn gemaakt van satellietbeelden, waardoor een verkeerde interpretatie van bepaalde pixels niet uitgesloten kan worden. De totaal arealen van een bepaalde vegetatie sluiten ook in de AGIV kaarten niet aan met de totaal arealen in de biologische waarderingkkaart, de landbouwgebruikspcelenkkaart, de kadasterkaart... Bovendien is het kaartmateriaal afkomstig van 2001 en dus niet meer van recente aard.

De CORINE Land Cover kaart 2006 maakt gebruik van recentere gegevens dan de AGIV kaarten, de ruimtelijke resolutie is met 100 m echter slechter. De gehanteerde landgebruiksklassen zijn voor een goede beschrijving van de aanwezige vegetatieklassen niet zeer goed geschikt, bv. voor de landbouwgronden. Het is niet eenduidig te zeggen welke vorm van landbouwgrond aanwezig is.

Samengevat kunnen we stellen dat de NARA/VITO kaart de eerste keuze vormt, vooral omdat ze de meest recente informatie bevat, beter gedocumenteerd is, beter aansluit met bestaande statische categorieën en oplosbaar is tot 10 landgebruiksklassen zodat de kaart ook beheersbaar is, zonder verlies aan ruimtelijke resolutie.

Figuur 8 toont de landgebruikskkaart NARA 2013.

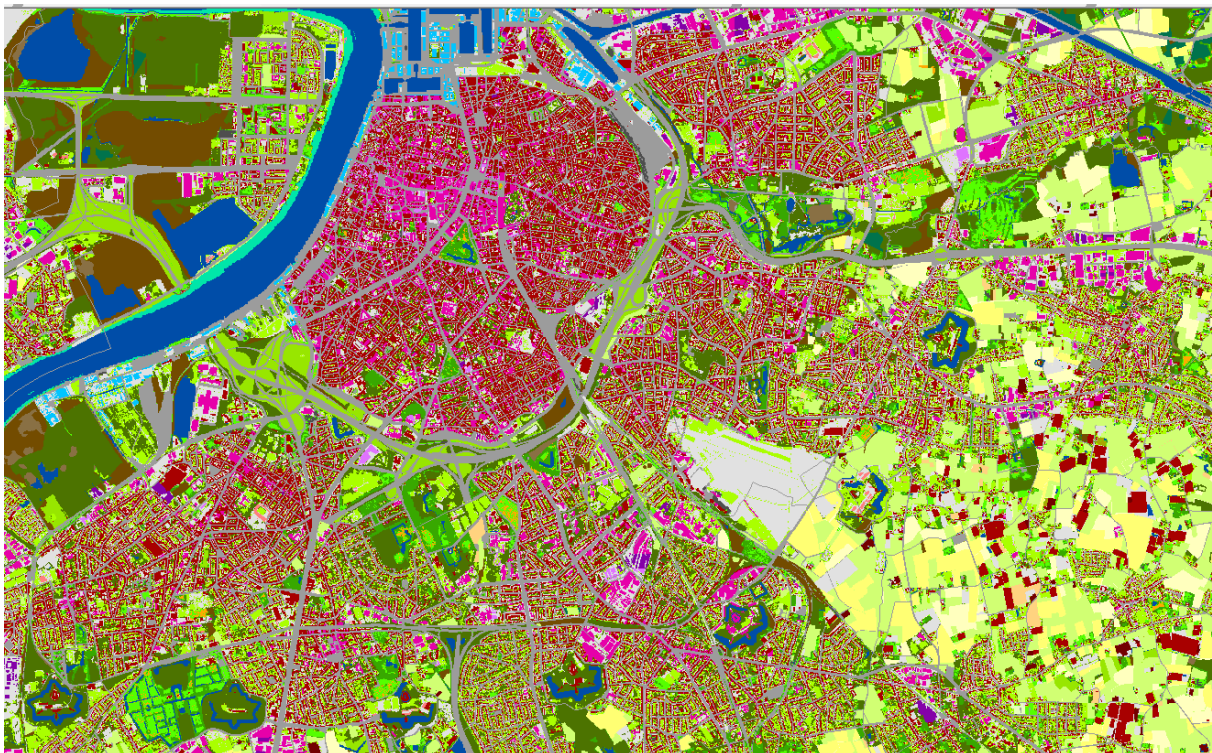
Figuur 8: Landgebruikskaat NARA 2013 (Vlaanderen, 2013)



Bron: VITO

Figuur 9 toont een zoom op een bepaald deel van deze kaart (Antwerpen en zuidoostelijke agglomeratie), hetgeen de maat aan detail van deze kaart duidelijk maakt. Zelfs de vegetatie in en rond de woongebieden is weergegeven op de NARA 2013 kaart.

Figuur 9: Zoom op de Landgebruikskaat NARA 2013 (Antwerpen en zuidoostelijke agglomeratie)



Bron: VITO

3.3.2 De fenologiefactor f_{phen}

De fenologiefactor f_{phen} is afhankelijk van het type gewas en kan berekend worden op basis van de dag van het jaar alsook het begin en het eind van het groeiseizoen van het gewas in kwestie. De tabellen S16 en S17 uit het "supplementary material" alsook tabel 3 uit het hoofdartikel (Simpson et al., 2012) bevatten de nodige gewasspecifieke informatie om de berekeningen uit te voeren. Deze zijn weergegeven in de volgende tabellen. Tabel 5 toont de landgebruik-specifieke parameters voor de berekening van de stomataire weerstand via het DO₃SE-model. Tabel 6 toont de formules voor de berekening van de fenologiefactor o.a. in functie van de dag van het jaar en het groeiseizoen.

Tabel 7 tenslotte toont het begin en het eind (in dagen) van het groeiseizoen voor de vijftigste breedtegraad Noord alsook de parameters voor de omrekening naar een andere breedtegraad.

Tabel 5: Landgebruik-specifieke parameters voor de berekening van de stomataire weerstand

| Code | g_{max}^m | f_{min} | f_{phen} factors | | | | | | | | f_{light} | f_T | | | f_D | | $\Sigma D_{Crit.}$ |
|--------|-------------|-----------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|-------------|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|
| | | | ϕ_a | ϕ_b | ϕ_c | ϕ_d | ϕ_e | ϕ_f | ϕ_{AS} | ϕ_{AE} | | α | T_{min} | T_{opt} | T_{max} | D_{max} | |
| | † | | | | | days | days | days | days | | °C | °C | °C | kPa | kPa | kPa | |
| CF | 140 | 0.1 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0.006 | 0 | 18 | 36 | 0.5 | 3 | |
| DF | 150 | 0.1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 20 | 30 | 0 | 0 | 0.006 | 0 | 20 | 35 | 1 | 3.25 | |
| NF | 200 | 0.1 | 1 | 1 | 0.2 | 1 | 130 | 60 | 80 | 35 | 0.013 | 8 | 25 | 38 | 1 | 3.2 | |
| BF | 200 | 0.02 | 1 | 1 | 0.3 | 1 | 130 | 60 | 80 | 35 | 0.009 | 1 | 23 | 39 | 2.2 | 4 | |
| TC | 300 | 0.01 | 0.1 | 0.1 | 1 | 0.1 | 0 | 45 | 0 | 0 | 0.0105 | 12 | 26 | 40 | 1.2 | 3.2 | 8 |
| MC | 300 | 0.019 | 0.1 | 0.1 | 1 | 0.1 | 0 | 45 | 0 | 0 | 0.0048 | 0 | 25 | 51 | 1 | 2.5 | |
| RC | 360 | 0.02 | 0.2 | 0.2 | 1 | 0.2 | 20 | 45 | 0 | 0 | 0.0023 | 8 | 24 | 50 | 0.31 | 2.7 | 10 |
| SNL | 60 | 0.01 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0.009 | 1 | 18 | 36 | 1.3 | 3 | |
| GR | 270 | 0.01 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.009 | 12 | 26 | 40 | 1.3 | 3 | |
| MS | 200 | 0.01 | 1 | 1 | 0.2 | 1 | 130 | 60 | 80 | 35 | 0.012 | 4 | 20 | 37 | 1.3 | 3.2 | |
| IAM_CR | 500 | 0.01 | 0.1 | 0.1 | 1 | 0.1 | 0 | 45 | 0 | 0 | 0.0105 | 12 | 26 | 40 | 1.2 | 3.2 | 8 |
| IAM_DF | 150 | 0.1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 15 | 20 | 0 | 0 | 0.006 | 0 | 21 | 35 | 1 | 3.25 | |
| IAM_MF | 175 | 0.02 | 1 | 1 | 0.3 | 1 | 130 | 60 | 80 | 35 | 0.009 | 2 | 23 | 38 | 2.2 | 4 | |

Notes: † Units of g_{max}^m are mmole O₃ m⁻² (PLA) s⁻¹

Bron: Simpson et al. (2012)

Tabel 6: Definitie van de fenologiefactor f_{phen} als functie van de dag van het jaar d_n , begin en eind van het groeiseizoen (d_{SGS} en d_{EGS}) en andere parameters zoals aangegeven in Tabel 5 (Simpson et al., 2012, Tabel S17)

| Time of year | f_{phen} |
|--|--|
| $d_n \leq d_{SGS}$ or $d_n > d_{EGS}$ | 0 |
| $d_{SGS} < d_n \leq A_{start}$ | ϕ_a |
| $A_{start} < d_n \leq A_{start} + \phi_e$ | $\phi_b + (\phi_c - \phi_b)(d_n - A_{start})/\phi_e$ |
| $A_{start} + \phi_e < d_n \leq A_{end} - \phi_f$ | ϕ_c |
| $A_{end} - \phi_f < d_n \leq A_{end}$ | $\phi_d + (\phi_c - \phi_d)(A_{end} - d_n)/\phi_f$ |
| $A_{end} < d_n \leq d_{EGS}$ | ϕ_d |

Notes: A_{start} calculated from $d_{SGS} + \phi_{AS}$, A_{end} from $d_{EGS} - \phi_{AE}$, c.f. Table S16.

Bron: Simpson et al. (2012)

Tabel 7: Bijkomende informatie voor de berekening van de fenologiefactor f_{phen} : start en einde van het groeiseizoen, aangegeven voor een locatie gelegen op 50 °N (Simpson et al., 2012; Tabel 3)

| code Λ_c | Landcover | h m | Growing season | | LAI parameters | | | |
|---------------------|----------------|-----------------|----------------|--------------|--|--|---------------|---------------|
| | | | SGS50 day | EGS50 day | LAI _{min} m ² m ⁻² | LAI _{max} m ² m ⁻² | L_S days | L_E days |
| CF | T/B conif | 20 ² | 0 | 366 | 5 | 5 | 1 | 1 |
| DF | T/B decid | 20 ² | 100 (1.5) | 307 (-2.00) | 0 | 4 | 20 | 30 |
| NF | Med. needle | 8 | 0 | 366 | 4 | 4 | 1 | 1 |
| BF | Med. broadleaf | 15 | 0 | 366 | 4 | 4 | 1 | 1 |
| TC | T/B crop | 1 | 123 (2.57) | 213 (2.57) | 0 | 3.5 | 70 | 20 |
| MC | Med. crop | 2 | 123 (2.57) | 237 (2.57) | 0 | 3 | 70 | 44 |
| RC | Root crop | 1 | 130 | 250 | 0 | 4.2 | 35 | 65 |
| SNL | Moorland | 0.5 | 0 | 366 | 2 | 3 | 192 | 96 |
| GR | Grass | 0.3 | 0 | 366 | 2 | 3.5 | 140 | 135 |
| MS | Med. scrub | 2 | 0 | 366 | 2.5 | 2.5 | 1 | 1 |
| WE | Wetlands | 0.5 | 0 | 366 | na | na | na | na |
| TU | Tundra | 0.5 | 0 | 366 | na | na | na | na |
| DE | Desert | 0 | 0 | 366 | na | na | na | na |
| W | Water | 0 | 0 | 366 | na | na | na | na |
| ICE | Ice | 0 | 0 | 366 | na | na | na | na |
| U | Urban | 10 | 0 | 366 | na | na | na | na |
| IAM.CR ³ | Generic crop | 1 | 123 (2.57) | 213 (2.57) | 3.5 | 3.5 | 0 | 0 |
| IAM.DF ³ | Generic DF | 20 | 105 (1.5) | 297 (-2) | 0 | 4 | 15 | 30 |
| IAM.MF ³ | Generic MF | 8 | 0 | 366 | 5 | 5 | 1 | 1 |

T/B: temperate/boreal (gematigd/noord-Europees klimaat); conif: coniferous (naaldgewassen); decid: deciduous (loofgewassen)

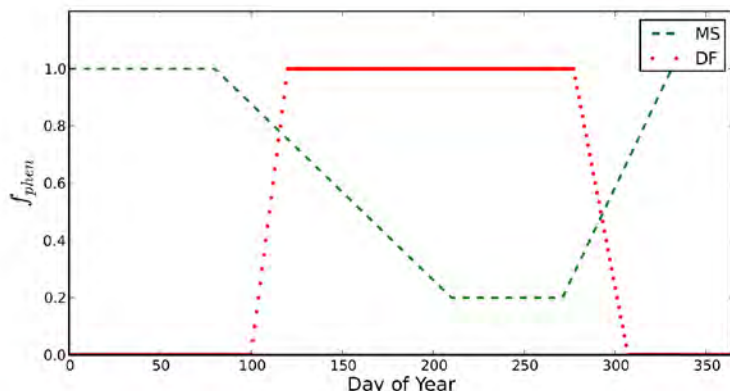
Bron: Simpson et al. (2012)

De omrekening van het begin en einde van het groeiseizoen van de vijftigste breedtegraad Noord naar een andere breedtegraad is mogelijk met behulp van de aangegeven rekenregels (de getallen tussen haakjes). Met elke breedtegraad richting noord start bijvoorbeeld het groeiseizoen van loofbossen (IAM_DF) 1,5 dagen later t.o.v. de 105^e dag van het jaar en stopt 2 dagen vroeger t.o.v. de 297^e dag van het jaar. Voor de landbouwgewassen (IAM_CR) begint en eindigt het groeiseizoen met elke breedtegraad richting noord gemiddeld 2,57 dagen later.

Voor het bepalen van de groeiseizoenen kunnen we ervan uitgaan dat Vlaanderen gelegen is op de 51^e breedtegraad. Deze loopt bijvoorbeeld net ten zuiden van Mechelen, ter hoogte van de afrit 'Mechelen Zuid' van de E19. Het gemiddelde groeiseizoen voor landbouwgewassen in Vlaanderen loopt dus van dag 125,57 (dus dag 126) t.e.m. dag 215,57 (dus dag 216). De groeiperiode in Vlaanderen voor een generiek landbouwgewas zou dus in alle jaren die geen schrikkeljaar zijn gaan van 6 mei t.e.m. 4 augustus. Dit sluit nauw aan bij de definitie van het groeiseizoen dat beschouwd wordt bij de berekening van de AOT40 vegetatie, nl. mei-juli.

Figuur 10 toont ter illustratie het verloop van de fenologiefactor voor twee verschillende vegetatietypes, namelijk voor de klasse DF (gematigde/noordelijke loofbos) en MS (struikgewassen in het Middellandse Zeegebied). Voor wat de fenologie betreft, is er voor de loofbossen tijdens de zomermaanden geen vermindering van de maximale stomataire conductiviteit. In de winter, wanneer de loofbomen geen bladeren hebben, neemt de fenologiefactor echter de waarde nul aan. In het Middellandse Zeegebied is het net andersom: In de winter treedt bij de altijd groene vegetatie geen vermindering op van de maximale stomataire conductiviteit, terwijl deze vormen van vegetatie in de zomer een deel van hun bladeren kunnen verliezen, hetgeen te maken heeft met warmte en droogte in deze tijd van het jaar.

Figuur 10: Illustratie van de fenologiefactor f_{phen} voor twee verschillende landgebruiksklassen DF: loofbos in Centraal- en Noord-Europa; MS: struiken/bosjes in het Middellandse Zeegebied (Simpson et al., 2012, Figuur S3)



Bron: Simpson et al. (2012)

3.3.3 Beschikbaarheid van gegevens voor de ozonconcentratie (op gewashoogte), g_{max} en f_{phen}

Tabel 8 toont een overzicht van de mogelijke bronnen voor de invoerparameters voor de ozonconcentratie (al dan niet op gewashoogte), de maximale stomataire conductiviteit en voor de fenologiefactor, zoals besproken in de vorige hoofdstukken.

Tabel 8: Mogelijke bronnen voor de ozonconcentratie, voor de maximale stomataire conductiviteit en voor de fenologiefactor in Vlaanderen; bron 1 is momenteel de als meest geschikt beschouwde bron, bron 2 beschrijft een alternatieve bron in het geval van problemen met databeschikbaarheid

| Parameter | Bron 1 | Bron 2 |
|---|---|---|
| O ₃ concentratie, gebiedsdekkend voor Vlaanderen, op 3m hoogte | RIO interpolatie model (4x4 km ² voor Vlaanderen/België) | CTM's (Chimere, AURORA, BeEUROS) |
| O ₃ concentratie op gewashoogte, bv. voor landbouwgewassen (1m), grasland (0,1m) en bossen (20m) | Conversiefactoren, zie MM tabel 3.7 (blz. III-16): Landbouwgewassen: 0,93 Gras: 0,77 Bos: 1,04 | Berekening via depositiemodel van het CTM (R _a , R _b , R _c) |
| g_{max}^m maximale stomataire conductiviteit bij standard temperatuur en luchtdruk | Tabel S16 uit Simpson et al. (2012) | |
| g_{max} maximale stomataire conductiviteit | $g_{max} = g_{max}^m * R * T / P$ R=gasconstante, T=temp., p=luchtdruk | |
| f_{phen} fenologiefactor | Tabellen S16 en S17 (Simpson et al., 2012); begin en eind van het groeiseizoen | |
| Groeiseizoen van typische gewassen | Parameters uit Tabel S16 (Simpson et al., 2012), omgerekend naar 51° N | |
| Landgebruiksinformatie | AGIV bodembedekkingskaart | NARA kaart 2013; eventueel ook CORINE landgebruikskaat |

3.3.4 De lichtfactor f_{light}

De lichtfactor f_{light} is methodologisch gezien de meest complexe factor, omdat deze afhankelijk is van een aantal grootheden (zoals de fotosynthetisch actieve straling en de leaf area index), die op hun beurt redelijk ingewikkelde berekeningen vergen. Hieronder wordt stap per stap beschreven hoe men tot de lichtfactor komt.

De eerste stap is de berekening van de directe straling (I_{dir}^N), die sowieso in quasi elk CTM moet gebeuren om fotochemische reacties (cfr. vorming van ozon) te kunnen berekenen. In de meeste gevallen (o.a. in het EMEP model en in Chimere) wordt de directe straling niet als invoer uit het meteorologische model genomen, maar wordt in het CTM berekend op basis van de zonnestand (hoek boven de horizon, die op zijn beurt afhankelijk is van de locatie en het uur van het jaar). Deze straling bij wolkeloze hemel wordt vervolgens gecorrigeerd m.b.v. de wolkenbedekkingsgraad, die als invoer uit het ECMWF model gehaald wordt. Hierbij worden de wolken in alle verticale lagen van het model geaccumuleerd. Dit geeft ons de directe straling voor de actuele wolkenbedekkingsgraad.

In de tweede stap wordt de directe en indirecte straling op een horizontaal oppervlak berekend:

$$I_{dir} = I_{dir}^N * \cos \theta \quad \text{met } \theta = \text{zonnestand en}$$

$$I_{diff} = C * I_{dir} \quad \text{met } C \text{ een constante die in de meeste CTM's voorgeprogrammeerd is.}$$

In de derde stap wordt de fotosynthetisch actieve straling (PAR) berekend, gebruikmakend van de leaf area index (LAI). Om dit te kunnen doen moet de "canopy" (dus het bladerdak) opgedeeld worden in het deel dat door de zon bestraald wordt en het deel dat in de schaduw ligt. Voor de LAI berekenen we:

$$LAI_{sun} = \left[1 - \exp\left(-0.5 \frac{LAI}{\cos \theta}\right) \right] \frac{\cos \theta}{\cos \alpha}$$

$$LAI_{shade} = LAI - LAI_{sun}$$

en voor de PAR gebruiken we:

$$I_{PAR}^{shade} = I_{diff} \exp\left(-0.5 LAI^{0.7}\right) + 0.07 I_{dir} (1.1 - 0.1 LAI) \exp(-\cos \theta)$$

$$I_{PAR}^{sun} = I_{dir} \cos \alpha / \cos \theta + I_{PAR}^{shade}$$

met $\alpha = 60^\circ$.

Een mogelijk alternatief zou zijn om de PAR in te schatten op basis van de aanname $PAR = \frac{1}{2} * \text{'solar radiation'}$ uit ECMWF. (Met 'solar radiation' wordt in EMEP de intensiteit van de kortgolvlige straling bedoeld, 'thermal radiation' komt overeen met langgolvlige straling.) De kortgolvlige straling is als parameter in het ECMWF model aanwezig, maar wordt blijkbaar niet in Chimere gebruikt. Deze aanname is op zich vrij correct, maar zou wel betekenen dat er een bijkomende ECMWF parameter zou nodig zijn in het Chimere-model, hetgeen eventueel te omslachtig is. Zonder de Chimere-code (in detail) te kennen kan over de te volgen procedure geen definitieve uitspraak gedaan worden.

In de vierde stap berekenen we de lichtfactor f_{light} via de volgende vergelijkingen.

$$f_{sun} = 1 - e^{-\alpha J_{PAR}^{sun}}$$

$$f_{LAI}^{sun} = LAI_{sun} / LAI^R$$

$$f_{light} = f_{LAI}^{sun} f_{sun} + (1 - f_{LAI}^{sun}) f_{shade}$$

Kort samengevat moeten de volgende vier stappen doorlopen worden, waarvan een deel (tenminste stap 1) sowieso nu al aanwezig is in bv. het Chimere-model.

- 1) Bereken de directe normale straling o.b.v. de zonnestand en de wolkenbedekkingsgraad (cloud cover fraction uit ECMWF).
- 2) Deel de directe straling op in een direct en een diffuus deel.
- 3) Bereken PAR (I_{PAR}^{sun} , I_{PAR}^{shade}) i.f.v. de LAI (leaf area index), waarbij LAI wordt opgedeeld in het zon-bestraald deel van het bladerdak en het deel dat in de schaduw ligt (LAI_{sun} en LAI_{shade}).
- 4) Bereken f_{light} op basis van de in de derde stap berekende grootheden.

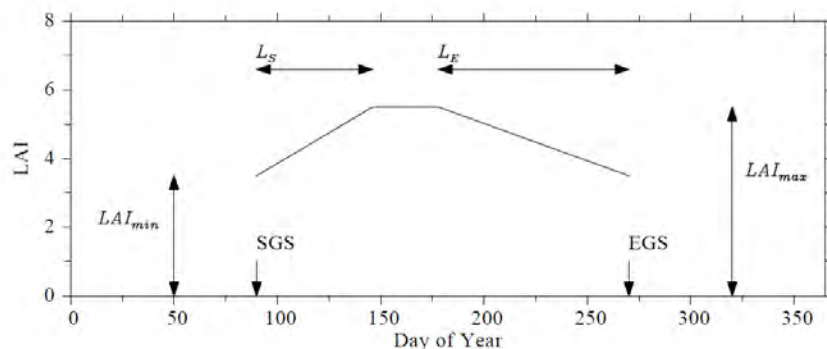
Er stelt zich alleen nog de vraag waar de informatie m.b.t. de LAI waardes vandaan komt. Hiervoor bestaan twee principiële mogelijke bronnen: Ofwel wordt de LAI ingeschat op basis van vegetatietype-specifieke, generieke parameters, zoals getoond in Tabel 7 (uit Simpson et al., 2012), hetgeen de manier is die in het EMEP model gebruikt wordt. Als alternatief kan de LAI ook ingeschat worden op basis van satellietbeelden. Bij VITO zijn bijvoorbeeld de beelden van de SPOT-VEGETATION satelliet (gratis) beschikbaar, waaruit de LAI kan afgeleid worden.

Het gebruik van de LAI op basis van satellietbeelden heeft een aantal voor- en nadelen. Een voordeel zou zijn dat de LAI voor een bepaald jaar afgeleid wordt uit effectieve satellietbeelden, waardoor met afwijkingen van de "echte" groeiperiodes t.o.v. de gemiddelde groeiseizoenen rekening kan worden gehouden. De nadelen van deze methode zijn enerzijds dat er ontbrekende gegevens in de beelden (omwille van wolken) moeten opgevuld worden op een zo correct mogelijke manier en dat uit de satellietbeelden maar één gemiddelde LAI waarde per gridcel verkregen wordt. Het is echter de vraag of deze gemiddelde LAI waarde voor de hier beoogde berekeningen rechtstreeks bruikbaar is. Immers kan bijvoorbeeld de helft van een gridcel volledig vrij zijn van vegetatie (bv. een industrie/havengebied) en de andere helft kan bedekt zijn met een bos (of een ander vegetatietype met een hoge LAI). Uit het satellietbeeld wordt er daarentegen een middelhoge LAI waarde voor de hele gridcel afgeleid, hetgeen ook zou overeen kunnen komen met landbouwgewassen die zich over de hele gridcel uitstrekken.

Het lijkt er dus op dat het gebruik van een LAI waarde afgeleid uit satellietbeelden eerder meer nadelen dan voordelen zou opleveren. We stellen dan ook voor om, zeker in een eerste fase, te werken met de LAI waardes uit Simpson et al. (2012). In een latere fase zou dit uiteraard kunnen herbekeken worden en alsnog gekozen kunnen worden voor het gebruik van satellietbeelden als bron voor de LAI.

Figuur 11 toont schematisch een typisch verloop van de LAI doorheen het groeiseizoen bij gebruik van dezelfde methode zoals in het EMEP model.

Figuur 11: Schematische weergave van de LAI ontwikkeling doorheen het groeiseizoen



SGS en EGS zijn start en eind van het groeiseizoen (in dagen)

L_S en L_E representeren de lengte van de periodes van de LAI toename en afname (in dagen)

LAI_{max} en LAI_{min} zijn de maximum en minimum LAI waarden die de LAI kan aannemen tijdens het groeiseizoen

Bron: Simpson et al. (2012), Figuur 4

Tabel 9 toont in detail de rekenregels voor de berekening van de LAI in functie van de dag van het jaar, de eerste en de laatste dag van het groeiseizoen en een aantal andere parameters zoals aangegeven in Tabel 7.

Tabel 9: Rekenregels voor de berekening van de LAI in functie van de dag van het jaar (d_n), start en eind van het groeiseizoen (d_{SGS} en d_{EGS}), L_S , L_E , LAI_{max} en LAI_{min} zoals aangegeven in Tabel 7

| Time of year | LAI |
|--|--|
| $d_n \leq d_{SGS}$ or $d_n \geq d_{EGS}$ | LAI_{min} |
| $d_{SGS} < d_n \leq d_{SGS} + L_S$ | $LAI_{min} + (LAI_{max} - LAI_{min})(d_n - d_{SGS})/L_S$ |
| $d_{SGS} + L_S < d_n \leq d_{EGS} - L_E$ | LAI_{max} |
| $d_{EGS} - L_E < d_n < d_{EGS}$ | $LAI_{min} + (LAI_{max} - LAI_{min})(d_{EGS} - d_n)/L_E$ |

Bron: Simpson et al. (2012), Tabel S15

Tabel 10 toont een overzicht van de beschikbaarheid van invoergegevens voor de berekening van de lichtfactor f_{light} .

Tabel 10: Beschikbaarheid van gegevens voor de berekening van de lichtfactor f_{light}

| Parameter | Bron 1 | Bron 2 |
|--|---|--|
| f_{light} factor voor PAR (photosynthetically active radiation) | I_{PAR} (I_{PAR}^{sun} en I_{PAR}^{shade}), LAI en Tabel S16 (analoog EMEP) | |
| Straling | analoog ECMWF-model: afleiden uit solar zenith angle (geogr. breedte, uur van het jaar) en cloud cover fraction | |
| PAR | analoog manier in EMEP-model | $PAR \approx \frac{1}{2} * \text{kortgolvlige straling (kortgolvlige straling uit ECMWF model)}$ |
| Total cloud cover fraction | ECMWF model | |
| LAI (projected) leaf area index en/of NDVI Normalized Different Vegetation Index | Tabel 3 uit Simpson et al. (2012) | Via satellietbeelden, bv. SPOT-VEGETATION 1km (beschikbaar bij o.a. VITO) |

3.3.5 De temperatuurfactor f_T

De temperatuurfactor f_T wordt berekend volgens deze vergelijkingen:

$$f_T = \frac{T_2 - T_{\min}}{T_{\text{opt}} - T_{\min}} \left(\frac{T_{\max} - T_2}{T_{\max} - T_{\text{opt}}} \right)^\beta$$

T_2 = temperatuur op 2 m hoogte (invoer uit het ECMWF model)

$$\beta = (T_{\max} - T_{\text{opt}}) / (T_{\text{opt}} - T_{\min})$$

De parameters T_{\min} , T_{opt} en T_{\max} kunnen per vegetatietype verkregen worden uit Tabel S16 in Simpson et al. (2012), zoals getoond in Tabel 11.

Tabel 11: De parameters T_{\min} , T_{opt} en T_{\max} voor de berekening van de temperatuurfactor f_T

| Code | f_T | | |
|--------|------------------|------------------------|------------------|
| | T_{\min} °C | T_{opt} °C | T_{\max} °C |
| CF | 0 | 18 | 36 |
| DF | 0 | 20 | 35 |
| NF | 8 | 25 | 38 |
| BF | 1 | 23 | 39 |
| TC | 12 | 26 | 40 |
| MC | 0 | 25 | 51 |
| RC | 8 | 24 | 50 |
| SNL | 1 | 18 | 36 |
| GR | 12 | 26 | 40 |
| MS | 4 | 20 | 37 |
| IAM_CR | 12 | 26 | 40 |
| IAM_DF | 0 | 21 | 35 |
| IAM_MF | 2 | 23 | 38 |

Bron: Simpson et al. (2012), Tabel S16

3.3.6 De waterdampdrukdeficit factor $f_{(VP)D}$

De waterdampdruk deficit factor (vapour pressure deficit factor) wordt soms als f_D en soms als f_{VPD} afgekort. De formule voor de berekening is

$$f_D = f_{\min} + (1 - f_{\min}) \frac{D_{\min} - D}{D_{\min} - D_{\max}}$$

met $f_{\min} \leq f_{(VP)D} \leq 1$.

De waarden voor f_{\min} , D_{\min} en D_{\max} worden gehaald uit tabellen in Simpson et al. (2012) en zijn weergegeven in Tabel 12. D_{\min} en D_{\max} stellen respectievelijk de minimale en maximale dampdruk voor.

Tabel 12: De parameters f_{min} , D_{min} en D_{max} voor de berekening van de waterdampdruk deficit factor $f_{(VP)D}$

| Code | f_{min} | f_D | | | $\Sigma D_{Crit.}$ kPa |
|--------|-----------|------------------|------------------|----|---------------------------|
| | | D_{max} kPa | D_{min} kPa | | |
| CF | 0.1 | 0.5 | 3 | | |
| DF | 0.1 | 1 | 3.25 | | |
| NF | 0.1 | 1 | 3.2 | | |
| BF | 0.02 | 2.2 | 4 | | |
| TC | 0.01 | 1.2 | 3.2 | 8 | |
| MC | 0.019 | 1 | 2.5 | | |
| RC | 0.02 | 0.31 | 2.7 | 10 | |
| SNL | 0.01 | 1.3 | 3 | | |
| GR | 0.01 | 1.3 | 3 | | |
| MS | 0.01 | 1.3 | 3.2 | | |
| IAM_CR | 0.01 | 1.2 | 3.2 | 8 | |
| IAM_DF | 0.1 | 1 | 3.25 | | |
| IAM_MF | 0.02 | 2.2 | 4 | | |

Bron: Simpson et al. (2012)

Tabel 13 toont een overzicht van de beschikbaarheid van de invoergegevens voor de berekening van de temperatuurfactor en de waterdamp deficit factor.

Tabel 13: Beschikbaarheid van invoergegevens voor de berekening van f_T en $f_{(VP)D}$

| Parameter | Bron 1 |
|---|---|
| f_T temperatuurfactor | temperatuur (ECMWF) + parameters T_{min} , T_{opt} en T_{max} o.b.v. Tabel S16 (Simpson et al., 2012) |
| Temperatuur op 2m hoogte | ECMWF model |
| f_{min} factor voor minimum stomataire conductiviteit | Tabel S16 (Simpson et al., 2012) |
| $f_{(VP)D}$ waterdamp deficit factor | waterdamp deficit en D_{min} en D_{max} o.b.v. Tabel S16 (Simpson et al., 2012) |
| waterdamp deficit | Berekening o.b.v. de relatieve luchtvochtigheid (uit het ECMWF model) |

3.3.7 De bodemvochtfactor f_{SW} (soil water factor)

Bodemvocht is een zeer moeilijk te modelleren parameter in grootschalige meteomodellen, omdat het beschikbare bodemvocht in hoge mate afhangt van de bodemtextuur en de diepte van de wortels van planten. Bodemvocht kan door verschillende grootheden uitgedrukt worden. Soms wordt bodemvocht uitgedrukt in volumetrische hoeveelheden (zoals gebruikt in Chimere: volumetrische bodemvocht) en soms als een bodemvocht index (soil water index).

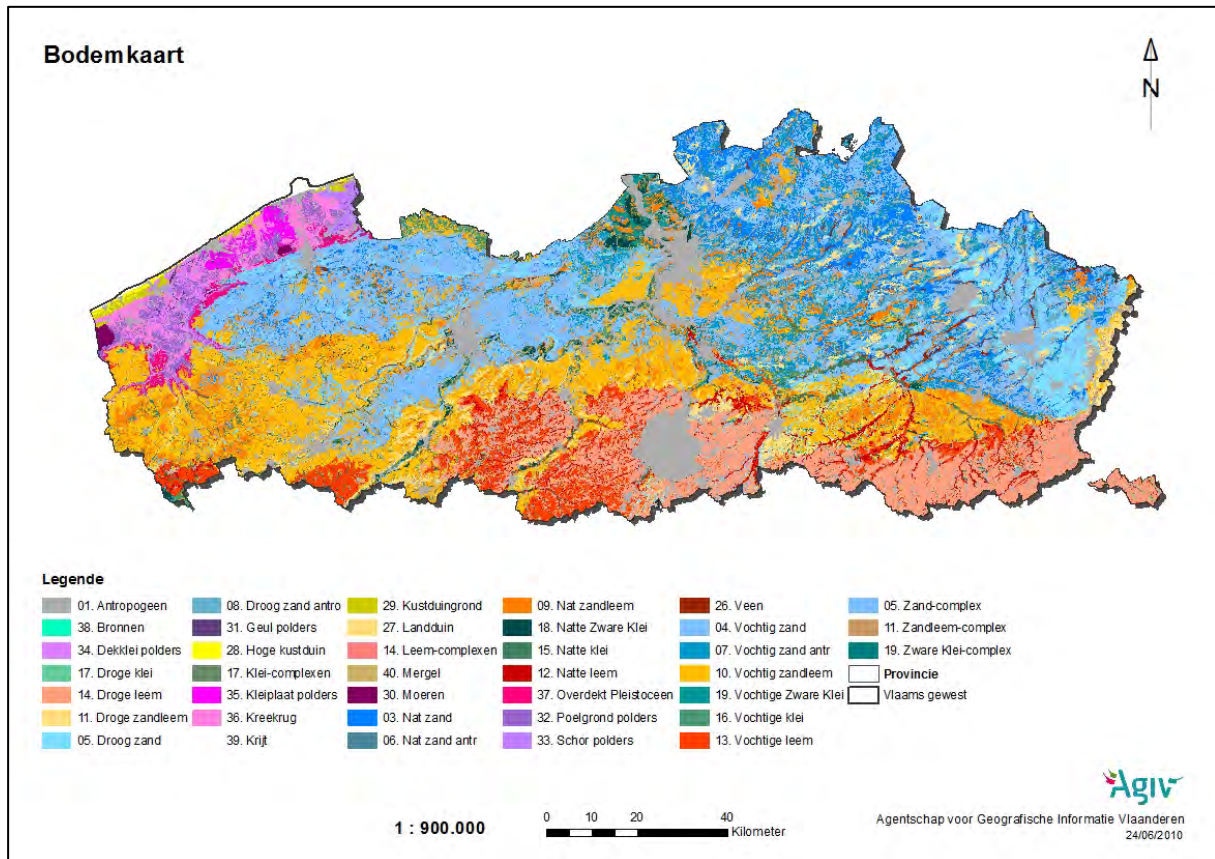
In het EMEP model wordt gerekend met een soil moisture index S_{MI} (zonder eenheid) als maat voor bodemvocht, waarvan de bodemvochtfactor op een zeer simpele manier afgeleid wordt:

$$f_{SW} = 1 \quad \text{indien } S_{MI} \geq 0,5$$

$$f_{SW} = 2 S_{MI} \quad \text{indien } S_{MI} < 0,5$$

De soil moisture index kan verkregen worden uit het ECMWF model. Het grootste nadeel hierbij is dat in het ECMWF model alleen met één gemiddeld bodemtype voor heel Europa gerekend wordt. Verschillen in bodemvocht door verschillende bodemtypes (bv. zand t.o.v. klei) kunnen dus niet in rekening gebracht worden. In principe is de informatie m.b.t. de in Vlaanderen voorkomende bodemtypes beschikbaar bij AGIV (Figuur 12), het is echter niet duidelijk hoe deze kan gebruikt worden in een regionaal meteomodel om hiermee betere bodemvocht waarden te bekomen.

Figuur 12: Bodemkaart Vlaanderen beschikbaar bij AGIV (Vlaanderen, 2001)

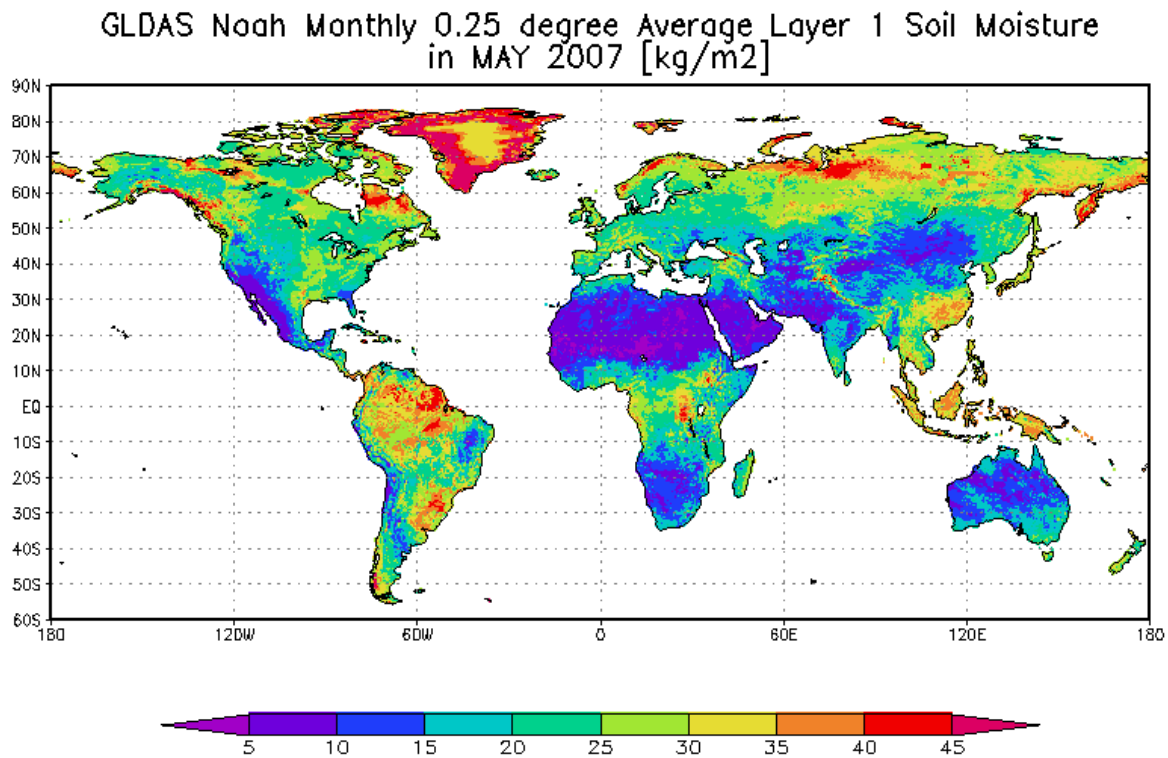


Bron: AGIV Geoloket (<http://geo-vlaanderen.agiv.be/geo-vlaanderen/bodemkaart/>)

Een alternatieve bron van invoergegevens voor het bodemvochtgehalte voor de gegevens afkomstig uit het ECMWF model is het GLDAS, het Global Land Data Assimilation System. Dit is een model van de Amerikaanse Ruimtevaartorganisatie NASA dat op globale schaal met 9 verschillende bodemtypes rekent. De resolutie van het model bedraagt 0,25°.

Figuur 13 toont de maandgemiddelde bodemvochtkaart (in kg/m²) van GLDAS voor mei 2007. Dit is dus een andere parameter dan de soil moisture index. Deze bron lijkt een zeer interessant alternatief te zijn voor de nogal zeer simplistische aanpak die momenteel gevolgd wordt in het EMEP model.

Figuur 13: Maandgemiddelde bodemvochtk kaart van GLDAS (Wereld, mei 2007)



Bron: NASA GLDAS (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/services/grads-gds/gldas>)

Als derde mogelijkheid kan ook de momenteel in Chimere aanwezige input (“volumetric soil water” [m³/m³]) gebruikt worden, vermits deze wordt omgerekend naar de in DO3DE gebruikte soil water index. In Albergel et al. (2011) wordt een methode beschreven om de “SMOS” (Soil Moisture Ocean Salinity), een maat voor de bodemvocht in de eenheid [m³/m³] om te rekenen naar een soil water index. De methode is vrij simpel: Men schaaft de waarden tussen 0 en 1 op basis van de maximum en minimum waarde (voor het volledige grid) gedurende één volledig jaar. Om dit te doen zou men eerst op zoek moeten gaan naar de minimum en maximum waarde van het volumetric soil water in Chimere (op het hele grid en het hele jaar) en kan dan alle waarden tijdens de berekening “on the fly” schalen naar een soil water index. Dit is hoogstwaarschijnlijk de meest eenvoudig te realiseren optie van deze drie mogelijkheden.

Tabel 14 toont een overzicht van de beschikbaarheid van invoergegevens voor de berekening van de bodemvochtfactor.

Tabel 14: Beschikbaarheid van invoergegevens voor de berekening van f_{SW}

| Parameter | Bron 1 | Bron 2 | Bron 3 |
|---------------------------|---|---|---|
| f_{SW} bodemvochtfactor | via S_{MI} (soil moisture index) uit het ECMWF model (index op twee hoogtes: Near surface layer (0,1 m) en root zone (1 m)) | GLDAS model van NASA, globaal op 0,25° resolutie; 3-uurlijkse waterbalans; houdt rekening met ‘lokale’ bodemtypes | Volumetric soil water, aanwezig in Chimere, omgerekend in een soil moisture index |

4 Plan van aanpak voor het bouwen van een model voor de berekening van de POD_Y voor Vlaanderen

Uitgaande van de toelichtingen in de vorige hoofdstukken m.b.t. de methodologie voor de berekening van de POD_Y en de beschikbare bronnen voor de noodzakelijke invoerparameters stellen we in dit hoofdstuk een plan van aanpak voor hoe, in grote lijnen, een model voor de berekening van de POD_Y voor Vlaanderen kan opgesteld worden.

Om de modelbouw zo efficiënt mogelijk uit te voeren trachten we hierbij zo veel mogelijk gebruik te maken van bestaande data(banken) en modellen. De 5 belangrijke pijlers voor de opbouw van een Vlaams "POD-model" zijn:

- Het **RIO-model** als bron van gebiedsdekkende ozonconcentraties in Vlaanderen op uurlijkse basis op een $4 \times 4 \text{ km}^2$ rooster;
- het **DO₃SE-model**, met als kern de berekening van de 5 potentieel limiterende factoren (f_{phen} , f_{light} , f_T , f_{VPD} en f_{SW}) voor de berekening van de stomataire conductiviteit;
- het **EMEP-model**, waarin de Fortran versie van DO₃SE geïmplementeerd is en waar we kunnen zien welke structuur het interface tussen een CTM en DO₃SE moet hebben;
- het **CHIMERE-model**, waarin we het DO₃SE-model willen implementeren om gebruik te kunnen maken van de aanwezige ECMWF meteorologische informatie alsook van afgeleide parameters zoals de directe straling etc. die sowieso in Chimere berekend worden;
- de publicatie van **Simpson et al. (2012)**, waarin de implementatie en het gebruik van DO₃SE in een regionaal CTM (het EMEP model) beschreven wordt.

We geven in de volgende hoofdstukken een korte beschrijving van deze 5 pijlers, voor zover dit nog niet opgenomen werd in de voorgaande hoofdstukken.

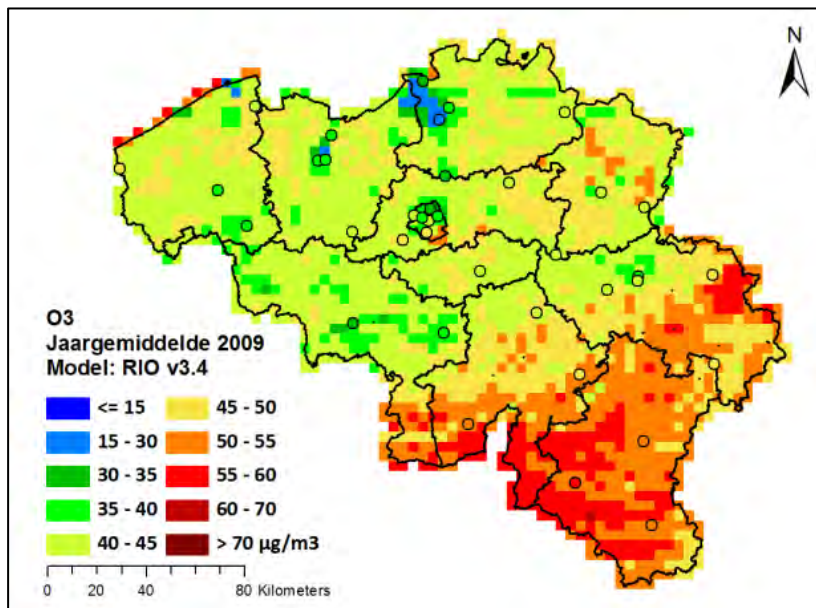
4.1 RIO

RIO is een ruimtelijke interpolatietechniek om gebiedsdekkende ozonconcentraties te berekenen op basis van de observaties in de Belgische telemetrische meetnetten. RIO berekent deze kaarten uur per uur, waarbij de interpolatie tussen de meetpunten op een intelligente manier uitgevoerd wordt, rekening houdend met de lokale karakter van de 'tussenliggende' gebieden. Verschillende validatieoefeningen, uitgevoerd bij zowel IRCEL alsook VITO, hebben aangetoond dat RIO voor historische jaren de beste grootschalige ozonconcentratiekaarten voor Vlaanderen oplevert (o.a. Maiheu et al., 2012).

Figuur 14 toont als voorbeeld de jaargemiddelde ozonconcentratiekaart voor België voor het jaar 2009, aangemaakt met RIO.

Om de ozonconcentraties uit RIO effectief te kunnen gebruiken in Chimere als basis van de POD berekeningen, moeten deze ingelezen worden in Chimere. De berekening van de scheikundige omzettingen kan in principe in Chimere afgezet worden (hetgeen het model aanzienlijk zou versnellen) of de berekende ozonconcentraties moeten uur per uur en gridcel per gridcel overschreven worden met de ozonconcentraties uit RIO. Hiervoor is een interpolatie nodig van de ozonconcentraties op het RIO-grid naar ozonconcentraties op het Chimere grid.

Figuur 14: Ozonconcentratiekaart aangemaakt met behulp van de RIO-interpolatiemethode (België, 2009)



Bron: IRCEL/VITO

4.2 DO₃SE en EMEP

Zoals al eerder toegelicht, bestaan er twee versies van het DO₃SE-model: een desktop versie met Windows interface, waarmee een berekening kan uitgevoerd worden voor één locatie, en een Fortran code voor de integratie in een chemisch transportmodel. Met deze laatste versie kunnen in principe gebiedsdekkende berekeningen uitgevoerd worden. Alleen deze Fortran versie van DO₃SE is dus in staat aan de voorwaarden van een gebiedsdekkend POD-model te voldoen.

Door de implementatie van de Fortran versie van DO₃SE in het EMEP model beschikken we over een voorbeeld van hoe DO₃SE moet aangestuurd worden vanuit een regionaal CTM, welke gegevens op welke plaats binnen de DO₃SE-code moeten beschikbaar zijn en welke architectuur gebruikt werd voor de koppeling tussen DO₃SE en EMEP. Gezien EMEP en Chimere m.b.t. de principiële structuur (3-D Euleriaanse modellen) en m.b.t. de meteorologische informatie (ECMWF) gelijkaardig zijn, is te verwachten dat een implementatie van DO₃SE in Chimere mogelijk is en dat er geen onoverkomelijke problemen hierbij zullen optreden.

VITO beschikt zowel over de volledige code van het EMEP model alsook over de Fortran code van DO₃SE. De code van Chimere staat ter beschikking bij IRCEL.

4.3 CHIMERE

Het CHIMERE model is een state-of-the-art luchtkwaliteitsmodel dat bij IRCEL geïnstalleerd is en gebruikt wordt voor assessment toepassingen maar ook voor de voorspelling van de luchtkwaliteit in België. Voor deze doeleinden maakt CHIMERE in grote omvang gebruik van meteorologische invoergegevens, afkomstig uit het ECMWF model.

De volgende lijst toont de ECMWF meteoparameters die momenteel gebruikt worden in Chimere:

- U [m/s] 'ECM zonal wind'
- V [m/s] 'ECM meridian wind'
- T [K] 'Temperature'
- Q [kg/kg] 'Specific humidity'
- CLWC [kg/kg] 'Cloud liquid water content'

- CIWC [kg/kg] 'Cloud ice water content'
- WINZ [m/s] 'Zonal wind'
- WINM [m/s] 'Meridian wind'
- PRES [Pa] 'Pressure'
- ALTI [m] 'Altitude of the middle of layer'
- 2T [K] '2 metre temperature'
- 2D [K] '2 metre dew point temperature'
- SP [Pa] 'Surface pressure'
- TCC [Fraction] 'Total cloud cover'
- LCC [Fraction] 'Low cloud cover'
- MCC [Fraction] 'Medium cloud cover'
- HCC [Fraction] 'High cloud cover'
- LSP [mm/hr] 'Large scale precipitation'
- CP [mm/hr] 'Convective precipitation'
- BLH [m] 'Boundary layer height'
- SSHF [J/m²; W/m²] 'Surface sensible heat flux'
- SLHF [J/m²; W/m²] 'Surface latent heat flux'
- LSM [Fraction] 'Land-Sea Mask'
- ORO 'Orography'
- STL1 [K] 'Soil temperature 0-7 cm'
- STL2 [K] 'Soil temperature 7-28 cm'
- STL3 [K] 'Soil temperature 28-100 cm'
- STL4 [K] 'Soil temperature 100-255 cm'
- SWVL1 [m³/m³] 'Volumetric soil water 0-7 cm'
- SWVL2 [m³/m³] 'Volumetric soil water 7-28 cm'
- SWVL3 [m³/m³] 'Volumetric soil water 28-100 cm'
- SWVL4 [m³/m³] 'Volumetric soil water 100-255 cm'
- RH2M [fraction] 'Relative Humidity at 2m'
- 10U [m/s] 'Zonal wind at 10 m'
- 10V [m/s] 'Meridian wind at 10 m'

Een screening van deze parameters toont aan dat alle relevante meteodata die in DO₃SE gebruikt wordt aanwezig is in Chimere, met name temperatuur, luchtvochtigheid, luchtdruk, wolkenbedekkingsgraad en bodemvocht. M.b.t. bodemvocht dient er wel nog nagegaan worden hoe de momenteel in Chimere aanwezige informatie (volumetrisch bodemwater) kan omgerekend worden naar de input voor DO₃SE, namelijk de soil water index. Voor bodemvocht bestaan er dus meerdere mogelijke alternatieven:

- De momenteel in Chimere gebruikte input (volumetric soil water [m³/m³]) wordt omgerekend naar de soil water index, volgens de methode van Albergel et al. (2011), zoals boven beschreven.
- De soil water index staat ook ter beschikking bij ECMWF en zou dus als een bijkomende meteoparameter kunnen opgenomen worden in Chimere. Indien de aanwezige "volumetric soil water" daadwerkelijk kan omgerekend worden naar een soil water index zou dit hoogstwaarschijnlijk de voorkeur krijgen. De opname van een nieuwe meteoparameter in Chimere vraagt waarschijnlijk redelijk wat aanpassingen.
- De bij GLDAS ter beschikking staande parameter "soil moisture" [kg/m²] zou waarschijnlijk volgens dezelfde methode van Albergel et al. (2011) kunnen omgerekend worden naar een soil moisture

index. Dit zou echter omslachtiger zijn gezien de GLDAS data enerzijds op een ander grid is en anderzijds momenteel niet aanwezig in Chimere.

De meest voor de hand liggende oplossingen zijn dus ofwel de omrekening van het volumetric soil water rechtstreeks in Chimere ofwel de opname van de soil water index als bijkomende ECMWF parameter in Chimere. Een overzicht van recent onderzoek bij ECMWF naar een verbeterde representatie van bodemvocht in het ECMWF model kan teruggevonden worden in Albergel et al. (2012).

Voor de koppeling van de ozonconcentraties uit RIO aan de in Chimere berekende stomatale ozonflux zou het ideaal zijn indien Chimere op hetzelfde (of een gelijkaardig) grid zou kunnen draaien als RIO. Blijkt dit maar moeilijk realiseerbaar zo kunnen de ozonconcentraties via interpolatietechnieken van het ene grid naar het andere grid omgerekend worden. Het is in ieder geval de bedoeling de ozonfluxen op een $4 \times 4 \text{ km}^2$ grid te berekenen.

5 Conclusies

De studie heeft aangetoond dat de berekening van een POD_Y gebiedsdekkend voor Vlaanderen mogelijk is. Alle nodige invoerparameters staan ofwel met voldoende nauwkeurigheid en resolutie ter beschikking voor Vlaanderen of kunnen afgeleid worden uit andere beschikbare parameters. Voor een aantal invoergegevens die moeilijk kunnen berekend worden kunnen er simpele parametrisaties toegepast worden.

Het DO_3SE -model is wetenschappelijk goed onderbouwd en algemeen aanvaard bij experts. Door de implementatie in het EMEP CTM bestaat er een voorbeeld van hoe gebiedsdekkende berekeningen kunnen uitgevoerd worden, hetgeen ons ter oriëntatie kan dienen.

De meest 'simpele' aanpak lijkt te zijn om de DO_3SE -algoritmen zoals gebruikt in het EMEP model te implementeren in één van de in Vlaanderen gebruikte luchtkwaliteitsmodellen (Chimere, AURORA, BelEUROS), om maximaal gebruik te kunnen maken van de in de CTM's aanwezige infrastructuur m.b.t. meteorologische gegevens en landgebruiksdata. Gezien Chimere operationeel is bij IRCEL en een state-of-the-art model is, lijkt dit de beste keuze te zijn.

De methodologie staat dus op punt, het zal echter nog een bijkomende inspanning vragen om de integratie van DO_3SE in Chimere en de koppeling aan RIO uit te voeren. Gezien de enorme meerwaarde van een inschatting van de schade door ozon aan planten op basis van de POD t.o.v. een inschatting gebaseerd op de AOT40 lijkt ons de nog nodige inspanning een gerechtvaardigde investering te zijn.

6 Referenties

- Albergel, C., Gruhier, C., de Rosnay, P., Hasenauer, S., Zeiner, B. (2011) Comparison between H-SAF large scale surface soil moisture, H-SAF assimilation soil moisture and SMOS level 2 soil moisture, H-SAF Associated Scientist Program, Mid-Term Report, September 2011, H-SAF.
- Albergel, C., de Rosnay, P., Balsamo, G., Isaksen, L., Munoz-Sabater, J. (2012) Soil Moisture Analyses at ECMWF: Evaluation using global ground-based in situ observations. *J. Hydrometeor* **13**, 1442-1460.
- 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. *Atmospheric Environment* **38**, 2213-2214.
- Barnes, J., Zheng, Y., Lyons, T. (2002) Plant resistance to ozone: the role of ascorbate. In: K. Omasa, H. Saji, S. Youssefian, N. Kondo, Eds.), *Air Pollution and Plant Biotechnology - Prospects for Phytomonitoring and Phytoremediation*. Springer-Verlag, Tokyo, 2002, pp. 235-252.
- Büker, P., Morrissey, T., Briolat, A., Falk, R., Simpson, D., Tuovinen, J.-P., Alonso, R., Barth, S., Baumgarten, M., Grulke, N., Karlsson, P. E., King, J., Lagergren, F., Matyssek, R., Nunn, A., Ogaya, R., Penuelas, J., Rhea, L., Schaub, M., Uddling, J., Werner, W., Emberson, L. D. (2012) DO3SE modelling of soil moisture to determine ozone flux to forest trees. *Atmospheric Chemistry and Physics* **12**, 5537-5562.
- Calvo, E., Martin, C., Sanz, M. (2007) Ozone Sensitivity Differences in Five Tomato Cultivars: Visible Injury and Effects on Biomass and Fruits. *Water, Air, & Soil Pollution* **186**, 167-181.
- Danielsson, H. H., Karlsson, G. P. G. P., Karlsson, P. E. P. E., Pleijel, H. H. K. (2003) Ozone uptake modelling and flux-response relationships--an assessment of ozone-induced yield loss in spring wheat. *Atmospheric Environment* **37**, 475-485.
- Emberson, L. D., Ashmore, M. R., Cambridge, H. M., Simpson, D., Tuovinen, J.-P. (2000) Modelling stomatal ozone flux across Europe. *Environmental Pollution* **109**, 403-413.
- Fuhrer, J. (1994) The critical level for ozone to protect agricultural crops – An assessment of data from European open-top chamber experiments. In: Fuhrer, J & Achermann, B (Eds) Op. cit., 42-57.
- Fuhrer, J. (2000) Introduction to the special issue on ozone risk analysis for vegetation in Europe. *Environmental Pollution* **109**, 359-360.
- Fuhrer, J., Achermann, B. (Eds) (1999) Critical Levels for Ozone – Level II. Environmental Documentation 115, Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, Bern, Switzerland.
- Gerosa, G., Marzuoli, R., Finco, A., Ebone, A., Tagliaferro, F. (2008) Ozone effects on fruit productivity and photosynthetic response of two tomato cultivars in relation to stomatal fluxes. *Italian Journal of Agronomy* **3**, 61–70.
- Harmens, H., Mills, G., Hayes, F., Norris D. and the participants of the ICP Vegetation (2010) New/revised flux-based critical levels of ozone. In: *Air Pollution and Vegetation ICP Vegetation. Annual Report 2009/2010*, Tervuren, Belgium, 16-24.
- Janssen, S.; Dumont, G.; Fierens, F.; Mensink, C. (2008) Spatial interpolation of air pollution measurements using CORINE land cover data. *Atmospheric Environment* **42**, 4884–4903.
- Janssen, S.; Dumont, G.; Fierens, F.; Deutsch, F.; Maiheu, B.; Celis, D.; Trimpeneers, E.; Mensink, C. (2012) Land use to characterize spatial representativeness of air quality monitoring stations and its relevance for model validation. *Atmospheric Environment* **59**, 492–500.
- Karlsson, G. P., Karlsson, P. E., Danielsson, H., Pleijel, H. (2003a) Clover as a tool for bioindication of phytotoxic ozone--5 years of experience from southern Sweden--consequences for the short-term critical levels. *Sci Total Environ.* **301**, 205-13.
- Karlsson, G. P., Karlsson, P. E., Soja, G., Vandermeiren, K., Pleijel, H. (2004) Test of the short-term critical levels for acute ozone injury on plants--improvements by ozone uptake modelling and the use of an effect threshold. *Atmospheric Environment* **38**, 2237-2245.
- Karlsson, P.E., Selldén, G. & Pleijel, H. (Eds) (2003b) Establishing Ozone Critical Levels II. UNECE Workshop Report. IVL report B 1523. IVL Swedish Environmental Research Institute, Gothenburg, Sweden. <http://www.ivl.se>.
- Kärenlampi, L., Skarby, L. (1996) Critical levels for ozone in Europe: Testing and finalizing the concepts. UN-ECE Workshop Report. University of Kuopio, Kuopio, Finland, pp 363.
- Maiheu, B., Veldeman, N., Viaene, P., De Ridder, K., Lauwaet, D., Deutsch, F., Janssen, S. (2012) Bepaling van de best beschikbare grootschalige concentratiekaarten luchtkwaliteit voor België, MIRA-rapport MIRA/2013/01.

- Mills, G., Pleijel, H., Büker, P., Braun, S., Emberson, L., Harmens, H., Hayes, F., Simpson, D., Grünhage, L., Karlsson, P.-E., Danielsson, H., Bermejo, V., Gonzalez Fernandez, I. (2011) Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. Chapter 3: Mapping Critical Levels for Vegetation. UNECE, pp. 114.
- Piikki, K., De Temmerman, L., Ojanpera, K., Danielsson, H., Pleijel, H. (2008) The grain quality of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in relation to elevated ozone uptake and carbon dioxide exposure. *Europ. J. Agronomy* **28**, 245-254.
- Pleijel, H., Danielsson, H., Emberson, L., Ashmore, M. R., Mills, G. (2007) Ozone risk assessment for agricultural crops in Europe: Further development of stomatal flux and flux–response relationships for European wheat and potato. *Atmospheric Environment* **41**, 3022-3040.
- Pleijel, H., Danielsson, H., Vandermeiren, C., Blum, J., Colls, K., Ojanperä (2002) Stomatal conductance and ozone exposure in relation to potato tuber yield-results from the European CHIP programme. *Europ. J. Agronomy* **17**, 303-317.
- Plöchl, M., Lyons, T., Ollerenshaw, J., Barnes, J. (2000) Simulating ozone detoxification in the leaf apoplast through the direct reaction with ascorbate. *Planta* **210**, 454-467.
- Simpson, D., Benedictow, A., Berge, H., Bergström, R., Emberson, L. D., Fagerli, H., Flechard, C. R., Hayman, G. D., Gauss, M., Jonson, J. E., Jenkin, M. E., Nyiri, A., Richter, C., Seleena, V. S., Tsyro, S., Tuovinen, J.-P., Valdebenito, A., Wind, P. (2012) The EMEP MSC-W chemical transport model – technical description, *Atmospheric Chemistry and Physics* **12**, 7825-7865 + supplementary material.
- UNECE (2010) Flux-based assessment of ozone effects for air pollution policy (technical report from the ozone workshop in Ispra, 9 – 12 November, 2009). ECE/EB.AIR/WG.1/2010/13.
- Vandermeiren, K., Black, C., Pleijel, H., De Temmerman, L. (2005) Impact of rising tropospheric ozone on potato: effects on photosynthesis, growth, productivity and yield quality. *Plant, Cell and Environment* **28**, 982-996.
- Vandermeiren, K., De Bock, M., Horemans, N., Guisez, Y., Ceulemans, R., De Temmerman, L. (2012) Ozone effects on yield quality of spring oilseed rape and broccoli. *Atmospheric Environment* **47**, 76-83.
- Wieser, G., & Tausz, M. (Eds), (2006) Proceedings of the workshop: Critical levels of ozone: further applying and developing the flux-based concept, Obergurgl, November, 2005.

7 Begrippen

| | |
|---------------------|---|
| AOT40 | overschot boven $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (40 ppb) van alle uurwaarden van de ozonconcentraties tussen 8 en 20 uur (Midden-Europese tijd) opgeteld gedurende het groeiseizoen |
| Ozonflux | De hoeveelheid ozon die per eenheid van oppervlakte en tijd afgezet wordt. |
| POD _Y | De fytotoxische ozon dosis is de geaccumuleerde stomataire ozonflux [$\text{mmol O}_3 \text{ m}^{-2}$ Plant Leaf Area (PLA)] per m^2 bladoppervlak, tijdens daglichturen en boven een flux drempelwaarde van $Y \text{ nmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA s}^{-1}$ |
| Stomata | Huidmondjes van planten |
| Stomataire ozonflux | Hoeveelheid ozon die een plant opneemt via de huidmondjes |

8 Afkortingen

| | |
|--------------------|---|
| AGIV | Agentschap voor Geografische Informatie Vlaanderen |
| AOT | Geaccumuleerde blootstelling aan ozon boven een bepaalde drempelwaarde |
| CLRTAP | Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution |
| CODA-CERVA | Centrum voor Onderzoek in Diergeneeskunde en Agrochemie |
| CORINE | Coordination of Information on the Environment |
| CTM | Chemisch Transport Model |
| DO ₃ SE | Deposition of ozone for stomatal exchange |
| ECMWF | European Centre for Medium-range Weather Forecasts |
| EMEP | European Modelling and Evaluation Programme |
| GAINS | Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies |
| GLDAS | Global Land Data Assimilation System |
| ICP-Vegetation | International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops |
| IRCEL | Intergewestelijke Cel voor het Leefmilieu |
| LAI | Leaf Area Index |
| NARA | Natuurrapport |
| NEC | Nationale Emissieplafonds |
| PAR | Fotosynthetisch actieve straling |
| PLA | Plant Leaf Area |
| POD _Y | fytotoxische ozon dosis boven een drempelwaarde van Y |
| ppb | parts per billion |
| RIO | Ruimtelijk Interpolatiemodel voor Ozon |
| UNECE | United Nations Economic Commission for Europe |
| VITO | Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek |
| VMM | Vlaamse Milieumaatschappij |
| VPD | Vapour pressure deficit (dampdrukdeficiet) |