



VLAAMSE MILIEUMAATSCHAPPIJ



Methode voor bepalen van de hemelluminantie



Studie uitgevoerd in opdracht van
MIRA, Milieurapport Vlaanderen

Onderzoeksrapport

MIRA/2007/06, december 2007



Algemene verspreiding

(contractnr.: 061235)

**Ondersteunend Onderzoek:
Methode voor het bepalen van de hemelluminantie**

Eindrapport

P. Van Tichelen, K. Remans, G. Meynen

2007/ETE/R/171



VITO

December 2007

WOORD VOORAF

In het Milieubeleidsplan 2003-2007 werd de doelstelling voor lichthinder als volgt geformuleerd:

“In 2007 komen geen gebieden meer voor met een kunstmatige hemelluminantie groter dan 9 keer de natuurlijke hemelluminantie (tussen 0.30 en 5 uur): dit is de categorie gebieden waar de kunstmatige hemelgloed nu het grootst is.”

Deze doelstelling werd geïnspireerd op de kaarten die in 2000 (Cinzano et al, 2001b) door P. Cinzano en F. Falchi gepubliceerd werden. Deze doelstelling werd geformuleerd voor de periode tussen 0:30 en 5:00 omdat het doven of dimmen van de verlichting 's nachts een belangrijke en haalbare beleidsmaatregel is.

Deze kaarten waren echter gebaseerd op metingen rond 21:30. Bovendien betreft het een éénmalige publicatie, waarbij geen updates voorzien waren. Bijgevolg ontbrak dus een berekening- of meetmethode voor de opvolging van deze doelstelling.

In deze studie wordt een methode opgesteld waarmee lichtvervuiling kan gemeten, opgevolgd en gecontroleerd worden in de tijd.

Deze studie is gekoppeld aan een uitgebreide meetcampagne met grondmetingen van de hemelluminantie ter verificatie van de bestaande kaarten voor de huidige toestand voor en na middernacht en om na te gaan of opvolging van de toestand hiermee mogelijk is.

Voor de extrapolaties en de opvolging worden de volgende opties besproken:

- Het gebruik van grondmetingen van hemelluminantie al dan niet met een fijn grid.
- Een tussenoplossing door een combinatie van grondmetingen met de bestaande kaarten.
- Het gebruik van nieuwe satellietbeelden in combinatie met de bestaande kaarten.

Van deze opties worden voor- en nadelen onderzocht, de nauwkeurigheid, de kost, ...

In de inleiding wordt ook de indicator 'hemelluminantie' besproken voor het opvolgen van 'lichtvervuiling' in het algemeen, meer bepaald: de astronomische lichthinder, de algemene lichthinder bij de mens en ecologische lichtverontreiniging.

Tenslotte wordt de haalbaarheid naar verificatie en opvolging van de huidige doelstelling besproken met aanbevelingen en alternatieve doelstellingen.

Deze studie en het rapport is mede tot stand gekomen door een actief begeleidingscomité (Myriam Bossuyt, Gilke Pée, Pieter Van Vooren); door hun revisies en bemerkingen hebben ze een positieve bijdrage geleverd bij de uitvoering van dit onderzoek.

SAMENVATTING

Deze studie bevat de resultaten van het onderzoek naar een methode voor het bepalen van de hemelluminantie of de hemelgloed. Het onderzoek past in het kader van het beperken van lichthinder in Vlaanderen en het opvolgen van de toestand.

In deze studie wordt meer specifiek onderzocht of er een haalbare methode bestaat voor opvolging en controle van de hemelluminantie in de tijd. Er waren geen bruikbare buitenlandse meetmethodes bekend bij de uitvoering van deze studie. De studie bevat bijgevolg origineel werk dat in de toekomst vatbaar is voor verbetering.

Vooreerst wordt een analyse gemaakt op basis van het werk dat reeds gepubliceerd werd, Cinzano en Falchi verrichten hierin belangrijk pionierswerk door op basis van satellietbeelden hemelluminantiekaarten op te stellen en door modellen voor het verschijnsel te ontwikkelen.

Om aan de geformuleerde doelstelling voor beleidsopvolging te kunnen beantwoorden werden in deze studie de volgende nieuwe opties verder onderzocht en geëvalueerd:

- Het gebruik van grondmetingen van hemelluminantie al dan niet met een fijn netwerk;
- Een tussenoplossing door een combinatie van grondmetingen met de bestaande kaarten;
- Het gebruik van nieuwe satellietbeelden in combinatie met de bestaande kaarten.

Het gebruik van enkel satellietmetingen is een onrechtstreekse methode waarbij nog aanvullende bewerkingen nodig zijn. Daarnaast zijn er nog steeds aanvullende grondmetingen nodig voor kalibratie. De satellietmetingen kunnen wel aanvullend gebruikt worden met grondmetingen om meer geografisch detail te leveren. Een methode hiervoor is echter nog niet beschikbaar en vergt verschillende manjaren specialistenwerk.

In deze studie werd een methode uitgewerkt die op basis van grondmetingen en de originele Cinzankaarten een geactualiseerde kaart kan maken, deze kan gebruikt worden als visuele ondersteuning bij de rapportering van de toestand over de jaren heen of de toestand voor en na middernacht.

De beschikbare meettoestellen voor hemelluminantie werden geëvalueerd en in het kader van dit onderzoek ook verder geoptimaliseerd.

Op basis van de meetcampagne in het kader van dit onderzoek kunnen de volgende besluiten genomen worden:

- hemelluminantie kan in brongebieden zoals steden sterk veranderen over een afstand van enkele kilometers;
- niet enkel de wegverlichting draagt bij tot hemelgloed;
- snelwegverlichting levert een verwaarloosbare bijdrage;
- er is een duidelijk verband tussen de metingen van fijn stof in de atmosfeer en de hemelluminantie;
- op bijna alle plaatsen werd veel meer gemeten dan op basis van de Cinzano kaarten kon vermoed worden, in het bijzonder geldt dit voor brongebieden zoals steden en industriezones;
- het gedeeltelijk doven van de wegverlichting na middernacht kan duidelijk gemeten worden;
- de hemelgloed van de maan is vele malen sterker dan die van kunstmatige verlichting;

- bewolking kan de hemelglod sterk doen oplopen, maakt metingen bovendien onvoorspelbaar en is niet relevant voor astronomische waarneming waardoor bij voorkeur wolkenvrij gemeten moet worden.

Bij het opvolgen van de hemelluminantie op basis van grondmetingen dient rekening gehouden te worden met variaties die zouden kunnen optreden door de fijnstofconcentratie in de atmosfeer en door sterke veranderingen in lokale lichtbronnen (vooral in brongebieden). Er zijn voldoende metingen nodig om wolkenvrije metingen te bekomen. De invloed van de fijnstofconcentratie kan gecorrigeerd worden indien een correlatie van de hemelglod met die fijnstofconcentratie in rekening gebracht wordt.

In brongebieden is het meten van hemelglod minder aangewezen voor opvolging in de tijd omdat lokale bronnen hier een sterke invloed hebben. De invloed van lokale lichtbronnen in de metingen kan men beperken door in donkere gebieden te meten. De metingen van de resterende hemelluminantie in deze donkere gebieden geven dan uiteindelijk nog maar de som van de bijdrage weer van bronnen tot meer dan 30 km omtrek en de meting is dan ook representatief voor een groot gebied in Vlaanderen. Het creëren van ‘donkertegebieden’, bijvoorbeeld in natuurgebieden, kan bovendien ook aansluiten bij een doelstelling om de mogelijke ecologische verstoringen door kunstlicht te beperken door de belangrijkste verstoring van de nabije omgeving (3 km) te beperken.

De doelstelling zoals die geformuleerd werd in het milieubeleidsplan voor 2007 is niet bereikt en lijkt ook in de toekomst moeilijk haalbaar. Meer aangewezen lijkt dus om nieuwe kwantificeerbare lange termijn doelstelling (2020) doelstellingen te formuleren voor donkertegebieden waarin de natuurlijke hemelglod maximaal hersteld wordt. Zoals hierboven vermeld wordt zal men hiervoor eerst in de onmiddellijke omgeving moeten ingrijpen maar uiteindelijk ook in de belangrijke brongebieden in de verre omgeving, zoals steden.

INHOUD

Woord vooraf.....	2
Samenvatting	3
Inhoud.....	5
1 Inleiding.....	7
1.1 Definities.....	7
1.2 Grootheden.....	8
1.3 De hemelluminantiekaarten opgesteld door Cinzano.....	10
1.4 Het MINA-plan	12
2 Het model van Cinzano en mogelijkheden voor beleidsopvolging.....	13
2.1 Beschrijving van het model van Cinzano	13
2.2 Aanbevelingen voor een mogelijk beleidsopvolgingsinstrument op basis van de analyse van het model van Cinzano.....	15
2.3 Opties voor een hemelluminantie-opvolgingsmethode	17
2.3.1 Het gebruik van grondmetingen van hemelluminantie al dan niet met een fijn grid	17
2.3.2 Een combinatie van grondmetingen met de bestaande kaarten.....	18
2.3.3 Het gebruik van nieuwe satellietbeelden in combinatie met de bestaande kaarten.	18
2.3.4 Vergelijking van de nieuwe opties en de keuzes voor het vervolg van het onderzoek	20
3 Meten van hemelluminantie.....	21
3.1 Beschrijving van de gebruikte luminantiemeters	21
3.1.1 Luminantiemeter LMT L 1009.....	21
3.1.2 De SQM sky quality meter.....	21
3.1.3 De TAOS TSL237S– lichtsensor	23
3.1.4 De VITO-sensor	23
3.1.5 Afweging van voor- en nadelen van verschillende meetmethodes	25
3.2 Omschrijving van de meetcampagne.....	25
3.2.1 Criteria voor de selectie van de meettijdstoppen.....	26
3.2.2 Criteria voor de selectie van de meetlocaties	26
3.3 Meetresultaten van de verschillende meetcampagnes	29
3.3.1 Testmeting 15 januari 2007.....	30
3.3.2 Meetsessie februari + lichtverspreiding Roeselare.....	31
3.3.3 Meetsessie ‘Nacht van de Duisternis’	33
3.3.4 Meetsessie maart + lichtverspreiding Diest	34
3.3.5 Meetsessie april	37
3.3.6 Herhalingsmeetcampagne	37
3.3.7 Kalibratiemetingen 13/06/2007.....	39
3.4 Samenvatting van de resultaten van de meetcampagnes	41
4 Methode voor extrapolatie Van hemelluminantiekaarten vanuit grondmetingen.....	42
4.1 Opstellen van methode voor extrapolatie uit grondmetingen aan de hand van Cinzankaarten	42
4.1.1 Selectie meetgegevens	42
4.1.2 Inlezen gegevens Cinzankaarten.....	42
4.1.3 Herschaling op basis van de verzamelde gegevens	43
4.2 Formuleren van opvolgbare beleidsdoelstellingen.....	46
5 Belangrijkste conclusies uit deze studie	49

6	Verklarende woordenlijst.....	51
7	Afkortingenlijst	53
	Referenties	54
	Bijlagen.....	55
	A. Maan op- en ondergangstijden voor 2007	56
	B. Maansverduistering van 3 maart 2007.....	57
	C. Checklist metingen	58
	Materiaal	58
	Locatie en tijdstip	58
	Metingen Praktisch	58
	Metingen inhoudelijk.....	58
	D. Overzicht van de verschillende meetlocaties	60
	a) Donkertegebieden	61
	b) Brongebieden.....	68
	c) Langdurige meetcampagne	72
	d) Meetlocaties “Nacht van de Duisternis”	73
	e) Verspreidingstest	76
	E. Meetresultaten	79
	a) Selectie metingen.....	79
	b) Meetcampagne februari.....	80
	c) Nacht van de Duisternis	82
	d) Lichtverspreiding Diest.....	82
	e) Meetcampagne april.....	82
	F. Hemelluminantiekaarten op basis van metingen in donkere en brongebieden	84
	G. Alternatieve schaal voor de hemelluminantiekaarten.....	86
	H. Broncode voor opstellen van kaarten (MATLAB).....	87

1 INLEIDING

Licht is onontbeerlijk voor menselijk leven en ons ecosysteem maar overmatig gebruik kan tot 'lichthinder' leiden. De aandacht voor 'lichthinder' of 'lichtvervuiling' is de laatste decennia toegenomen vooral onder impuls van astronomen die wijzen op een stijgend en soms onoordeelkundig gebruik van buitenverlichting. 'Hemelgloed' is een belangrijke indicator voor deze lichtvervuiling. In deze inleiding worden de gebruikte begrippen en formules in deze studie toegelicht en de toestand van de hemelluminantie zoals bekend van de Cinzano kaarten besproken. Meer informatie over lichthinder staat in het MIRA achtergronddocument lichthinder (<http://www.milieurapport.be/>) (Mira (2005)). In dit achtergronddocument wordt ook de historie, de beleidsmaatregelen, de bronnen en andere indicatoren voor lichthinder (jaarlijks energiegebruik, deelnemers nacht van de duisternis, gerapporteerde hinder) besproken.

In deze studie wordt meer specifiek onderzocht of er een haalbare methode bestaat voor opvolging en controle van de hemelluminantie in de tijd. Er waren geen bruikbare buitenlandse meetmethodes bekend bij de uitvoering van deze studie. De studie bevat bijgevolg origineel werk dat in de toekomst vatbaar is voor verbetering. De nodige meettoestellen voor hemelluminantie werden in het kader van dit onderzoek geoptimaliseerd.

1.1 Definities

Lichthinder is de overlast veroorzaakt door kunstlicht bij mens en dier. Lichthinder treedt bij de mens voornamelijk op als regelrechte verblinding, als versturende factor bij het verrichten van avondlijke of nachtelijke activiteiten of als bron van onbehagen. Ook dieren ondervinden lichthinder door versnippering en beïnvloeding van hun leefgebied en verstoring van hun bioritme. Vooral bij vogels, insecten en amfibieën is waargenomen dat buitenverlichting het gedrag beïnvloedt door desoriëntatie, afstoting en aantrekking. Er zijn geen aanwijzingen voor grootschalige nadelige gevolgen van buitenverlichting voor planten.

Hemelgloed of lichtsluier is het gevolg van weerkaatsing van zichtbare en niet-zichtbare straling op gasmoleculen, waterdamp en stofdeeltjes in de lucht. Er bestaan twee soorten hemelgloed. Enerzijds is er de *natuurlijke hemelgloed* die veroorzaakt wordt door natuurlijke lichtbronnen en de luminantie van de atmosfeer, anderzijds is er de *kunstmatige hemelgloed* (Figuur 1), veroorzaakt door de directe en weerkaatste straling van verlichtingstoestellen, lampen en verlichte oppervlakten. De intensiteit van de lichtsluier wordt beïnvloed door de atmosferische omstandigheden en het vervuilingniveau van de atmosfeer. Het is dus niet verwonderlijk dat de grootste lichtsluiers worden waargenomen boven grote stedelijke kernen.

Lichtvervuiling kan in het algemeen omschreven worden als het overmatig en verspillend gebruik van kunstlicht. Een vorm van lichtvervuiling is de kunstmatige hemelgloed.



Figuur 1 buitenverlichting veroorzaakt hemelgloed: Bron: (foto ©Vito)

Lichthinder bij de mens kan direct gemeten worden via enquêtes; bijvoorbeeld in de SLO enquête (AMINABEL (2004)) of de gezondheidsenquête (2004) door het Wetenschappelijk Instituut Volksgezondheid van de afdeling Epidemiologie van Federale overheidsdienst Volksgezondheid.

Een verder onderscheid kan gemaakt worden tussen verschillende vormen van lichthinder of lichtvervuiling: de astronomische lichtvervuiling, de ecologische lichtvervuiling (Longcore(2005)). Astronomische lichtvervuiling is welbekend en maakt deel uit van verschillende publicaties (Cinzano (2000b), Cinzano (2001b)). Vooral de amateurastronomen ondervinden hinder. De wetenschappelijke waarnemingen worden maar op beperkte plaatsen op aarde uitgevoerd (bv. Chili) of via satellieten en ondervinden dus weinig hinder. De gemeten hemelluminantie in deze studie is direct relevant voor de astronomische lichthinder. Ecologische lichtvervuiling is recentelijk gedefinieerd (Longcore(2005)) als de negatieve ecologische effecten van kunstmatige buitenverlichting op dier- en plantsoorten. Er kan dus ook ecologische schade van lichthinder zijn (Longcore(2005)).

Indirect kan de hier voorgestelde indicator hemelluminantie dienen voor ecologische lichthinder. In deze studie worden er enerzijds metingen verricht in donkertegebieden (veelal natuur- of landbouwgebieden) en anderzijds in brongebieden (steden of industriegebieden). Door de afzonderlijke metingen in de donkertegebieden kan hier een opvolging naar ecologische lichthinder mogelijk bereikt worden, omdat het ook een indicator is voor een lage lokale lichtvervuiling die enkel bereikt kan worden indien bijna alle buitenverlichting in de onmiddellijke omgeving gedoofd is. Dit minimaal gebruik van buitenverlichting in de stille uren in deze gebieden geeft dan een minimale mogelijke verstoring aan van dieren en insecten door kunstlicht. Bemerkt ook dat bij volle maan de natuurlijke hemelgloed immers nog steeds veel hoger is dan de kunstmatige hemelgloed (zie 3.3.3).

1.2 Grootheden

De volgende grootheden worden gebruikt in deze studie en komen uit de verlichtingskunde, deze hebben overeenkomstige ISO-eenheden:

De *lichtstroom* is de totale hoeveelheid licht die een lichtbron per seconde in alle golf lengten van het zichtbare licht uitzendt (lumen [lm]).

De *verlichtingssterkte* van een bepaalde oppervlakte komt overeen met het aantal lumen dat erop invalt per m² (1 lux [lx]).

De *ruimtehoek* is het equivalent van een hoek maar dan in de driedimensionale ruimte. De grootte van een ruimtehoek wordt uitgedrukt in de SI-eenheid steradiaal (sr). De eenheidsbol vormt daarbij een ruimtehoek van 4π steradiaal en is dus de grootste ruimtehoek.

De *lichtsterkte* van een lichtbron is de lichtstroom die per eenheid van ruimtehoek in een bepaalde richting wordt uitgezonden (1 Candela [Cd]).

De *luminantie* van een lichtbron of van een bestraalde oppervlakte is de lichtsterkte per m² schijnbaar oppervlak. Het is een maat voor de helderheid, bij eenzelfde verlichtingssterkte hebben donkere oppervlakken een kleinere luminantie dan heldere oppervlakken (1 Cd/m²).

In de astronomie worden verschillende kleurfilters gebruikt: Het meest voorkomende is het *UBV-fotometrie* systeem (UBV-photometry) met drie breedband kleurfilters (Narisada (2004)). De filters komen overeen met een Ultraviolet, Blauw of zichtbaar (Visible) spectrale band, men spreekt van de U- de B- en de V-band. De V-band wordt bekomen door gebruik te maken van een breedbandfilter met een nominale waarde van 550 nm in dus relevant voor zichtbaar licht, astronomen zijn soms meer geïnteresseerd in de B-band.

In de fotometrie wordt meestal met één enkele kleurfilter gemeten, de V(λ) filter die overeenstemt met de ooggevoeligheidscurve bij 'fotopisch zicht', m.a.w. de CIE V(λ) curve. Men spreekt van fotopisch zicht bij hoge luminanties (domineert >3 Cd/m²) en 'scotopisch zicht' bij lage luminanties (domineert < 3 Cd/m²) (Narisada K. & Schreuder D. (2004)). Bij lage luminanties (<3 Cd/m²) zoals bij hemelgloed is uiteraard scotopisch zicht belangrijk. Hiervoor werd door de CIE de V'(λ) ooggevoeligheidscurve opgesteld. Bemerkt dat CIE V(λ) curve niet overeenkomt met de V-band, in de CIE V(λ) curve hebben blauw en rood overeenkomstig de ooggevoeligheid een lager gewicht.

De volgende specifieke astronomische grootheden worden gebruikt in deze studie met hun eigen historische eenheden:

Als een maat voor 'luminantie' wordt de *specifieke intensiteit* gebruikt, uitgedrukt in 'schijnbare magnitudes' per vierkante boogseconde. Deze maat kan dus ook gebruikt worden om de hemelluminantie uit te drukken.

Als een maat voor 'verlichtingssterkte' wordt de *schijnbare magnitudes* gebruikt.

Schijnbare magnitudes van sterren variëren van -26,8 (de zon) tot +24 (de zwakste ster waarneembaar van op de aarde). Het is een logaritmische, negatieve schaal. Indien de schijnbare magnitude van een object met één eenheid daalt, dan wordt dit voorwerp 2,5 maal helderder. Onder ideale omstandigheden (zonder lichtvervuiling) kan men 's nachts met het blote oog net sterren van de zesde schijnbare magnitude zien.

De *vierkante boogseconde* (boogsec²) is een ruimtehoek die overeenstemt met een vierkant met openingshoek in boogseconde.

De onvervuilde nachthemel heeft een specifieke intensiteit van 22 schijnbare magnitudes per vierkante boogseconde in de zogenaamde V-filter. In de sterrenkunde meet men namelijk vaak het licht dat door een object uitgestraald wordt in een bepaald deelgebied van het elektromagnetisch spectrum, waarbij men filters gebruikt die enkel een bepaalde golflengte doorlaten. Bij wijze van vuistregel komen 22 schijnbare magnitudes overeen met een luminantie van ongeveer $2,2 \times 10^{-4}$ cd/m².

Praktisch kan ook gebruik gemaakt worden van de limietmagnitude. De limietmagnitude of grensmagnitude is de schijnbare magnitude boven dewelke sterren niet meer zichtbaar zijn voor het blote oog tengevolge van lichtvervuiling. Een heldere nachthemel kan immers tot

gevolg hebben dat sterren, die normaal voor het blote oog zichtbaar zouden moeten zijn, overstraald worden door kunstlicht. Vermits het menselijk oog gevoelig genoeg is om 's nachts met het blote oog sterren van schijnbare magnitude 6 waar te nemen, duidt een limietmagnitude van 6 op een onvervuilde nachthemel. Dergelijk maat is echter niet meer werkzaam voor sterren zwakker dan een schijnbare magnitude 5 tot 6. Tabel 1 toont het verband tussen deze limietmagnitude en de hemelluminantie.

Tabel 1 Verband tussen de magnitude van de zwakste nog zichtbare sterren en de hemelluminantie, gemeten m.b.v. de luminantie (Bron: Garstang (1986))

Limietmagnitude	hemelluminantie	
	mag / (boogsec) ²	cd / m ²
1	8,8	32
2	10,2	9
3	12	1,7
4	15,6	0,06
5	19,3	0,002

De limietmagnitudes zijn theoretische magnitudes, zoals ze zich zouden voordoen buiten de atmosfeer. In de praktijk moeten ze met 1/4 tot 1 magnitude verminderd worden, afhankelijk van de transparantie van de lucht, de hoogte van de ster, en eventuele verblinding. (Garstang (1986))

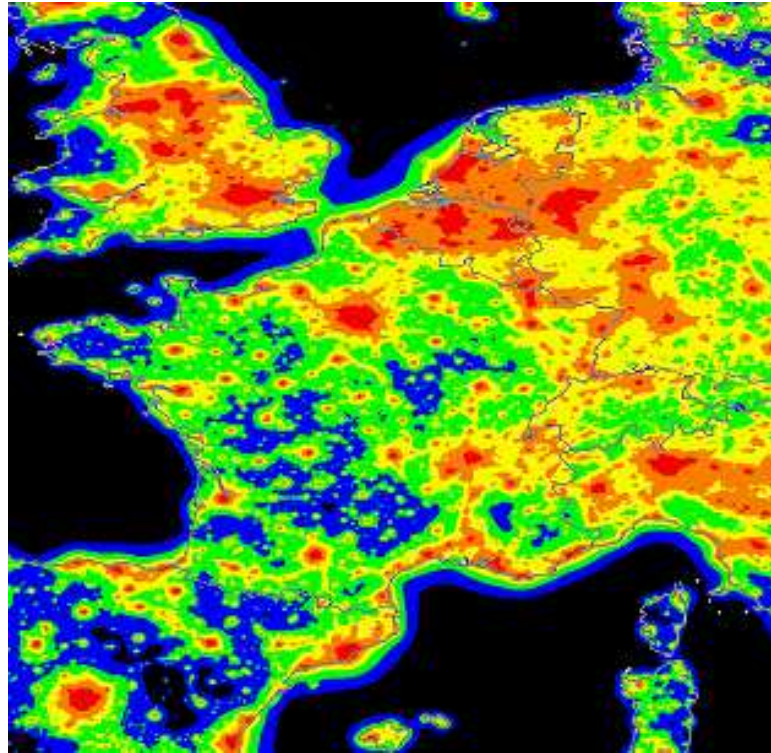
De relatie tussen hemelluminantie in astronomische en fotometrische grootheden in de V(λ) band is (Narisada (2004)):

$$L [\text{cd/m}^2] = 1,085 \cdot 10^5 \cdot e^{-0,92102 \cdot V}$$

Waarbij V de 'specifieke intensiteit' is in schijnbare magnitudes per vierkante boogseconde. Bemerk dat de Cinzanokaarten meestal voor de V-band gepubliceerd worden (Figuur 2) en dat dit niet noodzakelijk overeenkomt met metingen voor de CIE V(λ) curve die bij fotometrische grootheden zoals luminantie gebruikt wordt, dit verklaard ook waarom er afwijkingen kunnen ontstaan door de kleureigenschappen van het licht (Cinzano P. (2005)).

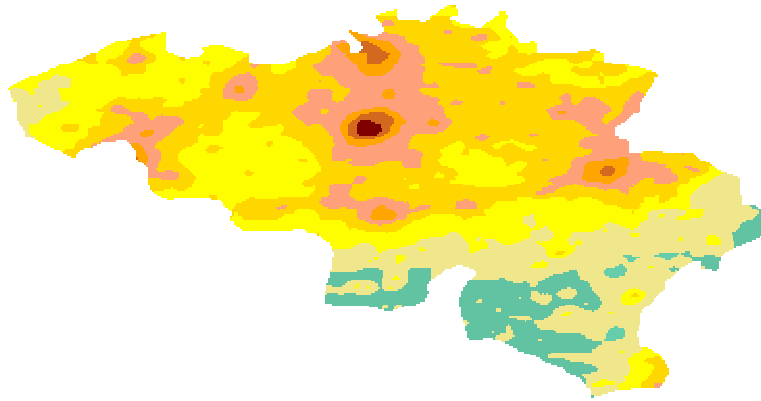
1.3 De hemelluminantiekaarten opgesteld door Cinzano

De kaarten van Cinzano worden meestal voorgesteld als de kunstmatige hemelluminantie als percentage van de natuurlijke hemelluminantie (Figuur 2), deze zijn zowel beschikbaar in de V-band als de B-band. Deze kaarten (Figuur 3) zijn ook beschikbaar in specifieke intensiteit waardoor de relatie met fotometrische grootheden en grondmetingen mogelijk is op basis van de bovenstaande formule, bemerk dat voor België deze kaarten meer detail bevatten.



Figuur 2 Kunstmatige hemelluminantie als percentage van de natuurlijke hemelluminantie (Europa, 1998 – 2000) in de V-band met: Zwart < 11 %, blauw 11 % - 33 %, groen 33 % - 100 %, geel 100 % - 300 %, oranje 300 % - 900 %, rood > 900 %, toestand in Vlaanderen voor middernacht. (Bron: Cinzano & Falchi (2000b)1)

Figuur 2 illustreert duidelijk het verband tussen bevolkingsdichtheid en lichtvervuiling in Europa. Vlaanderen, het grootste deel van Nederland en het Ruhrgebied bevinden zich op een vergelijkbaar niveau (> 300 %). Het groene interval met een kunstmatige hemelluminantie kleiner dan de natuurlijke zijn vooral in afgelegen gebieden van Frankrijk en Spanje gelegen. De kuststroken illustreren duidelijk de sterke uitdeining van de hemelglod. Een klein deel van de Westhoek kent een verhouding van 100 % - 300 %. Duidelijk herkenbaar in de hoogste categorie zijn de Vlaamse ruit (doorlopend naar het Brussels gewest en de regio Charleroi), het economisch netwerk Albertkanaal en de grensoverschrijdende netwerken Kortrijk-Rijsel en Hasselt-Genk-Maastricht-Aken-Luik.



Figuur 3 Kunstmatige hemelluminantie in schijnbare magnitudes in de V-band voor middernacht (1998 – 2000) (>21.5 = wit 21-21.5 = groen 20.5-21 = donkergroen 20-20.5 = kaki 19.5-20 = geel 19-19.5 = donkergeel 18.5-19 = roos 18-18.5 = oranje 17.5-18 = bruin <17.5 = donkerrood)¹ (Bron: Cinzano & Falchi (2000b))

1.4 Het MINA-plan

In Vlaanderen is de planning van het milieubeleid vastgelegd in het decreet 'Algemene bepalingen inzake milieubeleid (DABM)', dat bepaalt dat vijfjaarlijks een milieubeleidsplan wordt opgesteld. Dit milieubeleidsplan bepaalt de hoofdlijnen van het milieubeleid voor de komende vijf jaar. In het Milieubeleidsplan 2003 – 2007 werden volgende doelstellingen voor lichthinder opgenomen (Milieubeleidsplan (2007)) :

- Langetermijndoelstelling (2020): Verminderen van de hemelluminantie van kunstmatige lichtbronnen, zodat ook in Vlaanderen gebieden tot stand worden gebracht waar de natuurlijke hemelluminantie maximaal hersteld wordt.
- Plandoelstelling: Nieuwe lichthinder voorkomen en bestaande lichthinder verminderen.
- Plandoelstelling (2007): In 2007 komen geen gebieden meer voor met een kunstmatige hemelluminantie groter dan 9 keer de natuurlijke hemelluminantie tussen 0:30 uur en 5:00 uur: dit is de categorie gebieden waar de kunstmatige hemelgloed nu het grootst is.

Deze doelstellingen van het milieubeleidsplan kunnen momenteel niet opgevolgd worden bij gebrek aan meetmethode voor de kunstmatige hemelluminantie. Met dit onderzoek trachten we dit kennishiaat op te vullen.

¹ Credit: P. Cinzano, F. Falchi (University of Padova), C. D. Elvidge (NOAA National Geophysical Data Center, Boulder). Copyright Royal Astronomical Society. Reproduced from the Monthly Notices of the RAS by permission of Blackwell Science.

2 HET MODEL VAN CINZANO EN MOGELIJKHEDEN VOOR BELEIDSOPVOLGING

2.1 Beschrijving van het model van Cinzano

Het model van Cinzano werd voor het eerst voorgesteld in 2000 met als doel de kunstmatige hemelluminantie in kaart te brengen in astronomisch fotometrische banden (bv. V-band en B-band) met een resolutie van ongeveer één kilometer (Cinzano (2000b)). De Cinzanokaarten en de bijhorende modellering hebben nadien in belangrijke mate bijgedragen tot een algemeen inzicht in de fysica van de astronomische lichtvervuiling en de geografische verspreiding hiervan (Cinzano (2000b), Cinzano (2001b), Cinzano (2004)). Bovendien tonen de kaarten de meest geschikte gebieden voor astronomische observatie goed aan. Anderzijds laten de kaarten toe om gebieden met hoge astronomische lichtvervuiling op te sporen en beleidsmakers hierover aan te spreken met voorstellen om lichtvervuiling beperkende maatregelen te nemen. De kaarten werden bovendien voor bijna alle continenten gepubliceerd en laten dus op mondiale schaal vergelijking toe. Vlaanderen komt in deze kaarten voor bij de regio's met de meeste lichtvervuiling (Figuur 2) en is vergelijkbaar met andere zeer dichtbevolkte gebieden (Milaan, Roergebied, Parijs, ...) Voordien waren enkel kaarten voor beperkte gebieden met inschatting van de kunstmatige hemelluminantie beschikbaar gebaseerd op een correlatie tussen bevolkingsdichtheid en metingen (Walker (1970), Bertiau (1973)). De volledige berekeningscode is niet publiek beschikbaar en de hiernavolgende beschrijving is gebaseerd op publicaties die de algemeen lijnen van de methode beschrijven.

Het model wordt besproken in publicatie (Cinzano (2001b)) en voorspelt de 'zenit kunstmatige hemelluminantie op zeeniveau', volgens zenitwaarneming of m.a.w. opwaarts t.o.v. de zwaartekrachtrichting.

De kunstmatige hemelluminantie in een bepaald punt op het aardoppervlak in een gegeven waarnemingsrichting werd bekomen door de integratie van de bijdrage van de omliggende punten. Elke bijdrage werd berekend aan de hand van gedetailleerde modellen voor de voortplanting van licht in de atmosfeer afkomstig van de opwaartse lichtstroom. De brongegevens voor deze opwaartse lichtstroom zijn afkomstig van DMSP-satellietdata (Defense Meteorological Satellite Program). Deze DMSP meet de zenit opwaartse lichtstroom via een OLS (Operational Line Scan) instrument. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de opname hiervan voor België tussen 21:00 en 22:00 is. Deze opname heeft een brede spectrale gevoeligheid van zichtbaar licht (VIS) en infrarood (TIR). De gegevens zijn gebaseerd op wolkenvrije metingen. De satellietmetingen werden gekalibreerd door vliegtuigmetingen.

De brongegevens zijn afkomstig van satellieten van het Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) van de US Air Force die zich in een baan van 830 km hoogte rond de aarde bevinden. Ze zijn uitgerust m.b.v. het Operational Linescan System (OLS), dat zo gevoelig is dat het instrument ook in staat is om bij nieuwe maan stedelijke, industriële en andere antropogene lichtbronnen te detecteren.

Om de satellietbeelden te gebruiken moeten ondermeer de volgende voorafgaande stappen ondernomen worden, daarvoor werden speciale verwerkingsalgoritmes ontwikkeld:

- creatie van een fijnere referentiegrid met hogere resolutie (1 km) dan de inputgegevens van één enkel satellietbeeld);

- de identificatie van lichtvlekken afkomstig van de zonnestraling op de lens en eliminatie van deze fouten;
- de eliminatie van toevallige fouten door toevallige verlichting (bv. flares);
- de eliminatie van storingen in de satellietbeelden ten gevolge van fouten in de digitale camera door kosmische straling;
- de kalibratie naar lichteenheden door gebruik te maken van de kalibratiegegevens van de satellietsensor voor lancering in combinatie met simulaties van de werking in de ruimte;
- de samenvoegen van de wolkenvrije beelden en omzetting naar de referentiegrid;
- de eliminatie van maanverlichte gebieden, de kaarten worden opgesteld voor nieuwe maan;
- de filtering van toevallige elementen en aggregatie van alle metingen.

Vervolgens werd door Cinzano en Falchi een rekenprogramma ontwikkeld dat de hemelluminantie berekent op basis van de opwaartse lichtstroom.

Hiervoor werd een propagatiemodel met eindige elementen opgesteld dat de hemelluminantie berekend op basis van de opwaartse lichtstroom van de omliggende punten.

De vergelijkingen voor dit rekenprogramma werden afgeleid van semi-empirische wetten voor lichtvoortplanting in de atmosfeer. Garstang (Garstang 1986) ligt aan de basis van deze wetten. Deze modellen veronderstellen 'Rayleighverstrooiing' voor moleculen en Mie lichtverstrooiing voor aerosolen of fijn stof en houden rekening met de uitdoving over de lichtstralen en de kromming van de aarde. Rayleigh lichtverstrooiing is de verstrooiing van licht door deeltjes die kleiner zijn dan de golflengte van het licht. Rayleighverstrooiing treedt op wanneer licht door een transparante vloeistof of vaste stof gaat, maar kan het duidelijkst worden waargenomen bij gassen. Rayleighverstrooiing in de atmosfeer is de reden waarom de onbewolkte lucht blauw is. De hoeveelheid Rayleighverstrooiing voor een lichtstraal is afhankelijk van de grootte van de deeltjes en de golflengte van het licht. De golflengteafhankelijkheid is bijzonder sterk: de hoeveelheid verstrooid licht is omgekeerd evenredig met de vierde macht van de golflengte. Mie lichtverstrooiing is een complete analytische oplossing volgens de basisvergelijkingen van Maxwell voor elektromagnetische golven voor de reflectie op sferische deeltjes.

Deze modellen voor lichtverstrooiing zijn gebaseerd op de moleculen en fijn stof deeltjes in de atmosfeer en hiervoor werden veronderstellingen gemaakt.

Voor de moleculen werd een standaardatmosfeer genomen (US Standard Atmosphere (1962)) waarop vervolgens een vereenvoudigde vergelijking werd toegepast waarvan aangetoond werd dat ze een goede benadering is tot op 10 km hoogte.

Voor de fijnstofnevel in de atmosfeer werden gemiddelde atmosferische omstandigheden verondersteld met gegevens zoals die toen beschikbaar waren. Het lag niet in de bedoeling een zeer gedetailleerd model te maken over de lokale fijnstofverdeling. Het lag ook niet in de bedoeling van Cinzano rekening te houden met toevallige toenames van fijn stof op verschillende hoogte of op de grenslaag nabij het aardoppervlak. De effecten van ozon en vulkanisch as werden verwaarloosd. Hiervoor werd een exponentiele afname van fijnstofnevel in de atmosfeer verondersteld in functie van de hoogte. Metingen hebben aangetoond dat dit voor de eerste 10 km een redelijke benadering is.

De gemeten opwaartse lichtstroom door de satelliet is in één welbepaalde richting en bijgevolg moesten ook veronderstellingen gemaakt worden over de uitstraling van licht in verschillende andere richtingen. Voor de opstelling van de kaarten werd daarom verondersteld dat alle gebieden dezelfde genormaliseerde lichtemissiefunctie hebben.

Hiervoor werd een model voor lichtemissie gebruikt dat experimenteel door Garstang (1986) bepaald werd. In eerste instantie werd de berekening gemaakt in de veronderstelling dat alle landoppervlak zich op zeehoogte bevindt, later werd hiervoor een aangepast model gemaakt dat in de mate van het mogelijke rekening houdt met het reliëf (vooral relevant in bergachtige gebieden en dus minder relevant voor Vlaanderen).

Het model houdt voor zover mogelijk rekening met het kleurenspectrum van het opwaartse licht en de invloed hiervan op de lichtverstrooiing, waarbij de satellietdata aangevuld moest worden aangezien deze informatie niet volledig was.

Uiteindelijk werden de bekomen beelden gekalibreerd om zo veel mogelijk aan te sluiten bij grondmetingen. Deze metingen werden uitgevoerd met een telescoop en CCD-camera en zijn daarom gelijkaardig met de metingen die in het kader van dit onderzoek uitgevoerd worden. De metingen werden voor 1998 gekalibreerd omdat er vanuit dat jaar het meeste grondmetingen beschikbaar waren. Hierbij vermeldt de auteur dat er in Italië een toename van hemelluminantie tot 10 % per jaar is, hetgeen het moeilijk maakt om metingen van verschillende jaren door elkaar te gebruiken. De auteur gebruikte ook de natuurlijke achtergrondstraling van 1998. De natuurlijke achtergrondstraling wordt in belangrijke mate beïnvloed door de zonneactiviteit. In 1998 was de zonneactiviteit laag dus de auteur waarschuwt dat de natuurlijke achtergrondstraling aanzienlijk hoger kan liggen (er is geen indicatie hoeveel).

Verificatie toonde aan dat er globaal 10 % onzekerheid is en tot 60 % per punt. De auteur vermeldt dat een meer precieze kalibratie mogelijk is, indien er meer grondmetingen beschikbaar komen.

2.2 Aanbevelingen voor een mogelijk beleidsopvolgingsinstrument op basis van de analyse van het model van Cinzano

Het Cinzanomodel is niet ontwikkeld als een 'beleidsopvolgingsinstrument', dit wil zeggen als een indicator die gebruikt kan worden voor beleidsopvolging. Hierna volgt een bespreking van de vereisten voor een 'beleidsopvolgingsinstrument' op basis de beschikbare publicaties inclusief het Cinzanomodel.

De Cinzanoskaarten werden éénmalig gepubliceerd en een opvolging in de tijd is er anno 2007 niet beschikbaar. De beschikbare kaart is op basis van de toestand in 1998 (zie 2.1). Dit kan dus enkel opgelost worden met aanvullende grondmetingen zoals deze uiteindelijk gebruikt werden om de kaarten te kalibreren of door het gebruik van nieuwe satellietbeelden indien het model voor het omrekenen naar hemelluminantie beschikbaar zou zijn. Het Cinzano rekenmodel om de hemelluminantiekaarten op te stellen op basis van satellietbeelden van opwaartse lichtstroom werd aangevraagd maar is echter niet beschikbaar. De publicaties (zie 2.1) tonen ook aan dat de werkwijze zeer omslachtig en complex is en zomaar niet uitgevoerd kan worden. Enkel werken op basis van satellietmetingen is geen oplossing om de doelstellingen in verband met hemelluminantie uit het milieubeleidsplan op te volgen, omdat de opnames gebeuren tussen 21:00 en 22:00. Deze gegevens laten immers niet toe om uitspraken te doen over beleidsmaatregelen die lichtvervuiling aanpakken zoals verlichting te doven of te dimmen na middernacht.

De hemelluminantie die door Cinzano en Falchi berekend werd kan ook rechtstreeks vanop aarde gemeten worden, dus door grondmetingen. De kaarten werden toen ook met dergelijke metingen gekalibreerd. Het voordeel van deze grondmetingen is dus ook dat ze nauwkeuriger zijn. De meetmethode en bijhorende instrumenten worden in hoofdstuk 3

besproken. In dit opzicht wordt aan een belangrijke eis voor gebruik als beleidsopvolgingsinstrument voldaan.

Hierbij nog een korte opsomming van de veronderstellingen uit het Cinzanomodel die afwijkingen kunnen veroorzaken tussen de kaarten en de reële metingen (meer info zie 2.1):

- Het model gaat uit van een standaard aerosolinhoud van de atmosfeer en houdt dus geen rekening met de variaties van fijn stof die in het milieu optreden. De stofinhoud van de atmosfeer varieert in werkelijkheid, hierover verder meer in 3.3.6.
- Een bijkomende beperking is dat het model vaste veronderstellingen maakt over de niet-zenitale (opwaartse) lichtstroom vanaf het aardoppervlak (zie ook 2.1). Nochtans heeft de emissiehoek van lichtbronnen een belangrijke invloed op de hemelgloed (Cinzano (2000a)). Er werd in voorliggend onderzoek gevonden dat op een afstand van enkele kilometer van een stad het licht dat door een verlichtingstoestel uitgestraald wordt in een hoek van 0° tot 10° boven de horizon even belangrijk is als het licht dat van 10° en meer wordt uitgestraald. De structuur van een stad (al dan niet dichtbebouwd) kan al dan niet zorgen voor een afscherming van deze horizontale lichtstroom van straatverlichting. Het is ook mogelijk dat het licht van de binnenverlichting dat naar buiten gestraald wordt wel een invloed heeft in de onmiddellijke omgeving. Kortom de betrouwbaarheid van de resultaten in de onmiddellijke omgeving van een stad dienen geëvalueerd te worden.

Het Cinzanomodel veronderstelt ideale omstandigheden voor astronomie, d.w.z.:

- De kaarten en berekeningen zijn steeds voor een volledig heldere hemel, zonder bewolking. In Vlaanderen zijn deze momenten zeldzaam, bijgevolg moeten meerdere meetperiodes voorzien worden.
- Dit model geeft enkel informatie bij nieuwe maan. Er is dus geen enkele duiding naar de relatieve verhouding van kunstmatige hemelgloed versus een toestand met maanlicht. Deze informatie kan nochtans nuttig zijn als maat voor een mogelijke verstoring van het ecosysteem door overmatige hemelgloed. Dit houdt ook een beperking in van de meetperiodes. Enkel de nachten rond nieuwe maan komen in aanmerking om te meten.

De kaartgegevens zijn numeriek beschikbaar relatief ten opzichte van de natuurlijke achtergrondstraling of in schijnbare magnitudes. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de natuurlijke achtergrondstraling kan variëren (aangenomen werd $21,6 \text{ mag/bgsec}^2$ ofwel $0,25 \text{ mcd/m}^2$ in de V-band) (Matilla (1996)). De volgens Cinzano voorspelde waarden in Vlaanderen voor hemelgloed zijn zo hoog dat bij absolute metingen de variaties in achtergrondstraling waarschijnlijk weinig rol spelen. De laagst gemeten waarde is $1,4 \text{ mCd/m}^2$, wat nog steeds meer dan vijf maal de natuurlijke hemelgloed is.

Uit deze analyse kan men dus samengevat het volgende afleiden:

- De reeds gepubliceerde Cinzankaarten zijn niet bedoeld voor opvolging van beleidsdoelstellingen en ze bevatten geen informatie over het uitschakelen van verlichting na de middernacht.
- In de buurt van steden zijn de kaarten mogelijk minder nauwkeurig indien de uitstraling van het licht afwijkt t.o.v. de veronderstellingen in het Cinzanomodel.
- Op lokaal vlak zouden de kaarten afwijkingen kunnen bevatten tot 60 % (zie 2.1) en globaal 10 %.

- Er zijn extra metingen vóór en na middernacht nodig want de satellietmetingen zijn enkel tussen 21:00 en 22:00.
- De aerosolinhoud speelt een belangrijke rol bij hemelgloed, deze varieert in werkelijkheid in functie van het weer en de lokale toestand.
- De waardes in Vlaanderen voor kunstmatige hemelgloed zijn zo hoog dat bij absolute metingen de variaties in achtergrondstraling waarschijnlijk weinig rol spelen.

Het Cinzanomodel is niet publiek beschikbaar. Uit de voorgaande analyse valt ook af te leiden dat het opstellen van een dergelijk model een zeer complex en arbeidsintensief werk geweest is dat ver buiten de mogelijkheden van dit onderzoeksproject ligt. De nieuwe voorgestelde opties voor de opvolging van hemelluminantie worden in de volgende paragraaf besproken.

2.3 Opties voor een hemelluminantie-opvolgingsmethode

Een nieuwe meetmethode is nodig om de beleidsdoelstellingen over hemelluminantie op te volgen (zie ook 2.2). Een traditionele methode op basis van bevolkingsdichtheid is niet geschikt als instrument voor beleidsopvolging aangezien er geen mogelijkheden zijn om de effecten van beleidsmaatregelen na te gaan.

Om aan de geformuleerde doelstelling voor beleidsopvolging te kunnen beantwoorden worden in deze studie de volgende nieuwe opties verder onderzocht en geëvalueerd:

- Het gebruik van grondmetingen van hemelluminantie al dan niet met een fijn grid.
- Een tussenoplossing door een combinatie van grondmetingen met de bestaande kaarten van Cinzano.
- Het gebruik van nieuwe satellietbeelden in combinatie met de bestaande kaarten.

Van deze opties werd de nauwkeurigheid, de kost en de informatie-inhoud afgewogen. Eén van de drie opties werd vervolgens verder onderzocht in deze studie.

2.3.1 Het gebruik van grondmetingen van hemelluminantie al dan niet met een fijn grid

De meest voor de hand liggende methode is het rechtstreeks meten van de hemelluminantie, hiervoor kunnen een aantal meettoestellen gebruikt worden die vanaf de grond de luminantie van de hemel meten. Deze meettoestellen worden afzonderlijk besproken (3.1).

Het is een rechtstreekse methode en dus zijn de meetfouten in principe laag per meting. Om een representatief aantal metingen te bekomen om de toestand in Vlaanderen te karakteriseren die ook een trendopvolging over de jaren toelaat kan het volgende afgeleid worden uit de analyse van het model en de resultaten van Cinzano en Falchi:

- De kaarten van Cinzano vertonen geen sterke pieken in de steden (Figuur 2), hieruit werd afgeleid dat het fenomeen redelijk uitgestrekt was en dat voor Vlaanderen een beperkte reeks meetpunten zou volstaan voor een voldoende karakterisatie van de toestand in Vlaanderen. Daarom werd in deze studie gekozen voor een benadering met een donkertegebied en een brongebied per provincie.
- Een aanvullende lichtverspreidingstest kan de uitgebreidheid van dit verschijnsel verifiëren. Voor deze metingen werd een stadsrand gekozen die aansluit op een

donker gebied. Een andere, niet weerhouden mogelijkheid is het meten op zee, landafwaarts van een belangrijke bron.

- Fijn stof heeft een invloed op de hemelluminantie. Daarom werd een herhaalmeting uitgevoerd om een correlatie te maken met metingen van fijn stof in de atmosfeer.
- De metingen dienen vertikaal (zenitaal) te gebeuren.
- Er is telkens één meting nodig voor (20:00-23:00) en na de middernacht (0:30-5:00). Dit zal later een vergelijking met de kaarten van Cinzano toelaten en men kan hiermee het effect van het doven of dimmen van de buitenverlichting nagaan.

2.3.2 Een combinatie van grondmetingen met de bestaande kaarten

Het is visueel aantrekkelijk en biedt voor een breed publiek meer informatie indien er met vergelijkbare hemelluminantiekaarten (Figuur 2) gerapporteerd kan blijven worden, mogelijk in combinatie met optie 2.3.1 voor absolute opvolging.

Voor het opstellen van de hemelluminantiekaarten werd gezocht naar een eenvoudige tweedimensionale extrapolatiemethode op basis van het resultaat dat reeds bekomen werd door Cinzano voor hemelluminantie. De berekende Cinzanokaart sluit dan aan bij de grondmetingen die ook in hemelluminantie gebeuren. Hiervoor dient men dus niet te beschikken over het Cinzamodel dat een omrekening maakt op basis van de opwaartse lichtstroom gemeten vanuit de ruimte. Dit complexe rekenmodel is eigendom van de onderzoeksgroep van Cinzano en werd niet ter beschikking gesteld voor deze studie.

Indien men aanneemt dat de toestand voor middernacht constant is over de jaren heen zijn enkel relatieve metingen nodig vóór en na middernacht en enkel indien men grote afwijkingen vastgesteld wordt moet overwogen worden deze kaart absoluut te corrigeren.

Voor het opstellen van de kaarten werd daarom de volgende extrapolatietechniek onderzocht:

1. Als brongegeven worden de beschikbare hemelluminantiekaarten van Cinzano gebruikt. Een kaart op hoge resolutie is reeds beschikbaar voor Europa (Cinzano (2001a)), met de totale hemelluminantie weergegeven in intervallen van 0,5 V mag/bgsec². De kaarten in % van de natuurlijke hemelluminantie (Figuur 2) zijn te grof en bevatten te weinig informatie, deze zullen daarom niet verder gebruikt worden.
2. Een methode met tweedimensionale correctiemaskers op basis van meetgegevens van de grondmetingen.
3. Het vermenigvuldigen van de correctiemaskers met de originele kaarten.

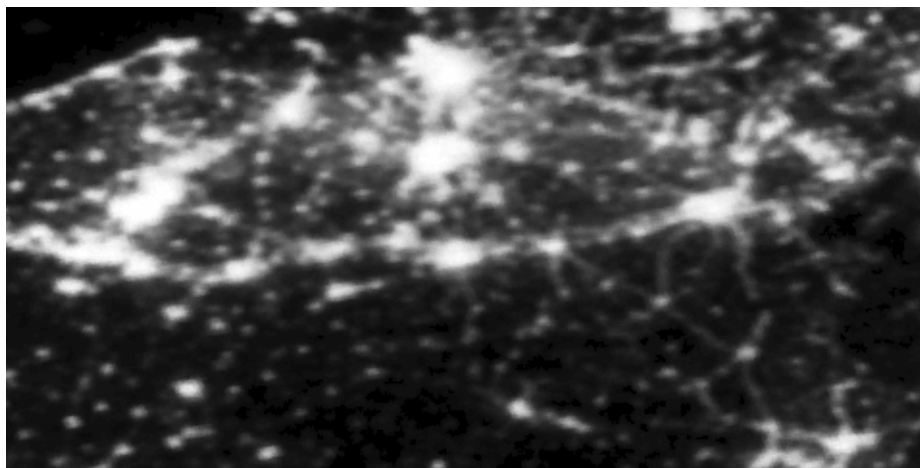
De uiteindelijke methode staat verder in de tekst in meer detail uitgelegd bij de verwerking van de resultaten (zie ook 4).

2.3.3 Het gebruik van nieuwe satellietbeelden in combinatie met de bestaande kaarten

Het gebruik van satellietbeelden heeft als voordeel dat er voor heel Vlaanderen gedetailleerde gegevens beschikbaar zijn. Voor wat betreft hemelluminantie zijn rechtstreekse waarnemingen vanuit de ruimte niet mogelijk, aangezien het licht dat naar de

aarde straalt gemeten moet worden. De satellietbeelden leveren enkel informatie over de oorzaak van lichthinder: de lichtbronnen op aarde.

Beelden van het DMSP Operational Linescan System (OLS) zijn vrij beschikbaar via internet (<http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/>). Jaargemiddelde wolkenvrije beelden zijn slechts beschikbaar tot het jaar 2003. Door het Along-Scan Gain Control (ASGC) systeem wordt de belichting aangepast voor optimale meteorologische informatie. Hierdoor is het signaal in brongebieden (stedelijke gebieden) echter verzadigd, waardoor men voor deze gebieden enkel weet dat ze zich boven een bepaald lichtniveau bevinden (zie de witte vlekken op Figuur 4). Voor het opstellen van de kaarten van Cinzano werd op speciaal verzoek gedurende een aantal dagen een manuele belichting ingesteld om ook betrouwbare informatie in deze gebieden te verzamelen (Cinzano (2000b)). Tot op vandaag zijn er dus geen recente en betrouwbare satellietbeelden van de lichtbronnen in Vlaanderen beschikbaar.



Figuur 4 Jaargemiddelde wolkenvrije beelden van de stabiele lichtbronnen in het zichtbaar spectrum (2003, satelliet F15) (Image and data processing by NOAA's National Geophysical Data Center. - DMSP data collected by US Air Force Weather Agency.)

Indien men wel over bruikbare satellietbeelden zou beschikken moeten de gegevens over de lichtbronnen nog omgezet worden naar gegevens over hemelluminantie. Het model dat Cinzano hiervoor gebruikt is echter niet vrij beschikbaar (Cinzano (2000b)). Ook is de stofinhoud van de atmosfeer niet exact gekend, waardoor er steeds een onzekerheid over de brongegevens en de resultaten van het model bestaat. De satellietbeelden leveren geen informatie over het lichtstralingspatroon van de bron, vooral niet over de bijna horizontale lichtuitstraling. Hierover moeten dus ook aannames gemaakt worden (zie 2.1) wat ook tot onbetrouwbare resultaten leidt.

Een eenvoudige alternatieve methode is de opwaartse lichtstroom voor enkele referentiepunten of -gebieden te gebruiken voor het actualiseren van de kaart van Cinzano. Het effect van het doven van de verlichting na middernacht wordt hiermee niet in rekening gebracht. Grondmetingen vóór en na middernacht blijven nodig voor de evaluatie van de hemelluminantie na middernacht.

Aangezien net over de brongebieden geen bruikbare gegevens beschikbaar zijn is het erg twijfelachtig of deze methode tot betrouwbare resultaten kan leiden. Samen met het niet beschikbaar zijn van recente beelden werd daarom beslist deze optie niet verder uit te werken (zie ook Tabel 2).

2.3.4 Vergelijking van de nieuwe opties en de keuzes voor het vervolg van het onderzoek

Tabel 2 Afwegingstabel voor de verschillende opties voor een opvolgingsmethode van de hemelluminantie, Bron: VITO

	investeringskost	meetkost	nauwkeurigheid	Informatie detail
enkel grondmeting	€	€€	++++	+
combinatie grondmeting + kaart	€	€	+++	++
combinatie satellietmeting + kaart	€€€€€€€...	€	+	+++

In Tabel 2 staat de afwegingstabel voor de verschillende opties voor een opvolgingsmethode van de hemelluminantie. De eerste twee opties worden verder in deze studie onderzocht.

3 METEN VAN HEMELLUMINANTIE

3.1 Beschrijving van de gebruikte luminantiemeters

3.1.1 Luminantiemeter LMT L 1009

De LMT L1009 (Figuur 5) is een van de meest hoogwaardige luminantiemeters, een belangrijk kenmerk is dat dit toestel zeer lage luminanties kan meten en de fabrikant een kalibratiecertificaat kan leveren bij dit toestel. Deze meter heeft een hoge gevoeligheid én een kleine openingshoek. Dit laat toe om ook op moeilijke plaatsen (geen ongehinderd zicht op de hemel) of bij sporadische bewolking metingen uit te voeren. Het toestel is vrij duur. VITO beschikt over één LMT-meter, die gebruikt is ter kalibratie van de andere sensoren.

De belangrijkste eigenschappen zijn:

- beeldhoek instelbaar op 3°, 1°, 20', 6'
- meetbereik: 0,0001 cd/m² (laatste cijfer) tot 19 990 000 cd/m²
- meetafstand ongeveer 0,50 m tot oneindig
- sensor met Si-fotoelement, nauwkeurige V(λ)-benadering
- 3½-cijfer display in het beeld en op de behuizing, display hold schakelaar
- schaalbereik automatisch of manueel, analoge uitvoer, V.24-(RS 232-) Interface
- ingebouwde herlaadbare NiCd-batterij, automatische batterijlader
- afzonderlijke AC adapter 230 V, 50-60 Hz, handgreep, draagkoffer
- kalibratie volgens PTB norm, met LMT kalibratie-certificaat
- individueel testrapport voor V(λ)-benadering



Figuur 5 De LMT luminantiemeter Bron: LMT LICHTMESSTECHNIK GMBH BERLIN

3.1.2 De SQM sky quality meter

De sky quality meter is een specifiek toestel voor het meten van de hemelluminantie. De kostprijs is zeer laag. De uitlezing is direct in specifieke intensiteit. Dit toestel werd initieel aangekocht maar een belangrijk nadeel voor de voorziene meetcampagne was de gevoeligheid voor zijdelings strooilicht. Hierdoor kan het niet in steden of de nabijheid van een lichtbron gebruikt worden. Het toestel beschikt ook niet over een uitgang voor aansluiting van een datalogger of modem. De datacollectie dient dus manueel te gebeuren. In de juiste omstandigheden kan het toestel wel zeer laag meten. Uiteindelijk werd beslist om met dezelfde technologie een nieuwe sensor te bouwen. De SQM werd nagemeten en deze bevestigden de goede gevoeligheid van het toestel (Cinzano (2005)). De spectrale gevoeligheid blijkt niet exact overeen te stemmen met de CIE V(λ) curve voor fotopisch

zicht maar de fouten voor verschillende lamptypes bij fotopisch zicht zijn klein (Tabel 3). Men spreekt van fotopisch zicht bij hoge luminanties (domineert $>3 \text{ Cd/m}^2$) en scotopisch zicht bij lage luminanties (domineert $< 3 \text{ Cd/m}^2$). Voor het waarnemen van sterren met het blote oog is dus in feite scotopisch zicht belangrijk, maar deze meettoestellen zijn niet courant verkrijgbaar. Bovendien is de te verwachten afwijking klein (Tabel 2) en is de relatieve toe- of afname belangrijker dan de absolute waarde. Voor de astronomische V-band waarin de kaarten gepubliceerd zijn werden ook spectrale afwijkingen gevonden (Tabel 4).

Tabel 3 Correctiefactoren voor spectrale afwijking in fotometrische grootheden bij verschillende lichtbronnen voor de SQM of de TSL237S sensor (Bron: Cinzano (2005))

lichtbron	Correctie voor CIE $V(\lambda)$ kurve (fotopisch zicht)		Correctie voor CIE $V(\lambda')$ -kurve (scotopisch zicht)	
	zonder correctiefilter	met correctiefilter	zonder correctiefilter	met correctiefilter
Hogedruk-Natrium straatlamp	0,78	1,01	1,7	1
neutraal wit licht	1	1	1	1
natuurlijke hemel (nacht)	0,96	1,05	0,79	1,02
typische kunstmatige hemel (nacht)	0,85	1,02	1,37	1,02

Tabel 4 Correctiefactor (magnitudes per vierkante boogsecond) voor spectrale afwijking in astronomische grootheden bij verschillende lichtbronnen voor de SQM of de TSL237S sensor (Bron: Cinzano (2005))

lichtbron	Correctie voor V-band	
	zonder correctiefilter	met correctiefilter
Hogedruk-Natrium straatlamp	+0,59	-0,05
neutraal wit licht	+0,48	+0,04
natuurlijke hemel (nacht)	+0,54	+0,02
typische kunstmatige hemel (nacht)	+0,56	-0,02



Figuur 6 De SQM sky quality meter, Bron: unihedron

Bemerkt dat er voor de astronomie ook digitale camera's op de markt zijn voor lage luminantieopnames waarmee gelijkaardige metingen zouden kunnen worden uitgevoerd, maar deze zijn veel duurder en beelden van de sterrenhemel zijn niet nodig voor het bepalen van hemelglod.

3.1.3 De TAOS TSL237S– lichtsensor



Figuur 7 TAOS TSL237S-lichtsensor, Bron: Texas Advanced Optoelectronic Solutions

De SQM (3.1.2) werd gebouwd op basis van de TAOS TSL237-sensor van Texas Advanced Optical Solutions. De TSL237 licht-frequentie-omzetter combineert een Silicium-fotodiode en een stroomfrequentie omzetter op één enkel component. De uitvoer is een blokgolf met een frequentie die lineair evenredig is met de lichtintensiteit. Deze sensor kan gemakkelijk geïntegreerd worden met een microcontroller of in andere digitale schakelingen. De TSL237 is temperatuurgecompenseerd voor het ultraviolet tot zichtbaar bereik van 320 nm tot 700 nm en reageert in een bandbreedte tussen 320 nm en 1050 nm. Het apparaat is ontworpen om te werken tussen -25 en 70°C en wordt aangeboden in een 3-contact heldere plastic behuizing met een geïntegreerde lens.

Eigenschappen:

- Hoge-resolutie omzetten van lichtintensiteit naar frequentie zonder externe onderdelen
- hoge stralingsgevoeligheid
- lage thermische ruis
- eenvoudige voeding
- stabiele 200 ppm/°C temperatuurscoëfficiënt

Deze sensor werd door Cinzano nagemeten, zie 3.1.2.

3.1.4 De VITO-sensor

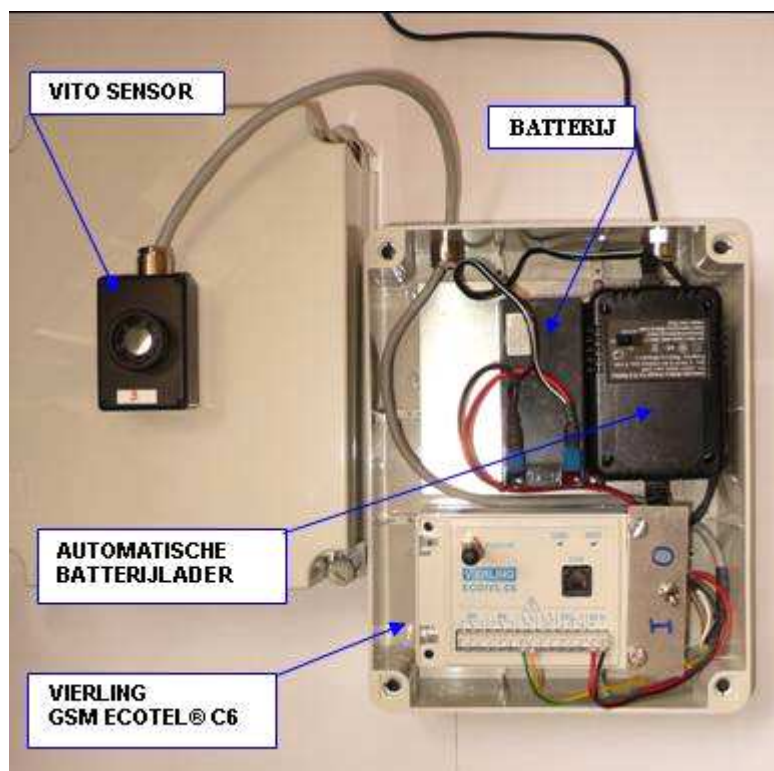
De VITO-sensor (Figuur 8) bestaat uit de hierboven beschreven TSL237-sensor, in een waterdichte behuizing die de beeldhoek beperkt tot 80°. Er is een voorziening om een

standaardfilter te monteren waardoor verschillende spectrale gevoeligheden bekomen kunnen worden. Uiteindelijk werden deze filters niet gebruikt omdat ze laat geleverd werden en de meetgevoeligheid bleken te reduceren. In de toekomst zouden de filters kunnen gebruikt worden indien de beeldhoek gemaximaliseerd wordt tot 80°. De sensor kan tegen een lage kost geproduceerd worden en laat toe om metingen uit te voeren op minstens eenzelfde afstand van de aanwezige obstakels (bv. huizen) als de hoogte van deze obstakels. In niet-stedelijke omgeving kan praktisch overal een locatie gevonden worden die aan deze vereisten voldoet. In stedelijke omgeving moet een open ruimte (pleinen, parken, woonwijken aan de rand van de stad) gezocht worden, of een meetlocatie op een dak van een gebouw.

De frequentie-uitlezing kan manueel gebeuren met een pulsenteller of een eenvoudige multimeter, of automatisch en op afstand per SMS met een GSM-meetmodule.



Figuur 8 De VITO-sensor



Figuur 9 De VITO-sensor met GSM modem

De VITO-sensor kan aangesloten worden op een GSM modem voorzien van een pulsteller. Hiervoor werd een ECOTEL® C6 modem gebruikt. Telkens men een SMS stuurt krijgt men een antwoord met de tellerstand, hieruit kan men dan de frequentie afleiden indien men ook de tijd tussen twee metingen in rekening brengt. Dit toestel bleek goed te werken, maar wanneer in een tweede fase drie extra toestellen besteld werden bleek de fabrikant gestopt te zijn met de productie. Gelukkig zijn er verschillende fabrikanten die een gelijkaardig toestel ontwikkeld hebben waardoor deze methode in de toekomst gebruikt kan worden. De drie extra bestelde toestellen werden echter niet op tijd geleverd voor deze studie. Hierdoor diende een groot deel van de metingen manueel te gebeuren.

3.1.5 Afweging van voor- en nadelen van verschillende meetmethodes

In tabel 2 zijn de verschillende mogelijke meetmethodes samengevat. Er is gekozen voor de VITO-sensoren met GSM modem, omdat die een redelijke investeringskost combineren met een matige meetkost en voldoende meetnauwkeurigheid.

Tabel 5 Afwegingstabel voor de verschillende meetmethodes, Bron: VITO

	investeringskost	meetkost	nauwkeurigheid	gegevens na middernacht
LMT	€€€	€€€	++++	ja
VITO-sensoren manueel	€	€€€	+++	ja
VITO-sensoren GSM modem	€€	€	+++	ja
SQM meter	€	€€€	+	ja
Satellietmetingen	€€€€€€€€...	€	+	nee

3.2 Omschrijving van de meetcampagne

De meetcampagne bestaat uit drie onderdelen (voor motivatie zie 2.3.1):

- 10 puntmetingen verspreid over de 5 Vlaamse provincies: 5 metingen in zogenaamde potentiële donkertegebieden in Vlaanderen (bv. natuurgebieden) en 5 metingen in belangrijke brongebieden (bv. stad Antwerpen en haven), telkens tussen 21:00 en 22:00 en tussen 01:00 en 02:00. Indien mogelijk (weersomstandigheden) wordt op elke locatie op twee verschillende dagen gemeten om de betrouwbaarheid te verhogen en de invloed van fijn stof na te gaan.
- lichtverspreidingstest: hierbij worden op regelmatige afstand tussen een brongebied en een donkerder gebied metingen uitgevoerd. Op die manier kan bekeken worden hoe lokaal het effect van lichtvervuiling is en op welke plaatsen de hemelglod gekend moet zijn om een beeld te krijgen van heel Vlaanderen.
- langdurige meetcampagne in Mol die moet toelaten om de metingen te correleren met fijnstofmetingen (meetstation Dessel).

Bij de selectie van het aantal meetpunten werd enerzijds rekening gehouden met het budget en anderzijds werd er voor gekozen om alle type metingen uit te voeren met inbegrip van een zo ruim mogelijk gebied in Vlaanderen.

Bijkomend wordt een kalibratiemeting uitgevoerd waarbij alle sensoren gelijktijdig gemeten worden om onderlinge verschillen tussen de sensoren op te sporen.

De drie onderdelen van de meetcampagne, in combinatie met de bestaande kaarten van Cinzano, laten toe om een vereenvoudigd model op te stellen, zie 4.

3.2.1 Criteria voor de selectie van de meettijdstippen

De metingen worden uitgevoerd in afwezigheid van maan- en zonlicht en zonder bewolking, zodat er geen storing is van de (ondergaande) zon of maan en van de reflectie van strooilicht op de wolken. Vooral de winterperiode is geschikt, vanwege de vroege zonsondergang.

De hemelluminantie, veroorzaakt door reflectie van het maanlicht, is veel groter dan de natuurlijke hemelluminantie (zie ook 3.3.3). Deze extra luminantie is variabel gedurende de nacht en afhankelijk van de fase van de maan en van de stand van de maan aan de hemel. De metingen worden dus uitgevoerd in afwezigheid van maanlicht, zodat de bijdrage van de kunstmatige hemelgloed rechtstreeks uit de metingen kan afgeleid worden.

De metingen dienen uitgevoerd te worden bij een wolkenvrije hemel, omdat wolken het strooilicht veel sterker reflecteren dan een heldere hemel. Voor amateur-astronomen is de lichtvervuiling bovendien enkel hinderlijk op het moment dat observaties mogelijk zijn: bij heldere hemel.

Aangezien de Cinzanokaarten gebaseerd zijn op satellietbeelden, voor Vlaanderen gemaakt omstreeks 21:30, werd op iedere meetdag een eerste meting uitgevoerd tussen 21:00 en 22:00. De Vlaamse lichthinderdoelstelling geldt voor de periode tussen 0:30 en 5:00. Daarom werd op iedere meetdag een tweede meting uitgevoerd tussen 0:30 en 3:00.

De geschikte meetdagen zijn dus dagen waarop er geen maanlicht is tot ongeveer 3:00. Deze dagen zijn de periodes van nieuwe maan en de dagen die daaraan vooraf gaan. Dit zijn telkens minstens een 7-tal dagen per maand. Binnen deze periode werd uitgekeken naar een wolkenloze nacht voor de metingen.

Op de website van de U.S. Naval Observatory² kunnen de op- en ondergangstijden van de maan opgevraagd worden. In Bijlage A vind je deze tijden voor de omgeving van Brussel.

3.2.2 Criteria voor de selectie van de meetlocaties

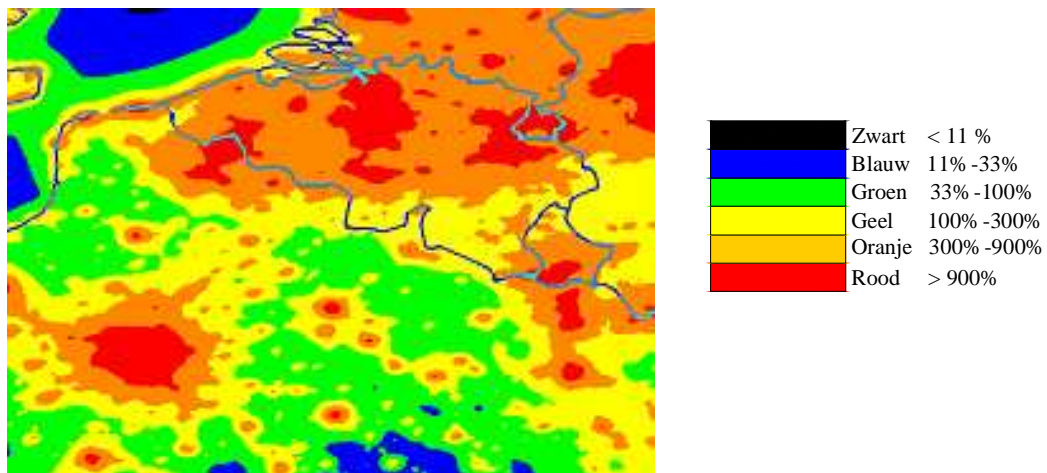
Een algemeen criterium voor een goede meetlocatie is een ongehinderd zicht op de hemel. Binnen een hoek van 40° van het zenit (de beeldhoek van de sensor bedraagt 80°) mogen zich geen lichtbronnen of andere objecten bevinden. Dit is een gevolg van de eigenschappen van de meettoestellen die vroeger in deze studie besproken worden. Daarom is een zekere open ruimte rondom de meetplaats nodig. De geselecteerde gebieden worden gedetailleerd beschreven in bijlage D.

Brongebieden

Omdat de beleidsdoelstelling zich in de eerste plaats richt op de meest lichtvervuilde gebieden, werden 5 locaties geselecteerd in of vlakbij een belangrijk brongebied van lichtvervuiling. Deze gebieden zijn rood ingekleurd op de kaart van Cinzano. In elke

² http://aa.usno.navy.mil/data/docs/RS_OneYear.html

Vlaamse provincie werd één brongebied geselecteerd. Er werd getracht een zekere mate van differentiatie naar type bron aan te houden (stad, industrie, ...)



Figuur 10 kunstmatige hemelluminantie (V-band) als percentage van de natuurlijke hemelluminantie volgens Cinzano, situatie steeds voor middernacht;

Voor volgende bronnen werd een gebied geselecteerd:

- industrie
- autosnelweg
- stedelijke verlichting

Andere praktische criteria waar mee rekening werd gehouden bij het bepalen van de bronnen waren de toegankelijkheid van het gebied (kan/ mag je er meten) en de veiligheid (diefstal materiaal)

Voor Antwerpen werd er gemeten van op Linkeroever, in de nabijheid van de stad en de haven, maar toch een gebied met voldoende open ruimte voor een ongestoorde meting.

Voor Vlaams-Brabant werd de meting uitgevoerd net buiten Leuven, net naast de autostrade E314. In de nabije omgeving bevindt zich het universitair ziekenhuis en het stadscentrum van Leuven bevindt zich op 3 km.

Voor Limburg werd een industrieel brongebied gekozen: het industriegebied van Tessenderlo langs het Albertkanaal.

Voor Oost-Vlaanderen is gekozen om te meten vanaf de openbare weg in een buitenwijk van Gent, omwille van de vlotte toegankelijkheid.

Voor West-Vlaanderen werd gemeten aan de rand van de stad Roeselare, in een KMO zone. Deze meting vormt ook het startpunt van een lichtverspreidingstest.

Donkertegebieden

Naast de metingen in brongebieden werden ook metingen in potentiële donkertegebieden (bv. natuurgebieden) uitgevoerd. Met deze metingen werd getracht het volledige bereik van kunstmatige hemelglod in Vlaanderen te bestrijken door in elke provincie meetplaatsen te selecteren, ter kalibratie van de lichtvervuilingskaart van Cinzano. Indien het effect van het

doven van straatverlichting waargenomen wordt, kan nagegaan worden of dit effect vergelijkbaar is in brongebieden en donkertegebieden.

De website van Natuurpunt (<http://www.natuurpunt.be/>) is een belangrijke bron van informatie voor de selectie. Door de locatie van de natuurgebieden te vergelijken met gewestplan-gegevens (<http://www.agiv.be/gis/diensten/geo-vlaanderen/>) en luchtfoto's (Google Earth) werden een aantal gebieden geselecteerd. Er werd hierbij gezocht naar gebieden zonder belangrijke lichtbronnen in de nabije omgeving, indien mogelijk in een gebied van de Cinzanokaarten met een lage kunstmatige hemelluminantie. Daarnaast werd de voorkeur gegeven aan reeds gekende gebieden, zodat de gebieden zeker aan de selectiecriteria voldeden. Indien nodig werden personen uit de streek of contactpersonen voor de natuurgebieden gecontacteerd voor meer informatie over de omgeving en over de toegankelijkheid van het gebied.

Er werd getracht zoveel mogelijk metingen uit te voeren vanaf de openbare weg. Op die manier kunnen een groot aantal meetpunten in een minimale tijdsspanne afgewerkt worden. Omdat de openbare weg bijna overal in Vlaanderen verlicht is, moest op de eerste meetdag vaak nog gezocht worden naar onverlichte wegen of naar plaatsen op voldoende afstand van de lantaarnpalen.



Figuur 11 natuurgebieden in Vlaanderen (<http://www.natuurpunt.be/>)

Voor de provincie Antwerpen werd het natuurgebied De Zegge in Geel geselecteerd, eigendom van de Zoo van Antwerpen. In de nabije omgeving is er geen straatverlichting en er kan eenvoudig gemeten worden vanaf de parking. De afstand tot het centrum van Geel bedraagt ongeveer 5 km. Dit punt ligt op 9.45 km van het meetpunt bij Vito.

Voor de provincie Vlaams-Brabant werden de Demerbroeken geselecteerd, een gebied in de Demervallei op het grondgebied van Scherpenheuvel-Zichem en Aarschot. Door de metingen uit te voeren van op een onverlichte zandweg wordt de storende invloed van straatverlichting vermeden.

In de provincie Limburg is de selectie gevallen op het bosgebied de Kattevennen. De metingen werden hier uitgevoerd in een weide aan de rand van het gebied.

Voor de provincie Oost-Vlaanderen werd het Kordaalbos in Nokere uitgekozen. Het is een erg landelijk gebied met schaarse openbare verlichting.

Voor West-Vlaanderen werd het natuurgebied De Blankaart in Woumen gekozen. Dit gebied is gelegen op de overgang naar het – volgens de kaarten van Cinzano – donkerste gebied in Vlaanderen, de Westhoek (Cinzano 2000b).

3.3 Meetresultaten van de verschillende meetcampagnes

Periodes

Voor de maanden februari tot mei 2007 waren de volgende dagen maanvrij:

- 11 tot 18 februari
- 12 tot 19 maart
- 9 tot 17 april

Tijdens deze periodes is gemeten op wolkenvrije dagen voor zover mogelijk en voorspelbaar. Indien mogelijk (weersomstandigheden) werden de meetpunten twee maal herhaald. Afhankelijk van de beschikbaarheid van personeel en de weersomstandigheden werd getracht alle meetpunten op één meetnacht af te handelen. Indien uit het weerbericht bleek dat er voldoende wolkenvrije dagen waren werden metingen in het weekend vermeden.

Bovendien was er tijdens de nacht van 3 op 4 maart 2007 een volledige maansverduistering tussen 23:43 en 0:58 (zie bijlage B). Bij deze gelegenheid organiseerde de Bond Beter Leefmilieu Vlaanderen (BBL) samen met de Werkgroep Lichthinder van de Vereniging voor Sterrenkunde (VVS) en Preventie Lichthinder de twaalfde editie van de Nacht van de Duisternis. De gemeenten werden uitgenodigd om die nacht de openbare verlichting en klemtoonverlichting te doven. Deze nacht werden metingen uitgevoerd om het effect van het doven van de verlichting te evalueren. Op een selectie van de plaatsen waar verlichting gedoofd werd (<http://www.bondbeterleefmilieu.be/nacht/>) is gemeten :

- Hasselt (doven van klemtoonverlichting en straatverlichting)
- Herentals (doven van klemtoonverlichting & straatverlichting & parken en pleinen).

Samenvatting meetlocaties

De volgende locaties werden geselecteerd:

Provincie	Type	Locatie
Antwerpen	Donker	De Zegge
	Bron	Linkeroever
Limburg	Donker	Genk - Kattevennen
	Bron	Tessengerlo - kanaalzone (industrie)
Oost-Vlaanderen	Donker	Nokere - Kordaalbos
	Bron	Gent - woonwijk
Vlaams-Brabant	Donker	Messelbroek
	Bron	Leuven - afrit Gasthuisberg diensten (autosnelweg)
West-Vlaanderen	Donker	Diksmuide - Blankaart
	Bron	Roeselare – stadsrand, KMO zone

Lichtverspreidingstest	Type	Locatie
		Roeselare --> Blankaart

In functie van de behoefte aan bijkomende informatie werden soms extra metingen of locaties toegevoegd. Dit wordt beschreven bij de meetresultaten van de respectievelijke meetcampagnes.

In bijlage D is een gedetailleerde beschrijving van de meetlocaties opgenomen, samen met de locatie op de kaart.

Daarnaast heeft in Mol over een langere periode een meetcampagne plaats gevonden die moest toelaten om de metingen te correleren met fijnstofmetingen (meetstation Dessel).



Figuur 12 Meetopstelling langdurige meting in Mol, Bron: VITO

3.3.1 Testmeting 15 januari 2007

Deze meting werd uitgevoerd om enerzijds de meetprocedure te testen en anderzijds voldoende kalibratiegegevens te verzamelen om de VITO-sensor te ijken.

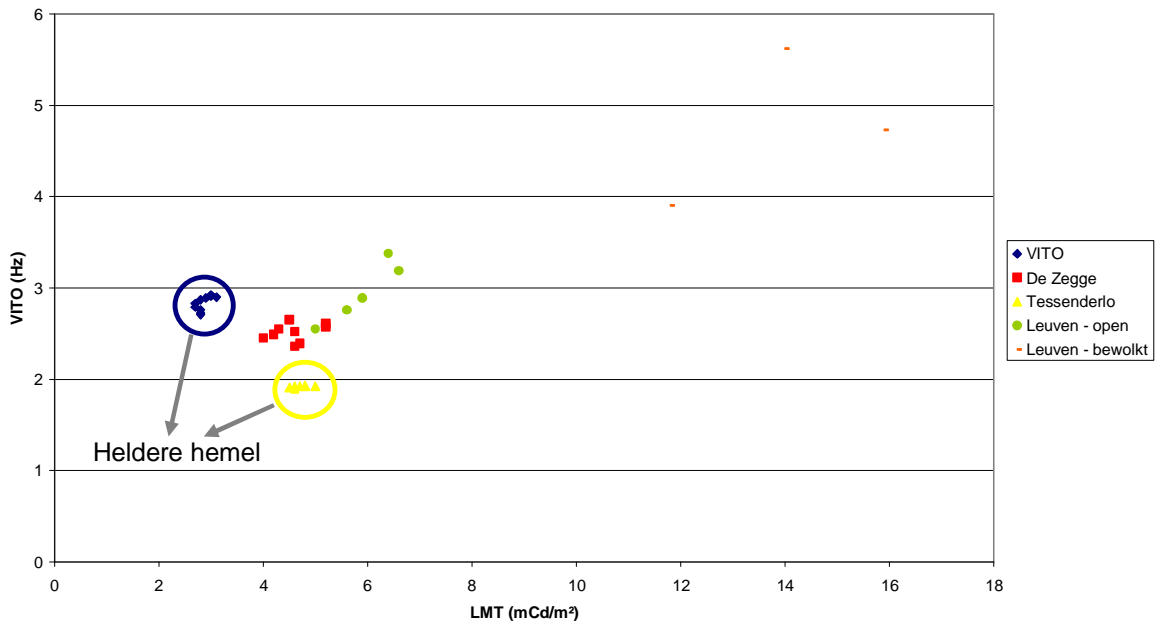
De procedure werd uitgevoerd aan de hand van de checklist (Bijlage C). Aangezien het om een testmeting gaat werd gekozen om slechts een selectie van gemakkelijk van uit Mol bereikbare meetlocaties af te werken. Deze locaties zijn: VITO-domein Mol, De Zegge in Geel, industriegebied in Tessenderlo, de Demerbroeken in Messelbroek en Leuven. Voor elke locatie werd zowel een reeks metingen met de LMT-luminantiemeter als met de VITO-sensor uitgevoerd. Er werd enkel gemeten in Mol, Geel, Tessenderlo en Leuven omdat de aanvankelijk schaarse bewolking toenam naarmate de avond vorderde. De meting na middernacht kon om dezelfde reden ook niet uitgevoerd worden.

Hoewel deze testmeting geen betrouwbare hemelluminantiemetingen heeft opgeleverd, heeft ze wel inzichten gebracht over de werking van de meettoestellen, de praktische haalbaarheid van de metingen en het kalibreren van de meettoestellen.

Opvallend is dat er tussen metingen bij heldere hemel (die wel betrouwbare hadden moeten zijn) geen stijgend lineair verband is (zie Figuur 13). De uitlezing van de VITO-sensor bij de meting op het VITO-domein is duidelijk hoger dan verwacht, vergeleken met de meting in Tessenderlo. Bij controle van de meetlocatie en de geometrie van de sensor bleek dat de

meetopstelling zich te dicht bij een boom bevond. De hoge uitlezing is dus te verklaren door het licht van de buitenverlichting dat op deze boom weerkaatst werd.

Na de meting werd de geometrie van de VITO-sensor nog bijgeschaafd en in de checklist werd extra aandacht gevraagd bij het kiezen van een geschikte locatie. Omdat de VITO-sensoren met deze geometrie niet gekalibreerd werden is de uitlezing in Hz op de grafiek (Figuur 13) weergegeven.



Figuur 13 verband tussen LMT en VITO-sensor (testmeting januari)

3.3.2 Meetsessie februari + lichtverspreiding Roeselare

Tijdens deze sessie werd voor de eerste maal op alle meetlocaties gemeten. Ook de lichtverspreidingstest vanuit Roeselare werd uitgevoerd. Er werd tijdens twee opeenvolgende nachten op dezelfde meetlocaties gemeten. Tijdens de eerste nacht is nog niet op alle plaatsen op de geplande tijdstippen gemeten, omdat er nog wat tijd verloren was gegaan aan het zoeken naar de gepaste meetlocaties. De tweede nacht werd het volledige meetprogramma afgewerkt. Sommige metingen, tijdens beide nachten, bleken onnauwkeurig omwille van lichte bewolking.

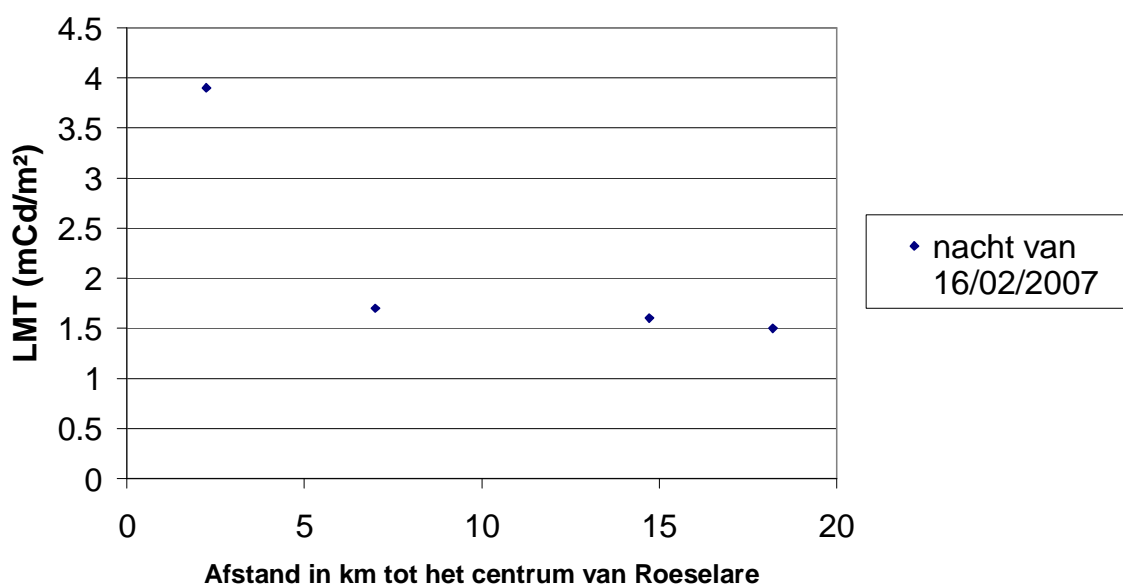
Tabel 6 - uitvoering meetcampagne

Vito sensor	Locatie	kalibratie meting	meting 1			meting 2		
		20:00	21:30 – 22:30			1:00 – 2:30		
1	Mechelen	LMT L 1009						
1	Roeselare	LMT L 1009	X					X
1	Lichtverspreidingstest	LMT L 1009		X			X	
1	Diksmuide - Blankaart	LMT L 1009			X	X		
4	Mechelen	LMT L 1009						
4	Gent		X				X	
4	Nokere			X		X		
3	Mechelen	LMT L 1009						
3	Leuven		X					X
3	Messelbroek			X			X	
3	Genk				X	X		
2	Mechelen	LMT L 1009						
2	Antwerpen		X					X
2	Geel			X			X	
2	Tessenderlo				X	X		

In Tabel 10 in bijlage E zijn de resultaten van deze meetcampagne samengevat, voor meetlocaties zie bijlage D. De resultaten van de verschillende meetsessies worden grafisch samengevat op het einde van dit hoofdstuk.

De bewolgingsgraad geeft aan welke nauwkeurigheid er aan de meting kan toegekend worden (nauwkeurigheid zal wellicht ook van andere zaken afhangen misschien correcter geformuleerd. De nauwkeurigheid van de meting hangt o.a. af van de graad van bewolking. Met de LMT zijn metingen met een lichte bewolking mogelijk, door in een opklaring te meten, waarbij er rekening mee gehouden moet worden dat de wolken de lichtvervuiling van op aarde tegenhouden. Dit verklaart bijvoorbeeld het erg lage meetresultaat in Roeselare. Met de VITO-sensor echter wordt ook de reflectie op de wolken gemeten, waardoor deze sensor juist een extra hoge uitlezing geeft.

Uit de resultaten van de lichtverspreidingstest (zie Figuur 14) blijkt dat er zowel een lokaal effect als een langeafstandsverspreiding van lichtvervuiling waarneembaar is. In en rond steden zijn er sterke pieken, die echter op korte afstand afnemen. In donkere gebieden zijn er slechts geleidelijke veranderingen van de hemelluminantie.



Figuur 14 Lichtverspreidingstest Roeselare, Bron: VITO

Om deze effecten beter te begrijpen werd er nog een tweede lichtverspreidingstest gepland in maart over een korte afstand en met kleinere intervallen.

Enkele goede (wolkenloze) metingen geven reeds een indicatie van het effect van het uitschakelen van de (openbare) verlichting na middernacht, meetdata zie bijlage E en Figuur 17 in paragraaf 3.4.

3.3.3 Meetsessie ‘Nacht van de Duisternis’

De meting in Hasselt leverde geen resultaat op omdat de volledige doving van openbare verlichting, klemtoonverlichting en verlichting van parken en pleinen die op de campagnewebsite aangekondigd werd, niet in het centrum van Hasselt plaatsvond. Gezien de bewolking op veel plaatsen in Vlaanderen waren er geen uitwijkmogelijkheden.

In de omgeving van Herentals werden ook metingen uitgevoerd. De metingen vóór en na de maansverduistering tonen aan hoe sterk de bijdrage van de maan is. De gemeten waarden liggen vele malen hoger dan op een maanloze dag. Het effect van het (gedeeltelijk) uitschakelen van de straatverlichting was niet meetbaar omwille van het beperkt aantal lampen dat gedoofd werd in Herentals.

Tabel 7 geeft de meetresultaten van deze sessie weer. De ijking van de gegevens is gebeurd achteraf, aan de hand van de gegevens uit de kalibratiemetingen beschreven in paragraaf 3.3.7. Alle metingen zijn uitgevoerd met de VITO-sensoren. Tussen 23:43 en 0:58 vond de volledige maansverduistering plaats (zie bijlage B). Voor meetlocaties zie bijlage D.

Tabel 7 - metingen Nacht van de Duisternis

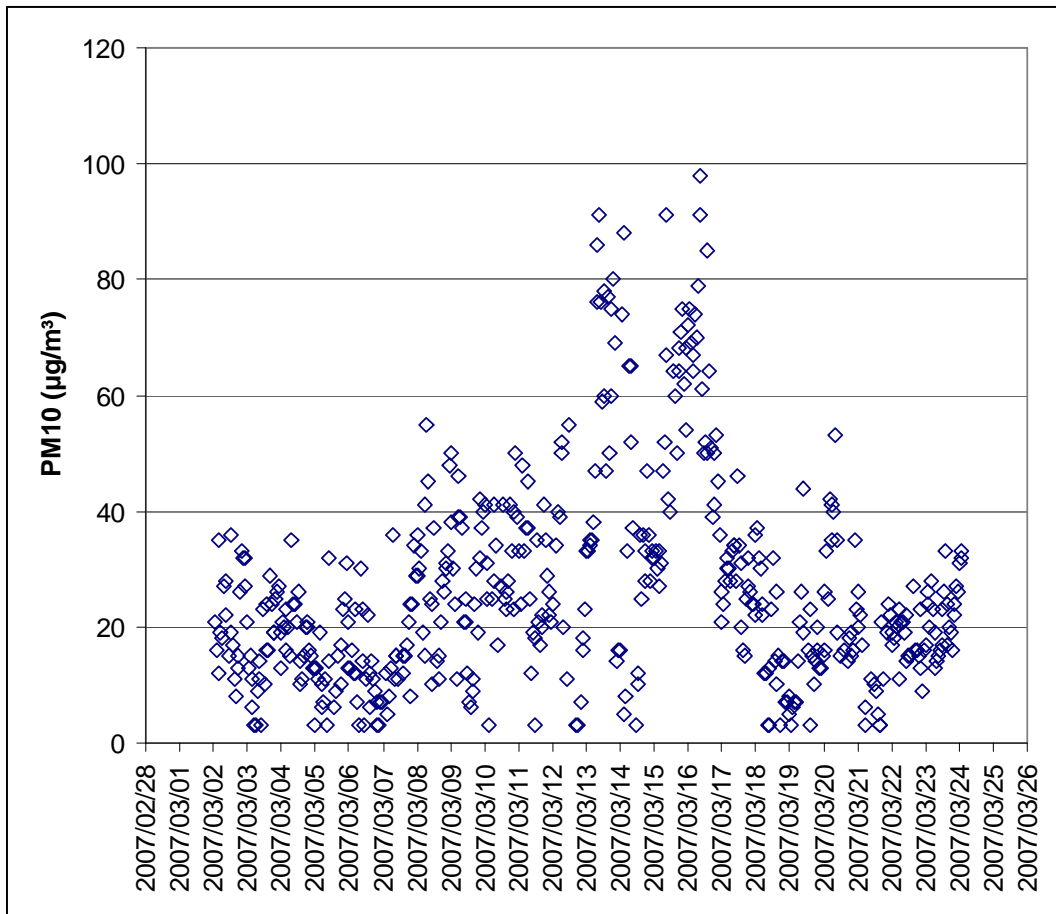
datum	plaats	GPS N	GPS E	tijd	VITO-sensor	Uitlezing (Hz)	Luminantie (mCd/m ²)
3/03/2007	Geelsebaan	51,19611	5,02833	21:49:00	2	6,1	8,0
3/03/2007	Herentals/haven	51,17722	4,85750	22:18:00	2	17,1	22,4
4/03/2007	Hasselt	Kolonel Dussart- plein		0:30:00	4	4,4	5,4
4/03/2007	Herentals/park	51,17806	4,83361	0:30:00	2	2,0	2,6
4/03/2007	Kasterlee/reserv	51,19500	4,91333	1:55:00	2	8,1	10,6

Bron: eigen metingen, VITO

3.3.4 Meetsessie maart + lichtverspreiding Diest

In maart werd gekozen voor een kwalitatieve meetcampagne met een beperkt aantal meetlocaties: er werden op regelmatige tijdstippen metingen uitgevoerd in Mol vanaf de valavond om het effect van het dimmen van straatverlichting te bestuderen en ter kalibratie van de VITO-sensor, en er werd een tweede lichtverspreidingstest uitgevoerd in Diest over een beperkte afstand en met korte intervallen. Die lichtverspreidingstest werd zowel uitgevoerd vóór als na middernacht. Deze campagne heeft toegelaten een aantal fenomenen nog beter te begrijpen. Tijdens de meetsessie van april zijn de ontbrekende metingen en herhalingsmetingen uitgevoerd.

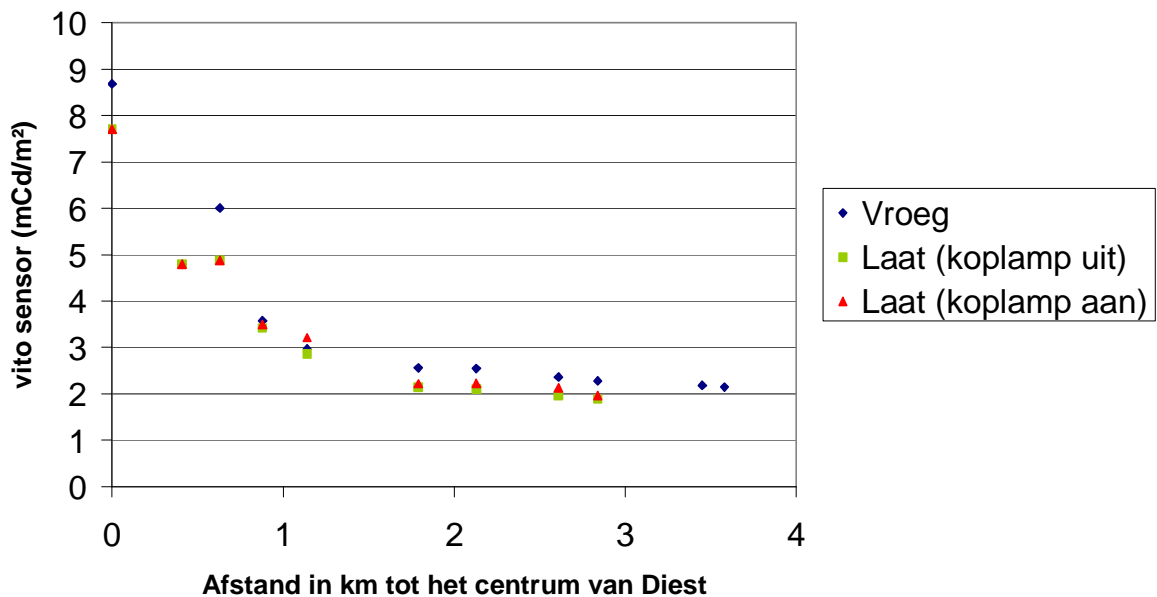
De meetdag viel op de laatste dag van de extra maatregelen tegen de hoge fijnstofconcentraties die door de regering in die periode waren ingesteld. Figuur 15 toont dat de fijnstofconcentratie in die periode hoger dan normaal was. (De metingen in Dessel kunnen ook als representatief voor de omgeving van Diest beschouwd worden, aangezien het allebei om landelijke omgevingen gaat.) Bovendien was er naarmate de avond vorderde nevelvorming merkbaar. Tijdens het uitvoeren van de twee reeks lichtverspreidingsmetingen werd opgemerkt dat de koplampen van de auto invloed hadden op de meetresultaten, terwijl dit bij controles van voorgaande metingen nooit het geval was. Vermoedelijk was dit te wijten aan de erg hoge aerosolgehaltes (daggemiddelde PM10 52,8 µg/m³, maximum 91 µg/m³) in de lucht, waardoor het licht meer verstrooid werd. De checklijst werd aangepast, zodat wanneer de veiligheid het toelaat, de verlichting van de wagen gedooft wordt op het moment van de meting. De lopende metingen werden telkens met en zonder koplamp genoteerd. Voor een omschrijving van de meetlocaties zie bijlage D.



Figuur 15 Fijnstofconcentratie in het meetstation in Dessel, Brongeevens: IRCEL

Lichtverspreidingstest Diest

Figuur 16 toont de resultaten van de lichtverspreidingstest. De metingen werden uitgevoerd met VITO-sensor 5. De 11 meetpunten, op verschillende afstanden van het stadscentrum, werden zodanig gekozen dat ze ongeveer op een rechte lijn liggen. In bijlage D wordt een plattegrond van de meetlocatie weergegeven. Op de grafiek zijn de waarden omgerekend naar mCd/m^2 , aan de hand van de kalibratiemeting, beschreven onder paragraaf 3.3.7.



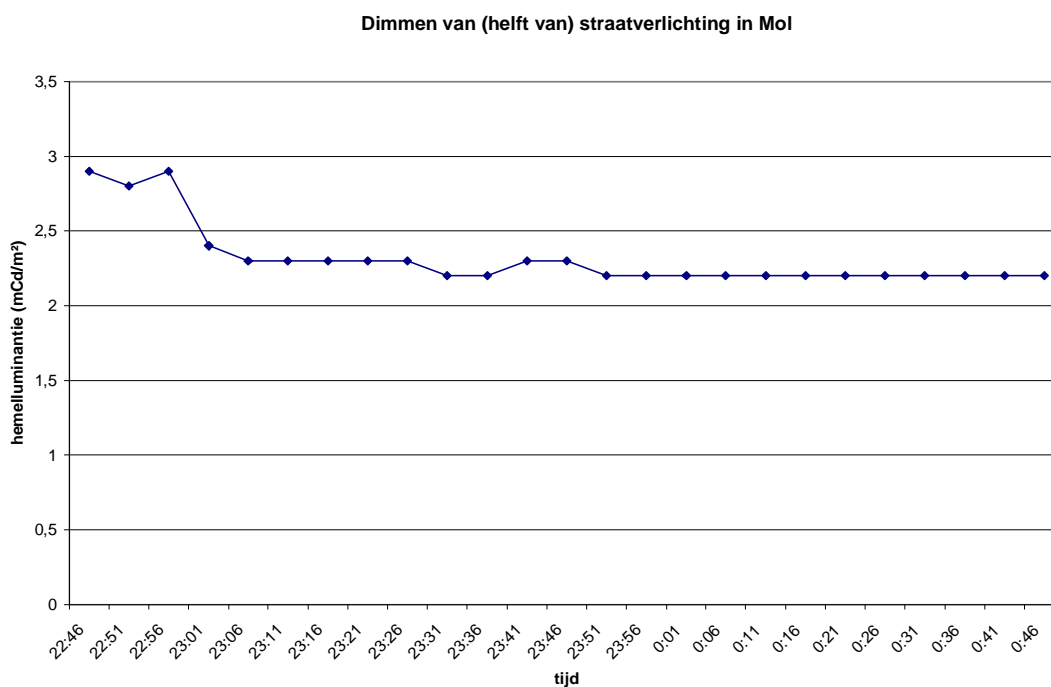
Figuur 16 lichtverspreidingstest Diest, Bron: VITO

Vooraf in het centrum van de stad, waar veel reclameverlichting en uitstralende binnenverlichting aanwezig is, is er een daling te merken na middernacht. Deze daling is ook waarneembaar buiten de stad, maar in mindere mate. De resultaten ondersteunen de veronderstelling dat de lichtvervuiling in de stad (uit winkels, huizen, lichtreclames) een sterk horizontale component bevat, waardoor ze vooral lokaal voor een sterke verhoging van de hemelluminantie zorgt. Met de afstand neemt deze lichtvervuiling sterk af, omdat het licht in de onderste aerosolrijke lagen van de atmosfeer snel verzwakt (kwadratische relatie).

Ook de verlichting op de autostrade werd gedoofd (omstreeks 01:00). De verspreidingstest gebeurde tussen de autostrade en de stad. Gezien het verloop van de lichtvervuiling (richting autostrade is er geen toename) kunnen we stellen dat vooral de stad sterk bijdraagt tot de vervuiling en dat het effect van de autostrade uit deze meting niet naar voren komt.

Metingen vanaf valavond in Mol

Figuur 17 geeft de meetresultaten weer van de periodieke metingen in Mol. Het effect van het uitschakelen (23:00) van (de helft van) de straatverlichting in Mol is hierop duidelijk te zien. Nadien is er slechts een zeer kleine daling, aangezien de meetlocatie op een behoorlijke afstand van stedelijke kernen verwijderd is (3 km van Dessel en 4 km van Mol). De relatief hoge lichtvervuiling werd waarschijnlijk veroorzaakt door het hoge aerosolgehalte in de lucht (zie 3.3.6).



Figuur 17 dimmen van straatverlichting Mol 15/03/2007, Bron: VITO

3.3.5 Meetsessie april

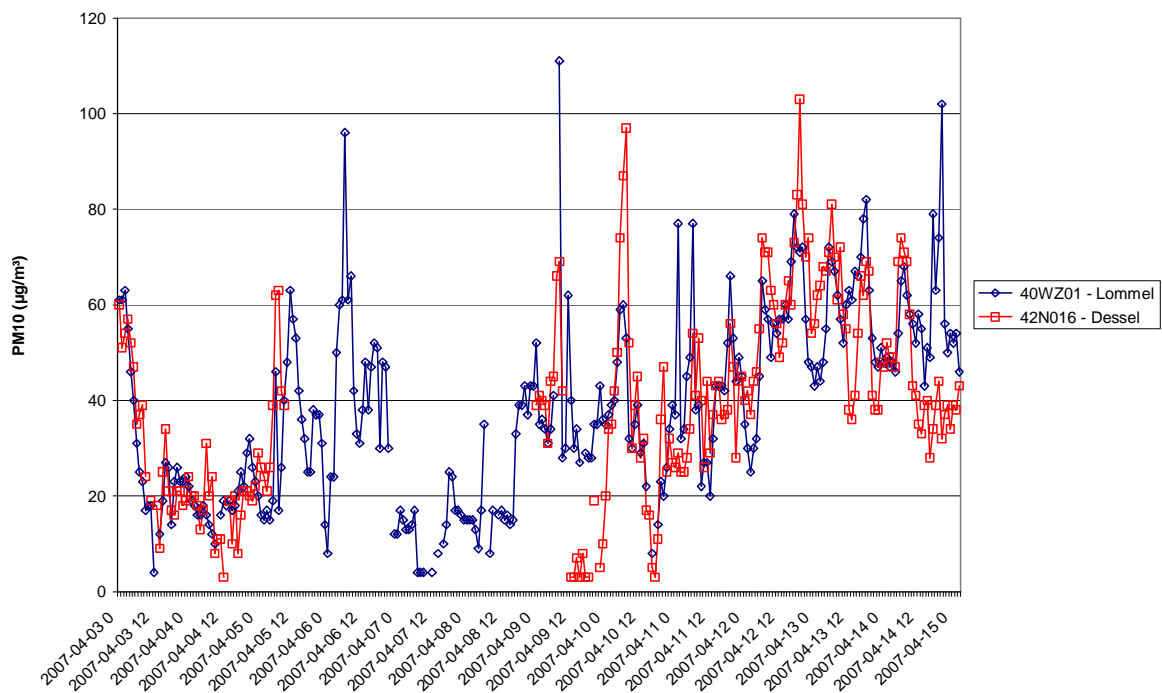
Voor de laatste meetsessie werd gekozen om de metingen te herhalen op plaatsen waar tot dan nog geen betrouwbare metingen uitgevoerd waren omwille van slechte klimatologische omstandigheden. In Gent werd een meting uitgevoerd met de GSM module, die op het dak van het INTEC gebouw (ligging zie bijlage D) werd geplaatst. Omdat de GSM module gedurende lange tijd onbewaakt achtergelaten wordt, is deze locatie veiliger dan de openbare weg. Bovendien is door de hoge ligging een meting mogelijk midden in het stadscentrum, zonder hinder van de omliggende obstakels.

De gedetailleerde meetgegevens zijn opgenomen in bijlage E e). De laatste metingen na middernacht konden niet uitgevoerd worden door de opkomende nevel.

3.3.6 Herhalingsmeetcampagne

In Mol-Vito (ligging zie bijlage D) is de hemelluminantie over een langere periode gemeten (zie bijlage E). Ook voor deze metingen geldt dat enkel maan- en wolkenloze nachten bruikbare metingen opleveren. Doordat de geometrie van de sensor nog regelmatig gewijzigd is was de periode waarin gemeten kon worden beperkt. Uit deze lange periode is een tijdspanne van 4 dagen naar voren gekomen zonder bewolking met sterke variaties in fijn stof, van 6 tot 10 april 2007.

Meetgegevens over PM10 fijn stof concentraties afkomstig van het meetnet van IRCEL-VMM werden opgevraagd via Stijn Janssen (VITO). Het meetstation van Dessel, dat zich vlak bij Mol bevindt had omwille van technische problemen geen metingen verzameld tijdens deze periode. Daarom werden gegevens gebruikt van het iets verder geleden meetstation in Lommel. Figuur 18 toont dat de fijnstofconcentratie in deze twee stations in de periode goed overeenkomt.

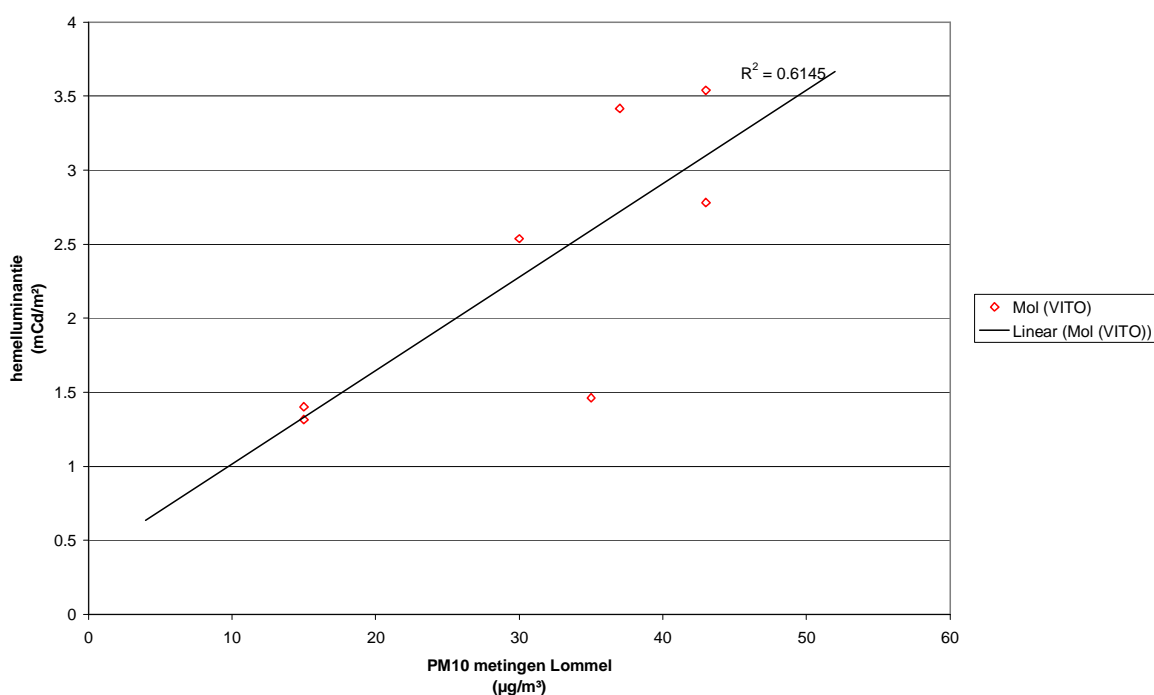


Figuur 18 fijnstofconcentratie in Lommel en Dessel, Bron: Vito

De fijnstofconcentratie werd vervolgens uitgezet tegen de gemeten hemelluminantie in Mol. Volgens Cinzano daalt de hemelluminantie bij stijgende aerosolinhoud, behalve in een klein gebied rond de bron van lichtvervuiling (Cinzano (2000b)). De verzwakking van het licht stijgt immers exponentieel bij verhoogde aerosolconcentratie, terwijl de verstrooiing lineair stijgt. Lokaal is de verzwakking verwaarloosbaar en zal de hemelluminantie dus stijgen. Figuur 19 toont dat er een verband is tussen hoge hemelluminantie en hoge fijnstofconcentratie. Dit is verklaarbaar doordat er in Vlaanderen (en ook op de meetlocatie in Mol) quasi overal een bron van lichtvervuiling in de nabije omgeving te vinden is.

Een wiskundig verband tussen fijnstofconcentratie en kunstmatige hemelluminantie laat toe om de fijnstof- en lichthinderproblematiek onafhankelijk van elkaar te bekijken. Door de hemelluminantiemetingen te herleiden naar standaard fijnstofcondities wordt immers de invloed van de fijnstofconcentratie uitgeschakeld.

Omwille van de niet-lineaire relatie en het beperkt aantal bruikbare metingen is het echter niet mogelijk om een numeriek verband tussen de twee grootheden op te stellen. Verdere studie op basis van een uitgebreidere dataset zijn aan te bevelen.



Figuur 19 verband tussen fijnstofconcentratie en hemelluminantie

3.3.7 Kalibratiemetingen 13/06/2007

De kalibratie van de VITO-sensoren wordt uitgevoerd door nachtelijke metingen te vergelijken met metingen met de LMT-meter. Doordat vanaf valavond gemeten wordt kan de kalibratie over een breed meetbereik uitgevoerd worden. De verschillende sensoren worden individueel gekalibreerd om de nauwkeurigheid van de sensoren te vergelijken.

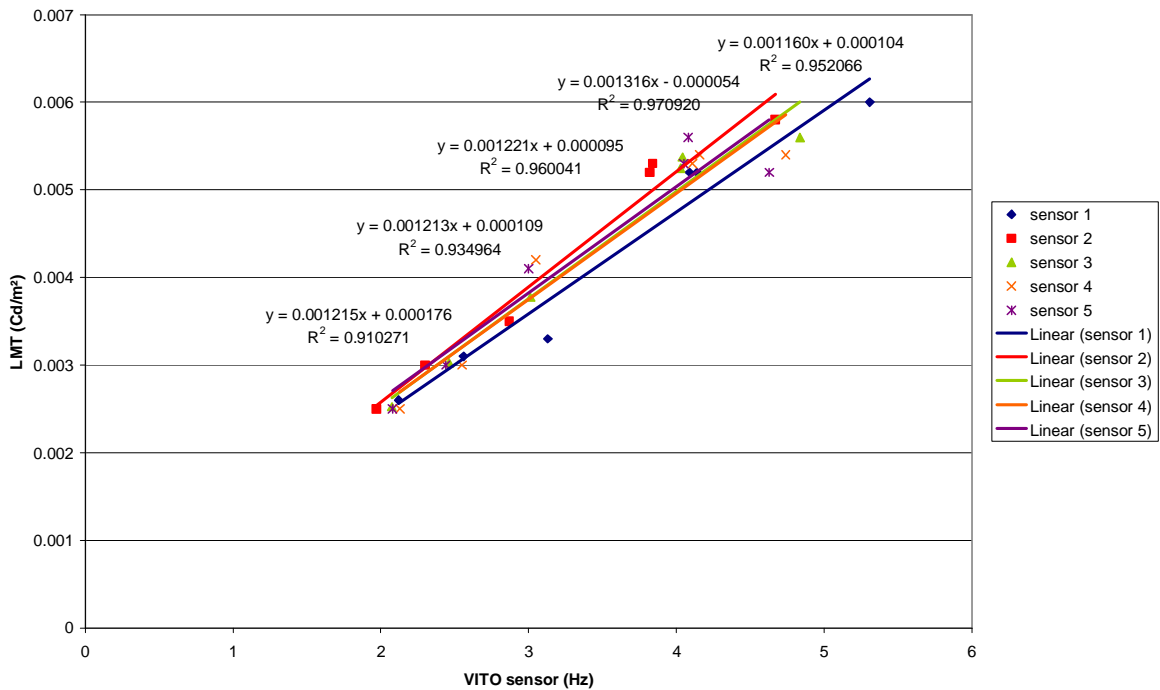
Onderstaande tabel van de gegevens samen op basis waarvan de sensoren gekalibreerd zijn. De metingen zijn uitgevoerd in de nacht van 13 op 14 juni 2007. Omdat sensor 3 door insijpelen van water stukgegaan was vlak vóór het uitvoeren van de kalibratiemeting waren hiervoor geen metingen beschikbaar. Gezien de kleine afwijking tussen de sensoren zijn wij van mening dat het verantwoord is om voor deze sensor het gemiddelde van de andere sensoren te gebruiken.

Tabel 8 - kalibratiemeting VITO-sensoren (VITO sensoren in [Hz], LMT in [Cd/m²])

Tijd	Nr. 1	LMT	Nr. 2	LMT	Nr. 3	LMT	Nr. 4	LMT	Nr. 5	LMT
24:00	5,31	0,006	4,67	0,0058	4,84	0,0056	4,74	0,0054	4,63	0,0052
0:32	4,09	0,0052	3,84	0,0053	4,04	0,0054	4,16	0,0054	4,08	0,0056
1:00	3,13	0,0033	2,87	0,0035	3,01	0,0038	3,05	0,0042	3	0,0041
1:30	2,56	0,0031	2,3	0,003	2,46	0,0030	2,55	0,003	2,44	0,003
2:00	2,12	0,0026	1,97	0,0025	2,08	0,0025	2,13	0,0025	2,08	0,0025
2:30	4,14	0,0052	3,82	0,0052	4,03	0,0053	4,11	0,0053	4,05	0,0053

Bron: VITO

Met een kleinste kwadraten optimalisatie werd door deze gegevens een lineair verband gezocht, zoals weergegeven op Figuur 20.



Figuur 20 kalibratie van de VITO-sensoren

De relatie tussen de VITO uitlezing (x) in Hz en hemelluminantie (y) in mCd/m² is als volgt:

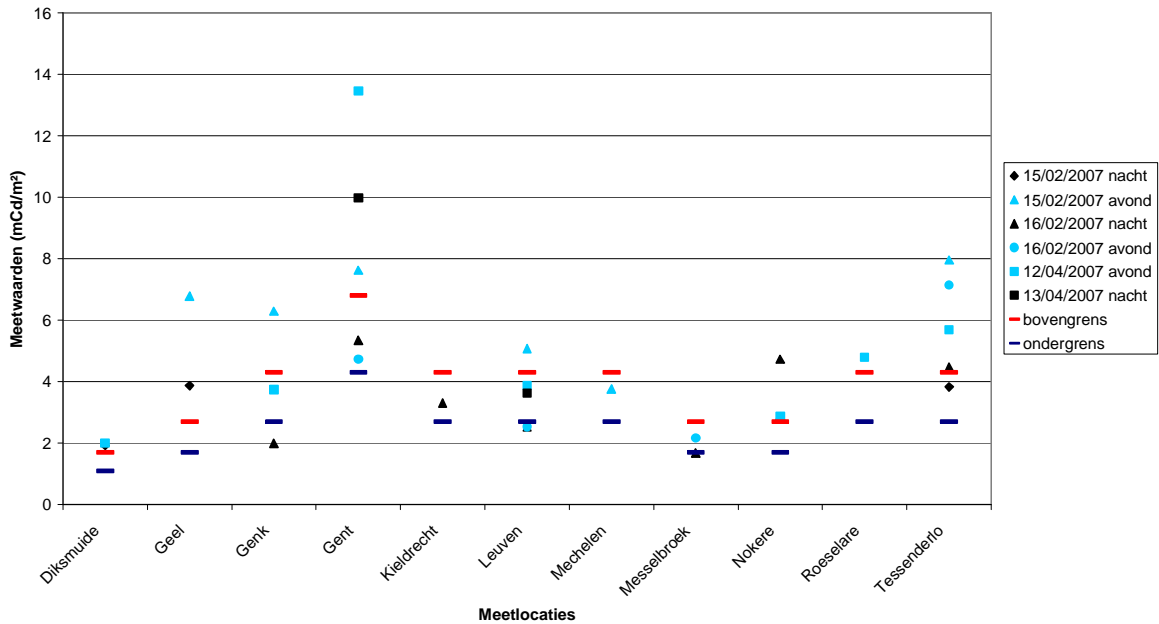
$$y = a x + b$$

Onderstaande tabel geeft de coëfficiënten a en b weer voor de verschillende sensoren:

conversiefactoren $y \text{ [mCd/m}^2\text{]} = ax \text{ [Hz]} + b$		
sensor	a	b
1	1,16	0,104
2	1,316	-0,054
3	1,221	0,095
4	1,213	0,109

Deze conversiefactoren werden gebruikt om de gemeten frequentie van de VITO-sensoren om te zetten in hemelluminantiewaarden.

3.4 Samenvatting van de resultaten van de meetcampagnes



Figuur 21 samenvatting van verzamelde meetgegevens met overeenkomstige onder- en bovengrens zoals afgeleid werd uit bestaande hemelluminantiekaarten van Cinzano en Falchi

De metingen zijn samengevat in Figuur 21 met uitzondering van de lichtverspreidingstest die in Figuur 16 staat. De kaarten bevatten ook de overeenkomstige onder- en bovengrens zoals die afgeleid kon worden uit de bestaande hemelluminantiekaart (Figuur 3) en door gebruik te maken van de omrekenformule in 1. Bemerkt dat er vooral in stedelijk brongebied (Gent) en industriegebied (Tessenderlo) veel hogere hemelluminantiewaarden gemeten werden dan uit de bestaande kaarten afgeleid kon worden. Na middernacht werden er ook algemeen lagere waarden gemeten.

4 METHODE VOOR EXTRAPOLATIE VAN HEMELLUMINANTIEKAARTEN VANUIT GRONDMETINGEN

4.1 Opstellen van methode voor extrapolatie uit grondmetingen aan de hand van Cinzanokaarten

Door de Cinzanokaarten te vergelijken met de verzamelde metingen wordt een geactualiseerde kaart opgesteld. Doordat er zowel metingen vóór als na de middernacht verzameld zijn kan de geactualiseerde kaart ook herleid worden naar een tijdstip na de middernacht. Bij het opstellen van de kaarten kan gefocust worden op bron- ofwel donkere gebieden, om zo de betrouwbaarheid van de resultaten in die respectievelijke gebieden te verhogen. Tenslotte wordt er een methode onderzocht die tracht zowel met bron- als donkere gebieden rekening te houden. In bijlage G bevindt zich de broncode van de onderliggende berekeningen.

4.1.1 Selectie meetgegevens

Uit de verschillende meetcampagnes werden de bruikbare metingen geselecteerd en ingedeeld in 4 groepen: metingen vóór en na de middernacht en metingen in bron- en in donkere gebieden. Metingen met een te hoge bewolgingsgraad (hoger dan 10%) werden verwijderd, merk op dat er geen absolute meting van bewolgingsgraad is en dat dit dus subjectief beoordeeld werd door diegene die de meting uitvoerde. Voor elke meetlocatie werd slechts de laagste meetwaarde weerhouden. Op die manier is er een onrechtstreekse herleiding naar lage fijnstofconcentratie en worden meetfouten omwille van eventuele bewolking verwijderd. De gegevens zijn samengevat in bijlage E a).

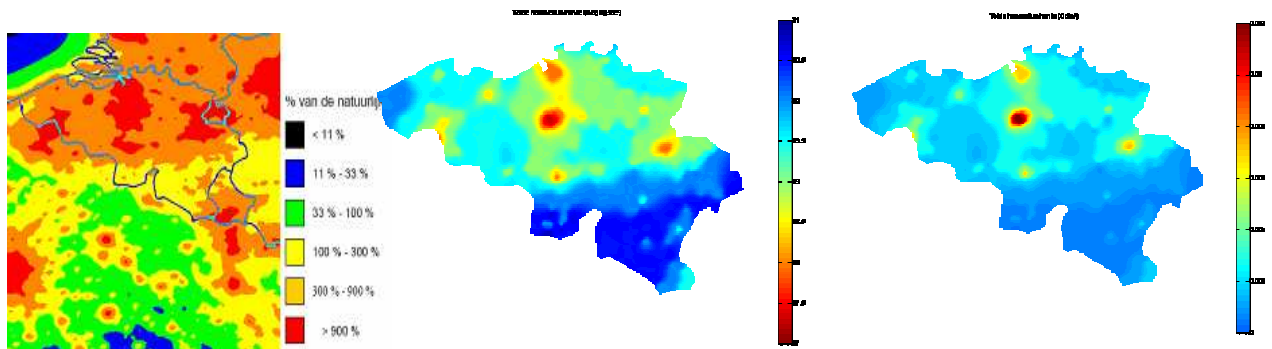
Het aantal bruikbare metingen (zowel geografisch als het aantal herhalingen per meetpunt), en de onzekerheid die zowel op de metingen als op de Cinzano kaarten bestaat³ maken dat het niet zinvol is om de kaart lokaal per regio te herschalen (methode 2.3.1). Een uitmiddeling over de meetpunten zal zorgen voor het verkleinen van de meetfouten. In plaats van lokale schaalfactoren wordt er gewerkt met schaalfactoren voor héél Vlaanderen. Deze methode maakt de veronderstelling dat heel Vlaanderen hetzelfde gedrag vertoont in de tijd, zowel op korte (vóór en na de middernacht) als op lange (jaarlijkse evolutie) termijn.

4.1.2 Inlezen gegevens Cinzanokaarten

Op basis van figuur 3 werden voor België data gereconstrueerd van de totale hemelluminantie. De figuur werd ingelezen en er werd een interpolatie gemaakt tussen de verschillende intervallen op de kaart. Deze interpolatie werd zowel uitgevoerd op basis van de oorspronkelijke gegevens in schijnbare magnitudes (mag/bgsec^2) als in luminantie (Cd/m^2). Doordat de schijnbare magnitude de logaritme is van de hemelluminantie, en doordat beide grootheden op een zelfde lineaire schaal zijn afgebeeld is indeling in kleurgebieden bijgevolg verschillend. De gebieden die groen, geel of oranje ingekleurd zijn op de middelste kaart komen overeen met de rode gebieden op de Cinzano kaart (links op Figuur 22). Via de formule voor omrekening van mCd/m^2 naar mag/bgsec^2 en de waarde

³ Voor de metingen is de atmosfeer een factor die onzekerheden introduceert (nevel, hoge wolken, ...) Cinzano stelt dat in zijn model lokaal afwijkingen van 60% ten opzichte van gemeten hemelluminanties mogelijk zijn. Op grotere schaal zou de foutenmarge 10% bedragen.

voor de natuurlijke hemelluminantie ($21,6 \text{ mag/bgsec}^2$), weergegeven in paragraaf 1 en 2.2, kunnen de verschillende schalen met mekaar vergeleken worden. Het lijkt weinig zinvol om de kaarten met continue schaal (midden en rechts op Figuur 22) terug om te zetten naar een discrete schaal zoals de oorspronkelijke Cinzano kaart, omdat er hierbij informatie verloren gaat. In bijlage G zijn figuren met een alternatieve schaal opgenomen, die iets beter aansluit bij de schaal van Cinzano.



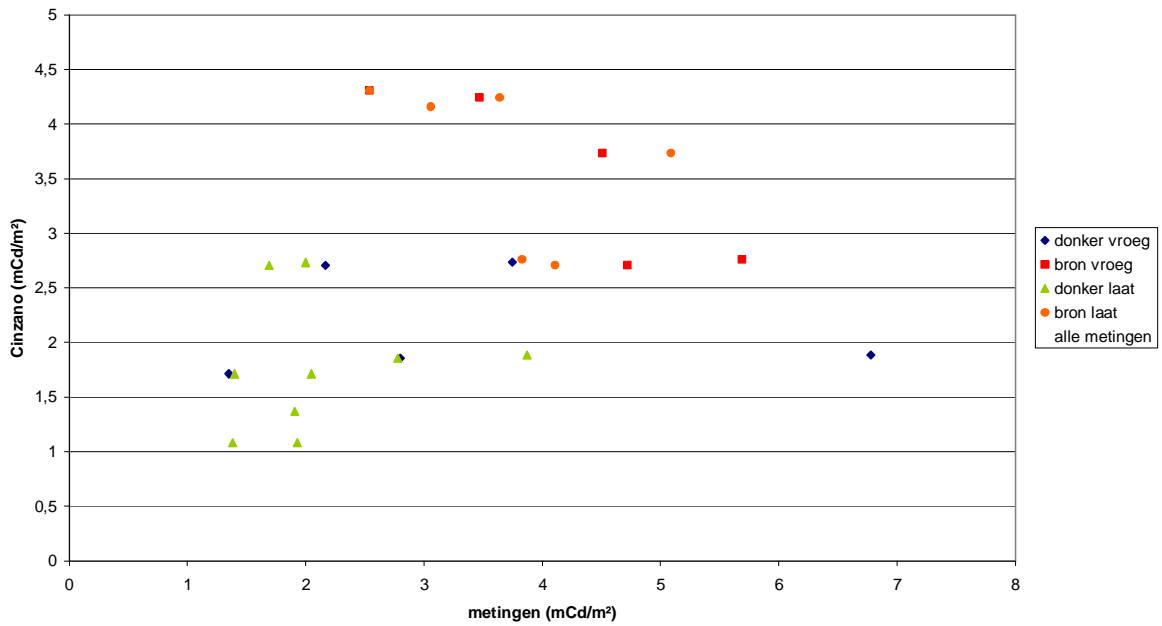
Figuur 22 Totale hemelluminantie volgens Cinzano als percentage van de natuurlijke hemelluminantie (links), geïnterpoleerd in mag/bgsec^2 (midden) en in Cd/m^2 (rechts).

4.1.3 Herschaling op basis van de verzamelde gegevens

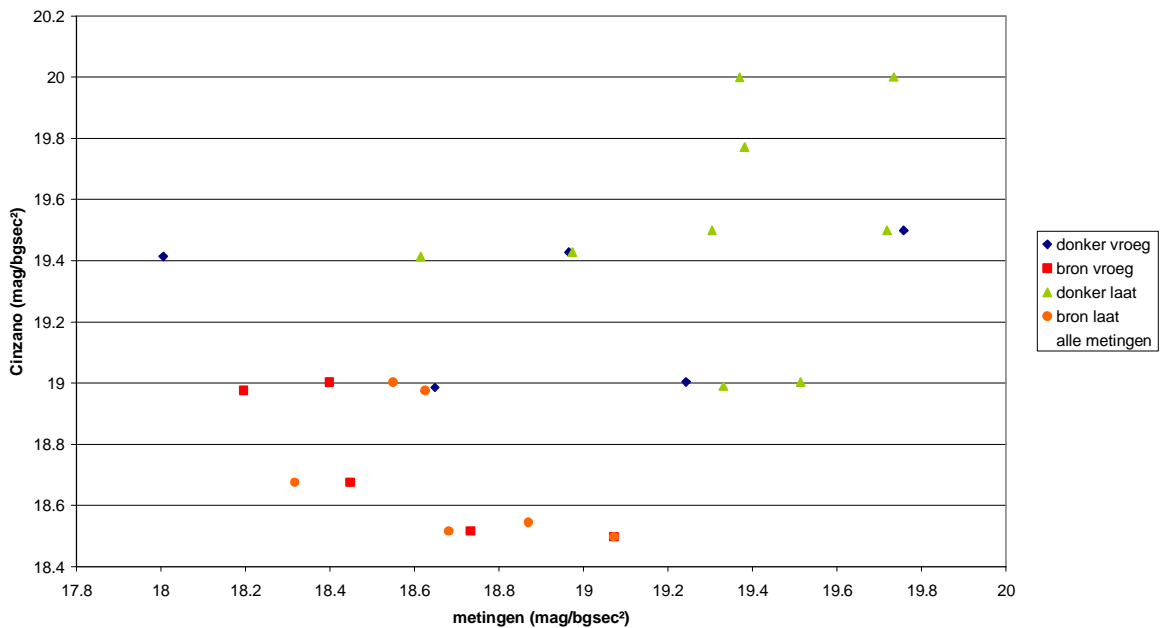
Het model van Cinzano (2000b) werd door hemzelf gevalideerd door een rechte met als vergelijking $y = a + x$ te fitten door de logaritmische modelgegevens (in mag/bgsec^2) en de logaritmische meetgegevens waarover hij kon beschikken. Er is dus een constante opgeteld bij de modelwaarden zodat de kwadratische verschillen tussen meet- en modelwaarden geminimaliseerd werden. Een constante optellen bij de schijnbare magnitudes (mag/bgsec^2) komt overeen met vermenigvuldigen met een constante van de hemelluminantie (Cd/m^2).

Deze methode werd hier ook toegepast en wijkt enigszins af van de oorspronkelijke voorgestelde aanpak. Er wordt dus slechts één correctiefactor gebruikt voor Vlaanderen, omdat het kleine aantal meetpunten niet kan verantwoorden een meer gedetailleerde correctie met een tweedimensioneel correctiemasker uit te voeren. Dit heeft tot gevolg dat indien één bepaalde regio een afwijkende evolutie vertoont ten opzichte van de andere regio's, dit niet op de kaarten zichtbaar is. Enkel de gemiddelde evolutie wordt weergegeven op de kaart.

Op Figuur 23 wordt de correlatie een rechte door de oorsprong met helling 10^a . Op Figuur 24 is de correlatie een rechte met helling 1 die de y-as snijdt in a .



Figuur 23 afwijking tussen metingen en Cinzanokaart (mCd/m²), Bron: VITO



Figuur 24 afwijking tussen metingen en Cinzanokaart (mag/bgsec²), Bron: VITO

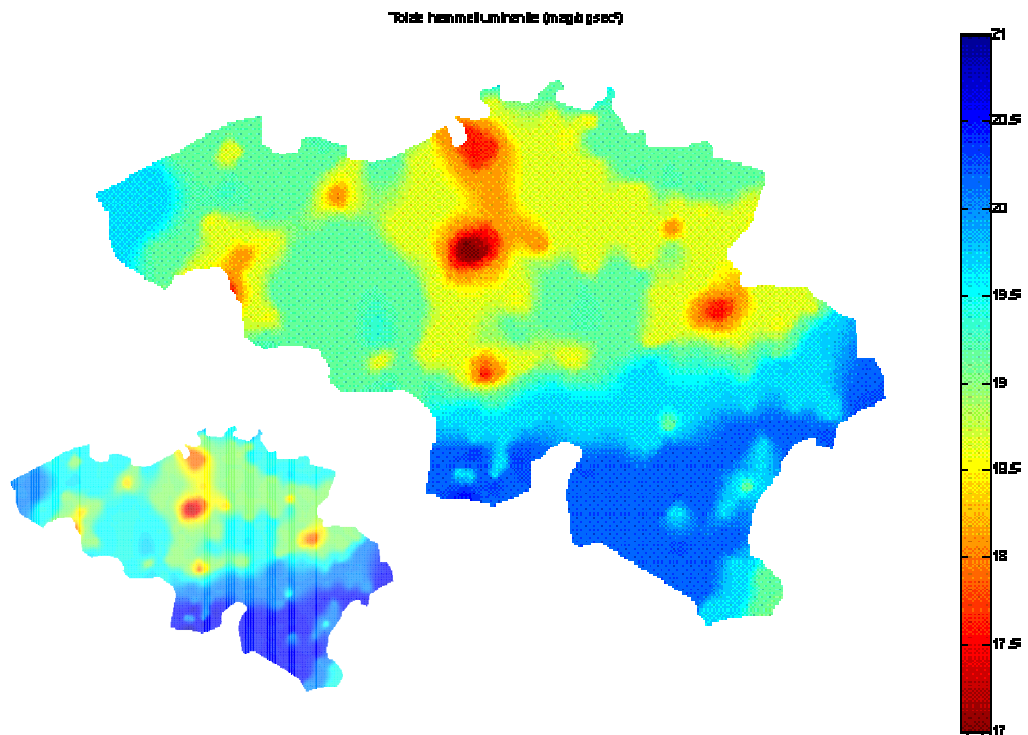
We passen de methode toe op België in zijn geheel alhoewel er enkel metingen gedaan werden in Vlaanderen. Het zuidelijke gedeelte van de kaart is dus mogelijk minder waarheidsgetrouw. We gaan in eerste instantie uit van de meetwaarden in donkere gebieden vóór de middernacht. In deze gebieden zijn immers minder lokale verstoringen en daardoor kan de meting als representatief voor de omgeving beschouwd worden. In brongebieden is er meer risico dat de lokale meting door de nabijheid van lichtbronnen hoger is dan het gemiddelde in de omgeving. In bijlage F worden voor de volledigheid ook de meetwaarden in brongebieden in rekening gebracht.

Door tenslotte de correctiefactor te berekenen op basis van de gegevens na de middernacht (zowel met als zonder gegevens uit brongebieden) kan de extrapolatie gemaakt worden naar de periode na de middernacht.

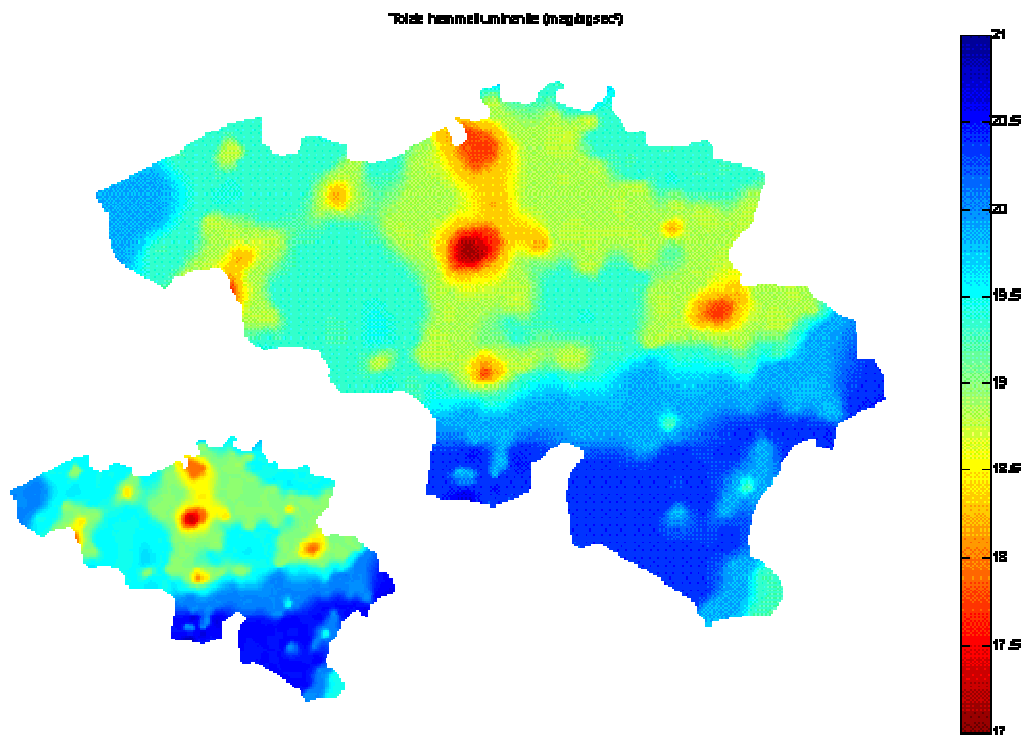
Tabel 9 geeft de resultaten weer van de kleinste kwadraten optimalisatie. Figuur 25 en Figuur 26 geven de aangepaste hemelluminantiekaarten weer, met telkens in het klein de originele gegevens van Cinzano ter vergelijking.

Tabel 9 - schaalfactoren extrapolatie, Bron: VITO

Metingen	correctieterm a $y[\text{Cinzano}] = a + x[\text{meting}]$
donker vroeg	0,342171
donker laat	0,185145



Figuur 25 totale hemelluminantie 2007 vóór middernacht (donkere gebieden-benadering)



Figuur 26 - totale hemelluminantie 2007 voor midernacht (donkere gebieden-benadering)

De metingen vóór middernacht zijn merklijk hoger dan de waarden op de kaart van Cinzano voor de V-band indien de formule gebruikt wordt uit 1. Op de Westhoek na is de blauwe kleur ($> 19,5 \text{ mag/bgsec}^2$) volledig verdwenen uit Vlaanderen. Het verschil (ca $0,3 \text{ mag/bgsec}^2$) is merklijk groter dan de fout die Cinzano vooropstelt voor zijn model ($\pm 0,04 \text{ mag/bgsec}^2$). Eén verklaring zou kunnen zijn dat de lichtvervuiling toegenomen is want de kaarten zijn gebaseerd op satellietbeelden van 1998. Een andere verklaring is dat er een spectrale afwijking is van het licht (kleur) in vergelijking met de aannames voor de kaarten en door de meettoestellen, zie ook 3.1.2, de kaart is voor de V-band terwijl de meettoestellen elk hun eigen spectrale gevoeligheid hebben. Metingen met verschillende kleurfilters konden niet doorgaan omdat de gevoeligheid hierdoor te sterk verminderde, toekomstig onderzoek kan dit verder uitwijzen.

4.2 Formuleren van opvolgbare beleidsdoelstellingen

Dit onderzoek heeft aangetoond dat rechtstreekse grondmetingen van hemelluminantie technisch haalbaar zijn. Enkel werken met satellietbeelden bleek onhaalbaar te zijn in deze studie (zie 2.3.3). Satellietbeelden zouden vooral meer geografische detailinformatie kunnen opleveren, maar de brongegevens en de methode hiervoor zijn niet beschikbaar en vergen nog een aanzienlijke investering. Bovendien lossen satellietbeelden ook het nauwkeurighedsprobleem niet op (zie 2.3.3). Bij grondmetingen daarentegen kan men ook het tijdstip kiezen in functie van de geformuleerde beleidsdoelstelling, bijvoorbeeld na middernacht.

De metingen tonen aan dat vooral in de brongebieden zeer sterke variaties kunnen optreden afhankelijk van de lokale eigenschappen van de verlichting. Indien men de brongebieden dus wenst op te volgen dienen die minstens hiervoor uitgemiddeld te worden over verschillende meetlocaties. Het minimum aantal meetlocaties om een stabiele testreeks voor Vlaanderen op te bouwen kan momenteel niet bepaald worden bij gebrek aan voldoende gegevens over de jaren heen, maar een minimum om statistiek te kunnen toepassen is vijf. Voor het beleid is de toegevoegde waarde hiervan allicht minder relevant omdat lokale variaties een sterke invloed kunnen hebben.

Bovendien kan de bijdrage van belangrijke brongebieden ook gemeten worden in zogenaamde donkere gebieden waar in feite de som gemeten wordt van bronnen tot meer dan 30 km omtrek (zie 2.1).

In de donkere gebieden blijkt de hemelglod weinig door lokale omstandigheden beïnvloed te worden, zie ook 3.3.4. Die donkere gebieden zijn vaak te vinden in of rond natuurgebieden, zie ook 3.2.2. Die locaties laten dus een stabiele opvolging van de toestand toe en kunnen vanuit ecologisch standpunt ook interessant zijn (zie 1), men zou dus 'donkertegebieden' kunnen aanduiden en opvolgen. Bij de keuze van die gebieden dient men rekening te houden met een voldoende afstand van een brongebied, de lichtverspreidingssteden (Figuur 14, Figuur 16) tonen aan dat een afstand van 3 km tot een brongebied (sterke aanwezig verlichting) voldoende is. Hieruit valt ook af te leiden dat 3 km zou kunnen dienen als bufferzone rond een natuurgebied waarvan men de invloed van lokale verlichting wil beperken.

De bufferzone is dan in eerste instantie nuttig om een minimale verstoring door lichthinder van het ecosysteem te verzekeren. Die bewaking en beperking van sterke lokale bronnen in de omgeving is ook belangrijk wanneer men via metingen in deze gebieden de opvolging van de globale toestand van hemelglod in Vlaanderen wil doen. Deze gebieden zouden dan ook de meest geschikte zijn voor astronomische waarnemingen voor zover ze zelf of hun nabije omgeving hiervoor toegankelijk gesteld worden.

Alle metingen worden ook sterk beïnvloed door de hoeveelheid fijn stof in de atmosfeer, zie ook 3.3.6. De hoeveelheid fijn stof in de atmosfeer is sterk weersafhankelijk en dus veranderlijk en soms onvoorspelbaar. Dit houdt in dat de metingen genormaliseerd moeten worden naar een standaard stofinhoud om ze in de tijd vergelijkbaar te maken. Bemerkt dat dit eenvoudig technisch haalbaar is omdat er voor het meten van fijn stof reeds bruikbare meetpunten voorhanden zijn, zie ook 3.3.6.

Het is aan te bevelen om de reproduceerbaarheid van metingen in een gekozen donker gebied in de toekomst nog verder op te volgen aangezien het hier over een in de tijd beperkt onderzoek ging. Eén meetpunt kan hiervoor volstaan, bijvoorbeeld op de Vito locatie (donker gebied).

De hemelluminantie kan uitgedrukt worden voor verschillende spectrale gevoeligheidscurven (banden) uit de verlichtingskunde of de astronomie, zie 1 en 3.1, die dus elk meer of minder gevoelig zijn voor een bepaalde lichtkleur. De rapportering en opvolging kan best gebeuren in eenheden die eenvoudig gemeten kunnen worden, zie 3.1. Aanbevolen is daarom de luminantie uit de verlichtingskunde te gebruiken (CIE $V(\lambda)$ zie ook 1). Mits aanpassing van de meettoestellen kunnen verschillende kleurbanden opgevolgd worden, dit zou extra informatie kunnen leveren over de kleur en de bijhorende bronnen (bv. wegverlichting, reclameverlichting, ..).

De doelstelling zoals die geformuleerd werd in het milieubeleidsplan (2007) *'In 2007 komen geen gebieden meer voor met een kunstmatige hemelluminantie groter dan 9 keer de natuurlijke hemelluminantie tussen 0:30 uur en 5:00 uur: dit is de categorie gebieden waar de kunstmatige hemelglod nu het grootst is'* is niet bereikt en lijkt voor de toekomst

moeilijk haalbaar omdat er lokaal sterke verhogingen kunnen optreden (zie lichtverspreidingstesten in Figuur 14 en Figuur 16). Het is dus aan te bevelen de kwantificeerbare doelstelling in lijn te brengen met de geformuleerde langetermijndoelstelling (2020) 'Verminderen van de hemelluminantie van kunstmatige lichtbronnen, zodat ook in Vlaanderen gebieden tot stand worden gebracht waar de natuurlijke hemelluminantie maximaal hersteld wordt'. Hiervoor kunnen bijvoorbeeld de eerder gesuggereerde donkertegebieden opgevolgd worden, hier werden al waarden gemeten (zie 3.4) van 9 keer de typische natuurlijke hemelluminantie (2.2 mCd/m²). Enkel een ambitieus actieplan over verschillende toepassingen kan dit significant doen dalen.

De hemelluminantie kaarten, zie 4, kunnen vooral gebruikt worden als informatieve ondersteuning bij de rapportering. Bij het gebruik van kaarten dient men rekening te houden met de beperkingen die de gebruikte extrapolatietechniek met zich meebrengt (zie 4.1.3). De kaarten kunnen in combinatie met geografische software gebruikt worden om bv. donkere gebieden op te sporen of de blootstelling aan de bevolking na te gaan.

5 BELANGRIJKSTE CONCLUSIES UIT DEZE STUDIE

Zonder tijdsgebonden meetgegevens (satellietmetingen, grondmetingen, inventarisatie van geïnstalleerde verlichting, ...) is er uiteraard geen opvolging van de toestand in de tijd mogelijk .

Uit deze studie blijkt dat hemelluminantie eenvoudig meetbaar is.

Het gebruik van grondmetingen bleek hierbij de meest aangewezen methode te zijn (zie 3.1.5). Het is ook de enige rechtstreekse opvolg- en meetmethode en hierdoor ook zeer nauwkeurig. Verschillende meetinstrumenten werden uitgetest en uiteindelijk werd in de context van deze studie besloten zelf een meetinstrument te ontwikkelen. Dit meetinstrument kan aangesloten worden op een GSM modem of datalogger.

Het gebruik van enkel satellietmetingen is een onrechtstreekse meetmethode. Er zijn verschillende aanvullende gegevensbewerkingen nodig en uiteindelijk nog steeds de aanvullende grondmetingen voor de kalibratie. De satellietmetingen kunnen aanvullend gebruikt worden met grondmetingen om meer geografisch detail te leveren. Een methode hiervoor is echter nog niet beschikbaar.

In deze studie werd een methode uitgewerkt die op basis van grondmetingen en de originele Cinzanokaarten een geactualiseerde kaart kan maken. Deze kan bijvoorbeeld gebruikt worden als visuele ondersteuning bij de rapportering over de toestand over de jaren heen of de toestand voor en na middernacht.

Er werd een uitgebreide meetcampagne gevoerd, hieruit kon het volgende besloten worden:

- Hemelluminantie kan in brongebieden zoals steden sterk veranderen over een afstand van enkele kilometers.
- Het is ook duidelijk dat niet enkel de wegverlichting bijdraagt tot hemelgloed. Dit is merkbaar door een continue daling van hemelgloed naargelang de avond vordert. Dit kan verklaard worden doordat bijna horizontale lichtbundels meer bijdragen in vergelijking met verticale lichtbundels. Hierdoor kan reclameverlichting, binnenverlichting die buiten treedt door vensters, monumentverlichting en industriële verlichtingsinstallaties een relatief belangrijkere invloed hebben dan dat tot hiertoe vermoed werd op basis van het geïnstalleerd vermogen.
- In belangrijke brongebieden zoals industriezones en steden werd veel meer gemeten dan dat de Cinzano kaarten deden vermoeden. Dit kan verklaard worden door een relatief hogere bijdrage van de niet wegverlichting zoals hierboven uitgelegd werd. In deze gebieden is er ook een de sterke invloed van lokale omstandigheden, bij opvolging over de jaren heen dient hiermee rekening gehouden te worden.
- Het is ook duidelijk dat snelwegverlichting een verwaarloosbare bijdrage levert.
- Er is een duidelijk verband tussen de metingen van fijn stof in de atmosfeer en de hemelluminantie. Men dient hierbij rekening te houden dat de hoeveelheid fijn stof in de atmosfeer sterk kan variëren.
- Het gedeeltelijk doven van de wegverlichting na middernacht kon ook duidelijk gemeten worden.
- Op bijna alle plaatsen werd veel meer gemeten dan dat de kaarten van Cinzano deden vermoeden. Die afwijking kan verklaard worden enerzijds door kleurafwijkingen bij de veronderstellingen en de gevoeligheid hiervoor van de meetoestellen en anderzijds zou er een toename kunnen zijn van 1998, waarbij de kaarten opgesteld werden, versus deze meetcampagne in 2007.

- De maan veroorzaakt nog steeds vele malen meer hemelgloed dan de kunstmatige verlichting.
- Bewolking kan de hemelgloed sterk doen oplopen. In Vlaanderen komen bijna geen wolkenloze nachten voor. Als metingen dienen te gebeuren bij nieuwe maan en wolkenloze hemel is het soms lang wachten op een geschikt meetresultaat, bovendien is deze toestand weinig lang vooraf voorspelbaar.

De doelstelling zoals die geformuleerd werd in het milieubeleidsplan voor 2007 is niet bereikt. Een nieuwe meet- en opvolgmethode werd voorgesteld, zie 4.2.

Deze studie bevat origineel werk dat in de toekomst nog vatbaar is voor verbetering. De nodige meettoestellen kunnen nog uitgebreid worden met kleurfilters indien de gevoeligheid dit toelaat en de dataloggers kunnen nog verbeterd worden. Er is ook nog nood aan meer metingen voor een uitgebreide studie naar de reproduceerbaarheid van de metingen bij verschillende fijnstofconcentraties. Het gebruik van satellietbeelden kan verder onderzocht worden zoals eerder besproken.

6 VERKLARENDE WOORDENLIJST

Affakkelen: het voeren van afvalgassen door een brander waarin een vlam wordt onderhouden, zodat de brandbare bestanddelen verbranden voordat zij in de lucht terechtkomen.

Assimilatieverlichting: verlichting in serres ter bevordering van de plantengroei, wordt zowel 's nachts als overdag toegepast tot vele uren per etmaal.

Boogseconde: hoekmaat, corresponderend met $1/3600$ van een graad. Een volle cirkel (360°) telt dus 1 296 000 boogseconden.

Branduren: het gemiddeld aantal branduren sommeert de producten van de aangeschakelde fractie van het lampenpark in een tijdsblok met de duur van het tijdsblok en vermenigvuldigt dit met het aantal dagen per jaar. Het corrigeert bijgevolg het potentieel aantal branduren voor de uren van doving.

Candela: eenheid van lichtsterkte, die zelf energie is uitgezonden door een zwarte straler op een temperatuur van $1\ 771\ ^\circ\text{C}$, per eenheid van ruimtehoek en per tijdseenheid.

Fotometrie: leer van het meten van de lichtsterkte.

Klemtoonverlichting: verlichting gericht op een bepaald object, vaak een historisch gebouw of monument, om er de aandacht op te vestigen.

Lichthinder: overlast die mens of natuur ondervinden van kunstlicht, hetzij in de vorm van regelrechte verblinding, het zij als versturende factor bij het verrichten van avondlijke en nachtelijke activiteiten, hetzij als bron van onbehagen.

Lichtsterkte = $\text{lm/sr} = \text{cd}$ → in een bepaalde richting

Lichtstroom: hoeveelheid licht uitgestraald in de ruimte door een bron. Eenheid: lumen.

Lichtvervuiling: verhoogde helderheid van de nachtelijke omgeving door kunstlicht.

Luminantie: verhouding van de lichtsterkte van een bron in een bepaalde richting tot hetstralend oppervlak van deze bron in die richting. Luminantie is dus direct gerelateerd met de waargenomen helderheid (eenheid candela/m^2).

Magnitude: astronomische maat voor de helderheid van een bepaalde lichtbron. Het is een logaritmische, negatieve schaal. Indien de magnitude van een object met één eenheid daalt, dan wordt dit voorwerp 2,5 maal helderder. De zon heeft een magnitude van $-26,7$ in de V-band, de heeft ongeveer een magnitude van $-12,5$, terwijl de helderste sterren ongeveer van de nulde magnitude zijn. Wanneer er geen lichtvervuiling is kan men 's nachts met het blote oog net sterren van de zesde magnitude zien.

MINA-plan: Vlaams milieubeleidsplan voor een periode van 5 jaar.

Nadir: Het nadir is in de astronomie het punt dat recht tegenover het zenit staat, het punt recht onder de waarnemer in de richting van de zwaartekracht.

Ruimtehoek: hoeveelheid richtingen. Een maat voor de opening van een (willekeurig gevormde) kegel, te visualiseren als een oppervlak aan de hemel. Ruimtehoeken worden gemeten in steradiaal of ook nog in vierkante graden.

Steradiaal: de ruimtehoek die, wanneer zijn top samenvalt met het middelpunt van een bol, op die bol een oppervlak uitsnijdt gelijk aan die van een vierkant met de straal van de bol als zijde.

Zenit: Het zenit is in de astronomie het punt dat voor de waarnemer in de verticale richting staat tegenover de zwaartekrachtrichting, vertikaal naar boven dus.

7 AFKORTINGENLIJST

VIS: Visible Infrared

IR: Infrarood (infrared)

AMINAL: Administratie Milieu-, Natuur, Land en Waterbeheer

CIE: Commission Internationale de l'Eclairage

DMSP : Defense Meteorological Satellite Program

OLS: Operational Linescan System

SLO: Schriftelijk Leefomgevingsonderzoek

REFERENTIES

- AMINABEL (2004) Schriftelijk Leefomgevingsonderzoek-1 (dossier 03/1361), eindrapport 27 augustus 2004.
- Bertiau F. C. S. J., de Graeve E. S. J., Treanor P. J. S. J. (1973), *Vatican Obs. Publ.*, 1, 4, 159
- Cinzano P., Diaz Castro F.J., (2000a) “The Artificial Sky Luminance And The Emission Angles Of The Upward Light Flux”, *Mem. Soc. Astro. It.*, vol.71, pp. 251-256.
- Cinzano P., Falchi F., Elvidge C. D. en Baugh K. E. (2000b) “The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 318, pp. 641–657
- Cinzano P., Falchi F. en Elvidge C.D. (2001a) “Naked eye star visibility and limiting magnitude mapped from DMSP-OLS satellite data”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 323, pp. 34-46
- Cinzano P., Falchi F. en Elvidge C. D. (2001b) “The first World Atlas of the artificial night sky brightness”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 328, pp. 689–707
- Cinzano P. (2005), “Night Sky Photometry with Sky Quality Meter”, First draft, ISTIL Internal Report n. 9, v.1.4 2005, 2005 ISTIL, Thiene.
- Garstang R.H. (1986) “Model for artificial night-sky illumination”, *Publ. Astr. Soc. Pac.*, 98, 364
- Matilla K., Väisänen P., v. Appen-Schnur G.F.O. (1996) “Sky brightness at the ESO la Silla Observatory”, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 119, pp. 153-170
- Rich P., Longcore T. (2005), "Ecological Consequences of Artificial Night Lighting", Island Press 2005, ISBN: 1-55963-129-5
- MIRA (2005) “Achtergronddocument 2005 – Lichthinder”, zie www.milieurapport.be
- Narisada K. & Schreuder D. (2004) “Light pollution handbook.”, Springer verlag 2004, ISBN 1-4020-2665-X
- Walker M. F. (1973) *PASP*, 85, 508
- Milieubeleidsplan (2003): ' 2003 milieubeleidsplan 2007', Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Verantwoordelijk uitgever, Jean-Pierre Heirman (zie: www.milieubeleidsplan.be)

BIJLAGEN

A. Maan op- en ondergangstijden voor 2007

Location: E004°20', N50°50'

Rise and Set for the Moon for 2007

Astronomical Applications Dept.
U. S. Naval Observatory
Washington, DC 20392-5420

5

Zone: 1h East of Greenwich

Day	Jan.		Feb.		Mar.		Apr.		May		June		July		Aug.		Sept.		Oct.		Nov.		Dec.	
	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set
	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m
01	1414	0709	1632	0823	1536	0651	1812	0551	1932	0433	2204	0405	2214	0447	2134	0759	2041	1123	2024	1325	2304	1427		1321
02	1508	0821	1750	0845	1651	0708	1922	0601	2045	0447	2259	0449	2239	0606	2147	0923	2106	1253	2124	1434		1447	0038	1333
03	1616	0916	1906	0900	1804	0721	2032	0612	2158	0505	2341	0548	2258	0728	2201	1047	2140	1421	2238	1524	0023	1502	0149	1344
04	1733	0954	2018	0913	1914	0732	2143	0624	2309	0530		0700	2313	0852	2216	1212	2229	1538	2357	1559	0138	1514	0259	1355
05	1853	1021	2128	0924	2023	0742	2257	0639		0605	0011	0819	2326	1014	2236	1340	2333	1640		1623	0249	1525	0408	1408
06	2010	1040	2237	0934	2133	0752		0659	0012	0653	0034	0941	2339	1136	2303	1508		1724	0117	1641	0359	1536	0519	1424
07	2123	1054	2346	0944	2243	0803	0009	0726	0102	0755	0051	1103	2354	1259	2341	1632	0048	1755	0233	1654	0509	1548	0631	1444
08	2234	1106		0956	2356	0816	0118	0804	0140	0909	0106	1225		1425		1746	0208	1817	0347	1706	0619	1601	0742	1510
09	2343	1117	0057	1010		0832	0218	0857	0208	1030	0119	1348	0010	1553	0034	1843	0328	1833	0458	1717	0730	1618	0849	1547
10		1127	0211	1028	0109	0854	0305	1004	0229	1153	0133	1513	0032	1722	0143	1923	0445	1846	0608	1728	0842	1639	0948	1637
11	0052	1138	0325	1053	0222	0925	0340	1122	0245	1317	0148	1642	0102	1845	0302	1951	0558	1857	0719	1740	0952	1709	1035	1739
12	0202	1150	0438	1129	0329	1008	0405	1247	0300	1441	0206	1813	0146	1955	0424	2011	0710	1908	0829	1754	1057	1749	1111	1850
13	0315	1206	0543	1221	0426	1107	0425	1413	0313	1608	0231	1944	0246	2047	0544	2026	0820	1919	0941	1811	1153	1841	1137	2007
14	0430	1227	0635	1329	0509	1222	0441	1541	0327	1737	0307	2105	0401	2123	0700	2038	0931	1931	1053	1835	1236	1946	1157	2125
15	0546	1257	0714	1452	0540	1346	0455	1709	0344	1911	0359	2209	0523	2148	0814	2049	1042	1946	1203	1906	1309	2059	1213	2244
16	0657	1341	0741	1621	0604	1515	0509	1840	0406	2045	0507	2254	0646	2205	0925	2100	1155	2005	1305	1950	1333	2217	1227	
17	0757	1441	0802	1752	0622	1646	0524	2013	0435	2214	0626	2324	0804	2219	1035	2111	1306	2031	1357	2047	1352	2336	1240	0002
18	0844	1558	0818	1922	0637	1816	0543	2149	0518	2328	0749	2345	0919	2231	1146	2124	1415	2107	1437	2156	1407		1254	0123
19	0917	1724	0832	2051	0651	1946	0608	2321	0618		0909		1031	2242	1258	2140	1515	2156	1507	2313	1421	0057	1309	0246
20	0940	1854	0846	2219	0705	2118	0643		0732	0022	1025	0001	1141	2253	1410	2202	1603	2259	1530		1435	0219	1329	0414
21	0958	2022	0900	2348	0721	2251	0732	0042	0852	0059	1138	0014	1251	2305	1522	2231	1640		1548	0034	1449	0343	1357	0545
22	1013	2148	0918		0742		0837	0146	1012	0124	1248	0025	1402	2319	1629	2313	1707	0014	1603	0157	1507	0512	1436	0716
23	1026	2314	0940	0118	0810	0023	0953	0230	1129	0142	1357	0035	1515	2337	1725		1728	0136	1617	0321	1531	0646	1533	0836
24	1039		1011	0245	0850	0149	1112	0300	1242	0156	1507	0047	1628		1810	0009	1744	0301	1631	0448	1604	0820	1648	0937
25	1054	0039	1054	0403	0944	0300	1229	0321	1352	0208	1618	0059	1739	0002	1842	0120	1759	0428	1647	0617	1653	0949	1813	1020
26	1112	0205	1151	0508	1051	0354	1343	0337	1501	0218	1731	0115	1842	0036	1906	0241	1813	0555	1708	0751	1759	1100	1939	1049
27	1137	0332	1302	0555	1207	0431	1454	0349	1610	0229	1844	0135	1934	0125	1925	0406	1828	0724	1736	0926	1919	1152	2102	1110
28	1210	0456	1418	0628	1324	0457	1603	0400	1720	0240	1953	0204	2014	0228	1940	0533	1845	0855	1816	1059	2044	1226	2220	1126
29	1258	0611			1440	0515	1712	0410	1832	0254	2053	0243	2042	0345	1954	0659	1908	1028	1911	1218	2206	1250	2334	1138
30	1400	0710			1553	0529	1821	0421	1946	0310	2140	0338	2103	0508	2008	0826	1940	1201	2023	1318	2324	1307		1150
31	1514	0753			1703	0541			2058	0333			2120	0634	2023	0954			2143	1359			0045	1202

B. Maansverduistering van 3 maart 2007

Total Lunar Eclipse of 2007 Mar 03

Geocentric Conjunction = 23:00:47.6 UT J.D. = 2454163.45888
 Greatest Eclipse = 23:20:55.8 UT J.D. = 2454163.47287

Penumbral Magnitude = 2.3452 P. Radius = 1.2020° Gamma = 0.3174
 Umbral Magnitude = 1.2375 U. Radius = 0.6535° Axis = 0.2883°

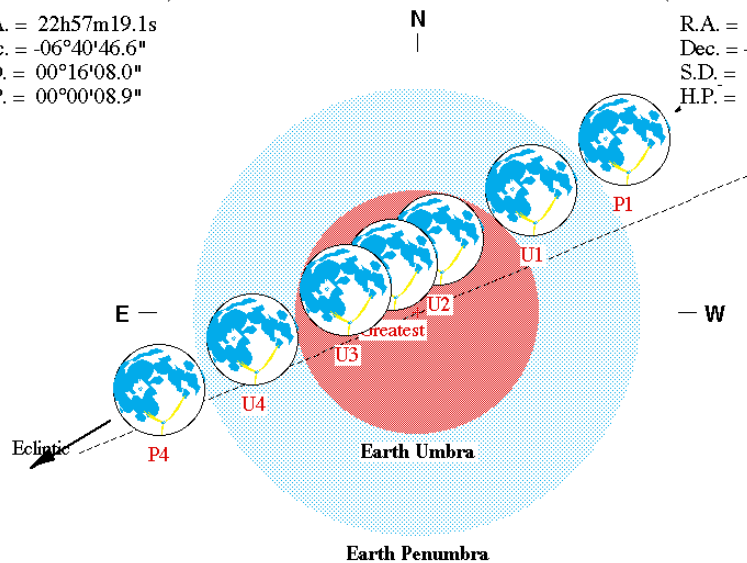
Saros Series = 123 Member = 52 of 73

Sun at Greatest Eclipse (Geocentric Coordinates)

R.A. = 22h57m19.1s
 Dec. = -06°40'46.6"
 S.D. = 00°16'08.0"
 H.P. = 00°00'08.9"

Moon at Greatest Eclipse (Geocentric Coordinates)

R.A. = 10h57m52.2s
 Dec. = +06°56'00.6"
 S.D. = 00°14'51.3"
 H.P. = 00°54'31.1"



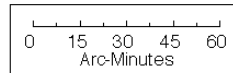
Eclipse Semi-Durations

Penumbral = 03h04m29s
 Umbral = 01h50m51s
 Total = 00h37m06s

Eph. = Newcomb/ILE
 $\Delta T = 65.0$ s

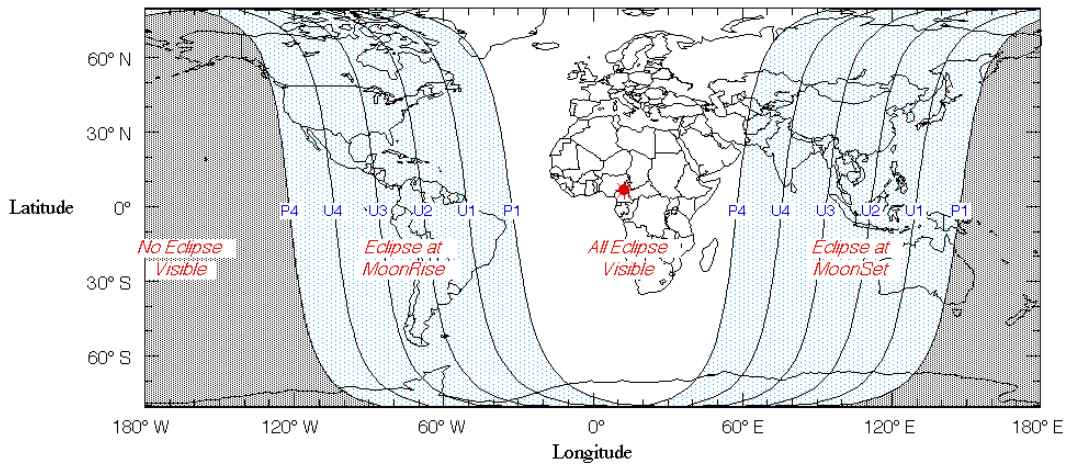
Eclipse Contacts

P1 = 20:16:29 UT
 U1 = 21:30:04 UT
 U2 = 22:43:49 UT
 U3 = 23:58:01 UT
 U4 = 01:11:46 UT
 P4 = 02:25:27 UT



F. Espenak, NASA's GSFC - 2004 Jul 07

<http://sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/eclipse.html>



Bron:

C. Checklist metingen

Materiaal

- Sensoren + registratieapparatuur
 - VITO – sensor:
 - Sensor (+ batterij 9V)
 - frequentiemeter + batterij + inverter
 - multimeter
 - GSM module OF datataker ?
 - LMT
 - LMT meter
 - kabels en sloten voor meetapparatuur
- Laserpointer/waterpas → voor hoek van hindernissen/lichtpunten
- Kompas
- GPS
- Zaklampen
- Fototoestel + statief
- Laarzen en warme kledij
- Batterijen: 1,5 V AA, 9V

Locatie en tijdstip

- Nieuwe maan of dagen ERVOOR (maan komt dan in vroege morgen op en gaat onder in namiddag)
- Nacht van de duisternis (3 maart)
- Helderere hemel (geen bewolking)
- Meting in donkertegebied voldoende ver van straatlantaarns, huizen, ...
- Eerste meting tussen 21:00 en 22:00 (vroegste tijdstip van dimmen van straatverlichting)
- Tweede meting tussen 01:00 en 02:00 (laatste tijdstip van dimmen)
- Hemel over bepaalde hoek (40°) vrij van schaduw- of lichtbronnen
- Locatie 's nachts toegankelijk
- Veiligheid van locatie (diefstal materiaal)

Metingen Praktisch

- Veiligheid materiaal (identificatie materiaal, sloten)
- Afspraken met bewaker / verantwoordelijke
 - Contactgegevens
 - Vooraf locatie bezoeken en contact opnemen
 - Toegang tot het terrein mogelijk?
- Identificatie van VITO-personeel
- Zendingsaanvraag + toegang tot VITO buiten diensturen

Metingen inhoudelijk

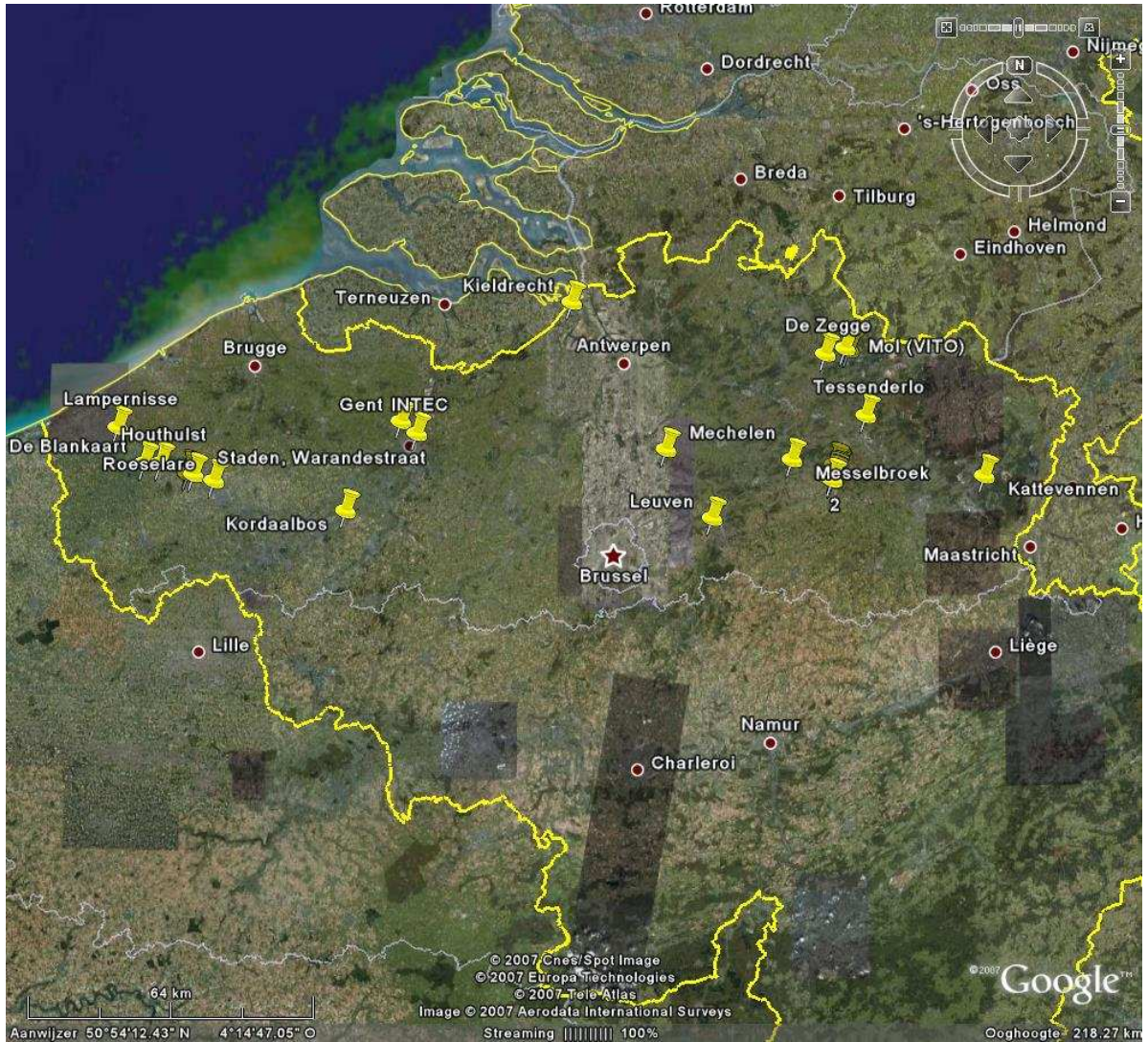
- Metingen LMT en VITO-sensor:
 - Geen lichtbronnen of objecten binnen bepaalde hoek (40° met zenith) → meter voldoende hoog opstellen
 - Temperatuur van meetapparatuur (nauwkeurigheid, condens) → sensor koud, frequentiemeter opgewarmd
 - Visuele controle condens → lenspapier, -doekje.
 - indien de veiligheid het toelaat: koplampen doven op het moment van de meting
- Meetgegevens:
 - GPS coördinaten

- Tijdstip
- Bewolingsgraad (geschat)
- Uitlezingen LMT
- Uitlezingen VITO-sensor
- Temperatuur

D. Overzicht van de verschillende meetlocaties

Op onderstaande kaart worden de verschillende meetlocaties weergegeven (met uitzondering van de metingen tijdens de Nacht van de Duisternis). Vervolgens vindt u per meetlocatie een gedetailleerde kaart en extra gegevens.

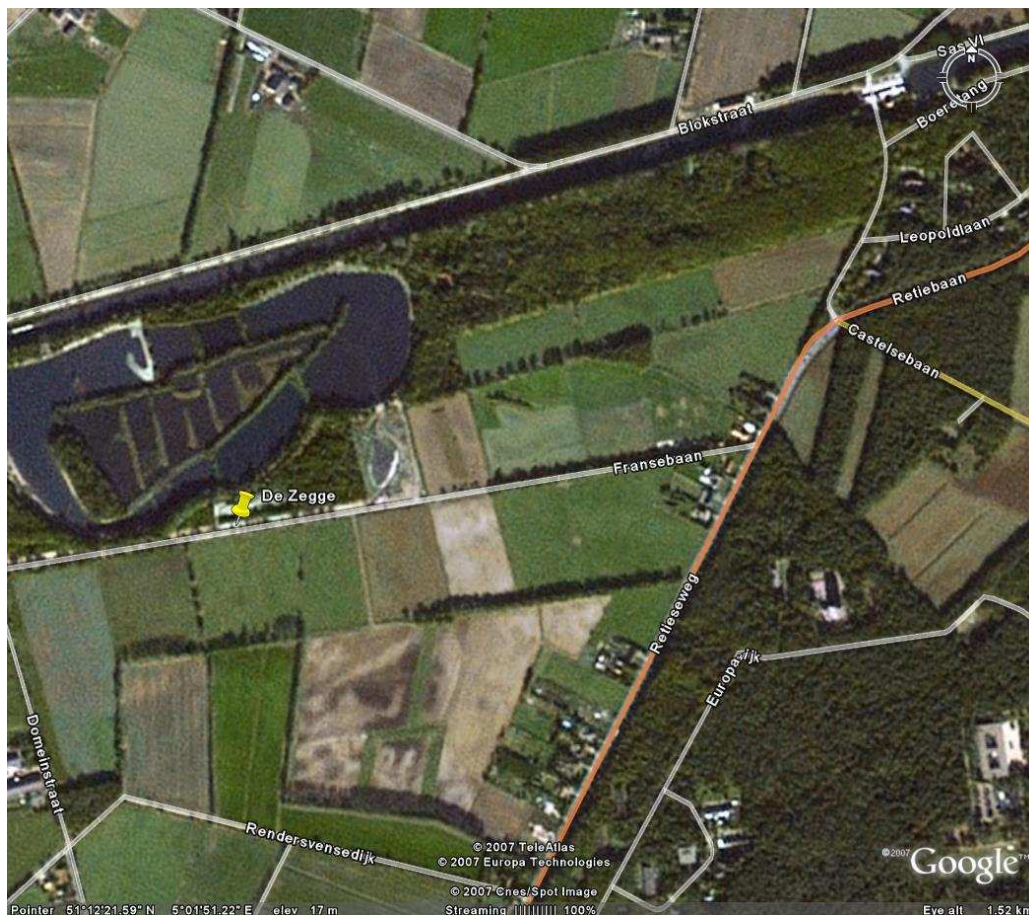
5



a) Donkertegebieden

Antwerpen

Site	De Zegge
Beschrijving	In de verte Geel als lichtbron. Nabije omgeving erg donker (geen straatverlichting). Meting vanaf parking.
Postadres vlakbij	
Contactpersoon	Geen
	Meting vanaf parking
	Eigendom van Zoo Antwerpen
Meetlocatie	



5

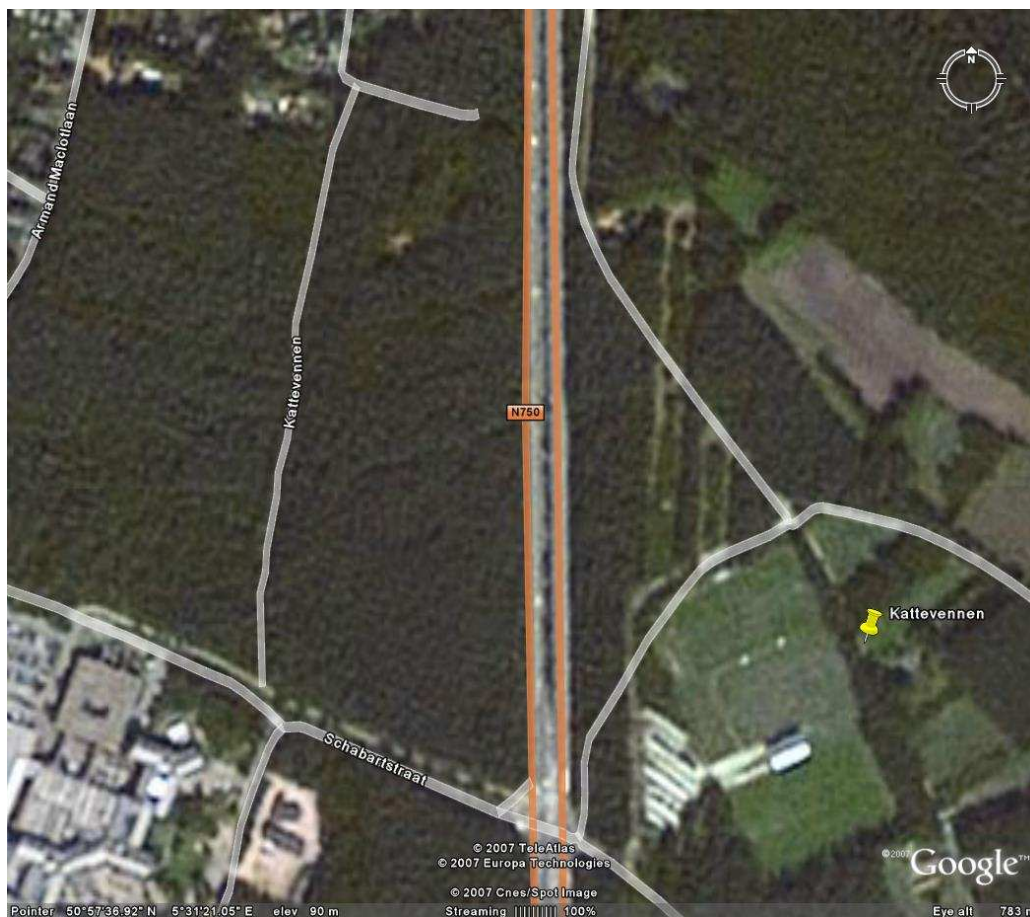
Vlaams-Brabant

Site	Messelbroek
Beschrijving	Natuurgebied "De Demerbroeken". Meten vanaf zandweg, tussen Brielstraat 24 en 25.
Postadres vlakbij	Brielstraat 23 3272 Scherpenheuvel - Zichem
Contactpersoon	Koen Remans 0497-626110
Meetlocatie	



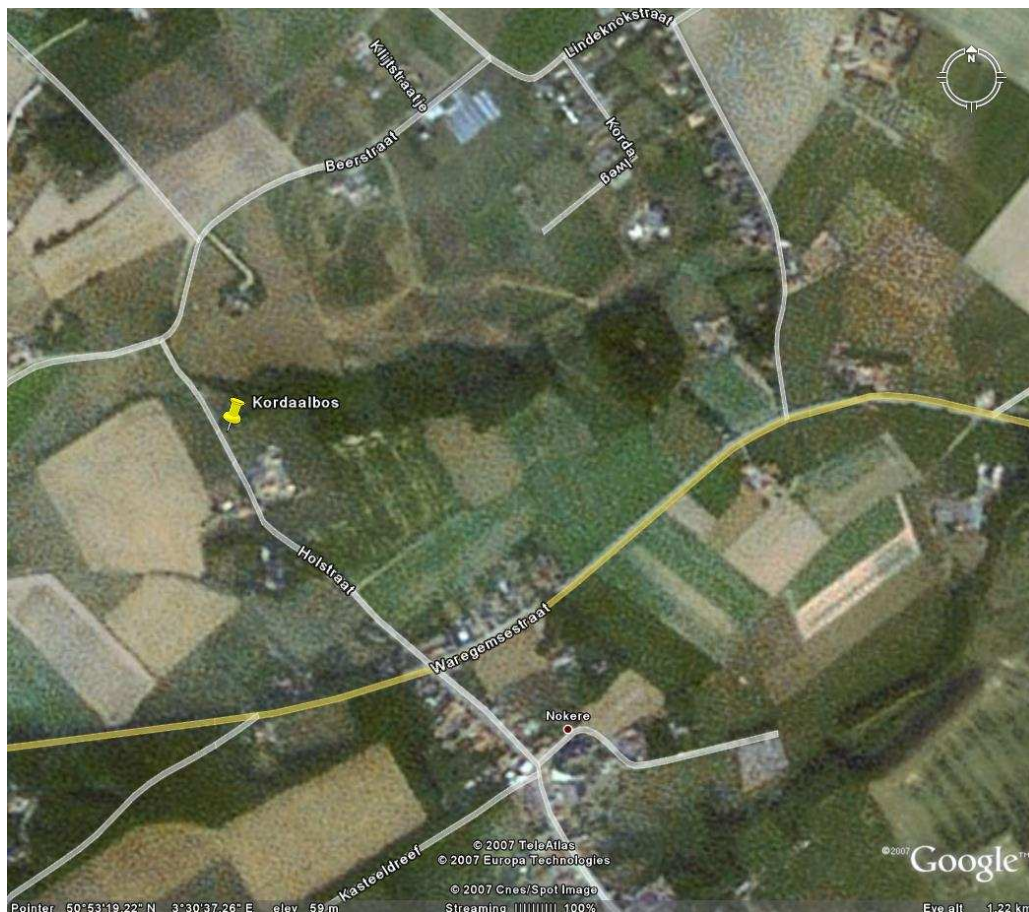
Limburg

Site	Weide Kattevennen
Beschrijving	Zie foto
Postadres vlakbij	Kattevennen 3600 Genk
Contactpersoon	
Meetlocatie	



Oost-Vlaanderen

Site	Kordaalbos
Beschrijving	Natuurgebied Natuurpunt, gelegen in vallei. Door het bosbeheer zijn er stroken van 20 m breed, 100 m lang, die cyclisch gekapt worden, om de 2 jaar een nieuwe strook.
Postadres vlakbij	Holstraat Nokere (Kruishouten)
Contactpersoon	
Meetlocatie	Meting kan gebeuren vanaf openbare weg.



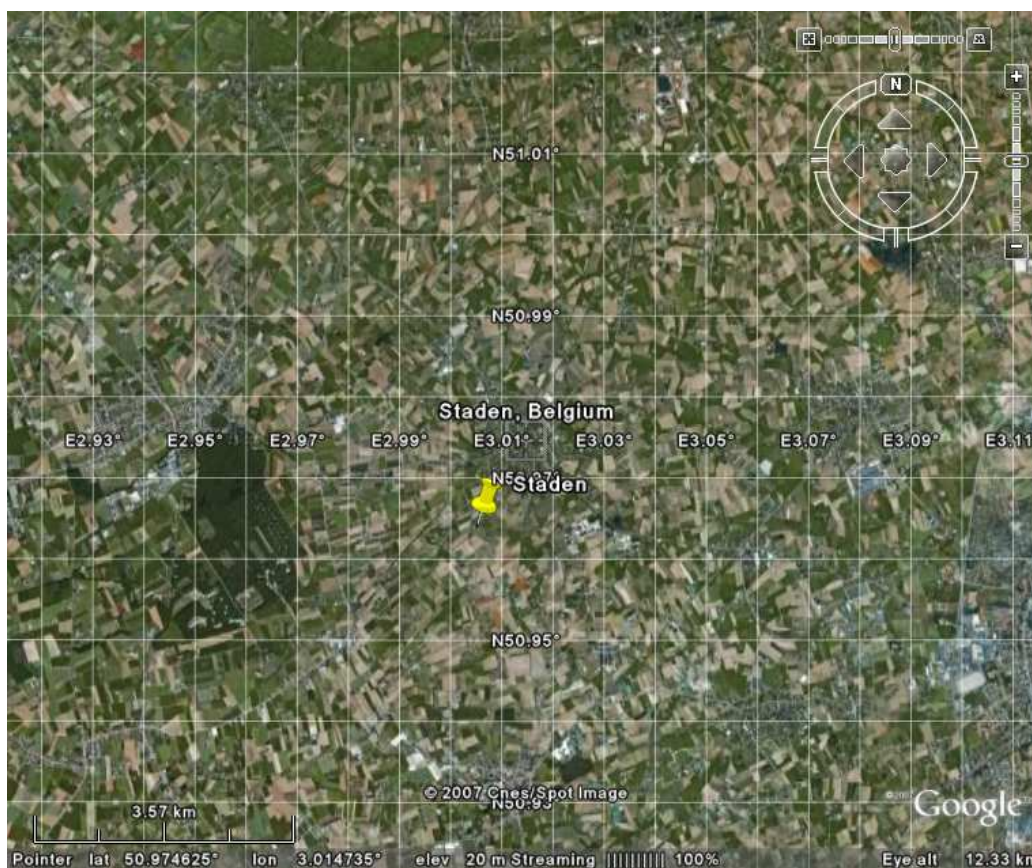
West-Vlaanderen

Site	Natuurgebied De Blankaart
Beschrijving	meting vanaf openbare weg
Postadres vlakbij	Iepersteenweg 56 8600 Woumen-Diksmuide
Contactpersoon	Vlaams bezoekerscentrum De Otter 051-54 52 44
Meetlocatie	



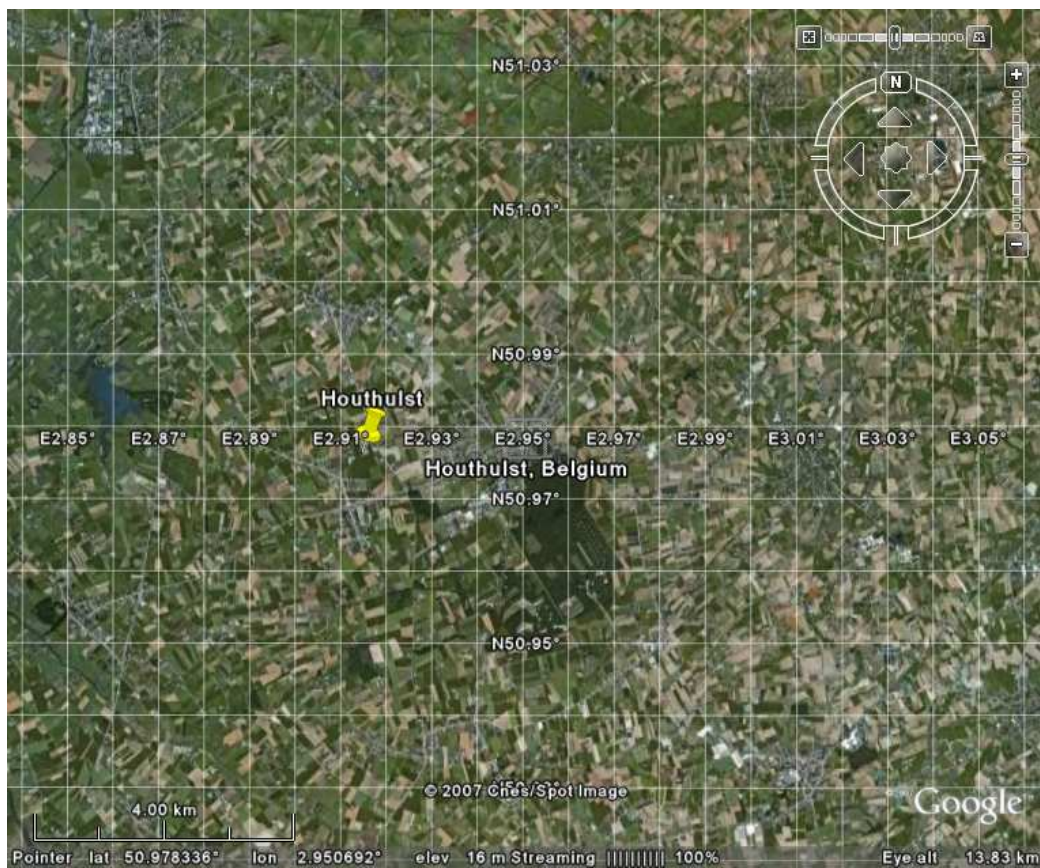
West-Vlaanderen

Site	Staden
Beschrijving	meting vanaf openbare weg
Postadres vlakbij	Ieperstraat 8840 Staden
Contactpersoon	
Meetlocatie	



5

Site	Houthulst
Beschrijving	meting vanaf openbare weg
Postadres vlakbij	Vinkeniersstraat 8650 Houthulst
Contactpersoon	
Meetlocatie	



b) Brongebieden

West-Vlaanderen

Site	Roeselare - stadsrand
Beschrijving	Zie foto
Postadres vlakbij	Roeselarestraat 8800 Roeselare
Contactpersoon	
Meetlocatie	

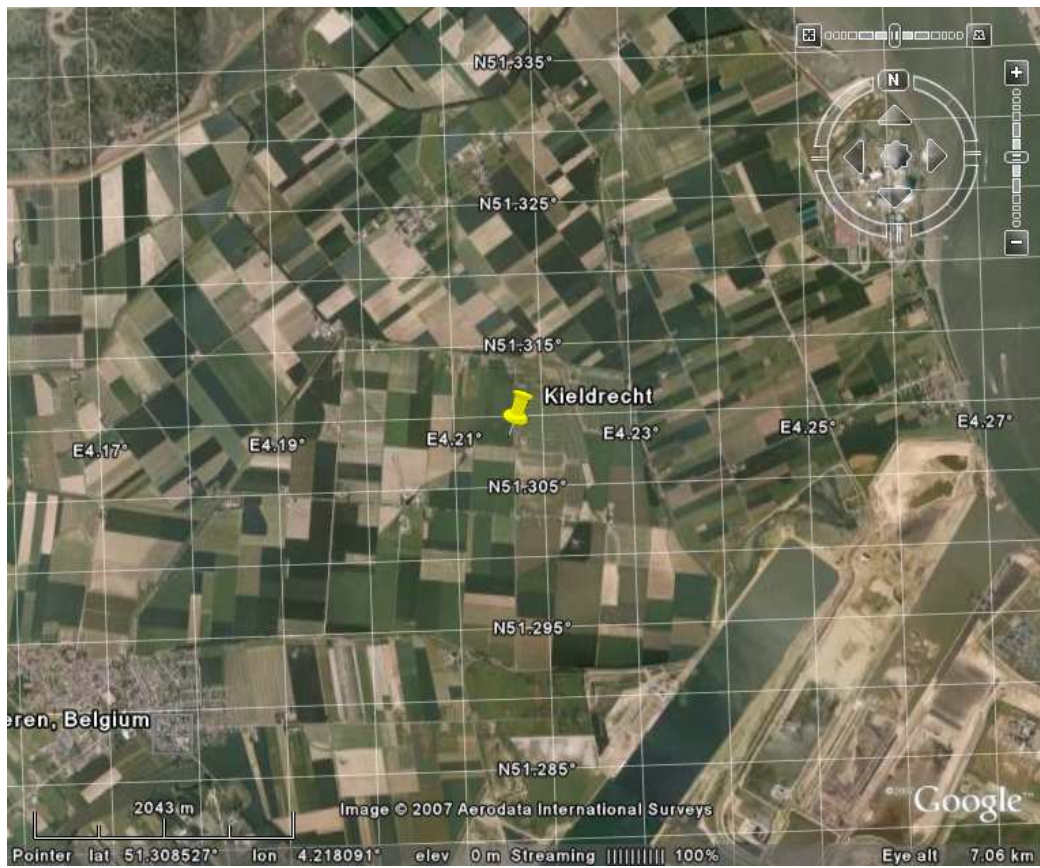
5



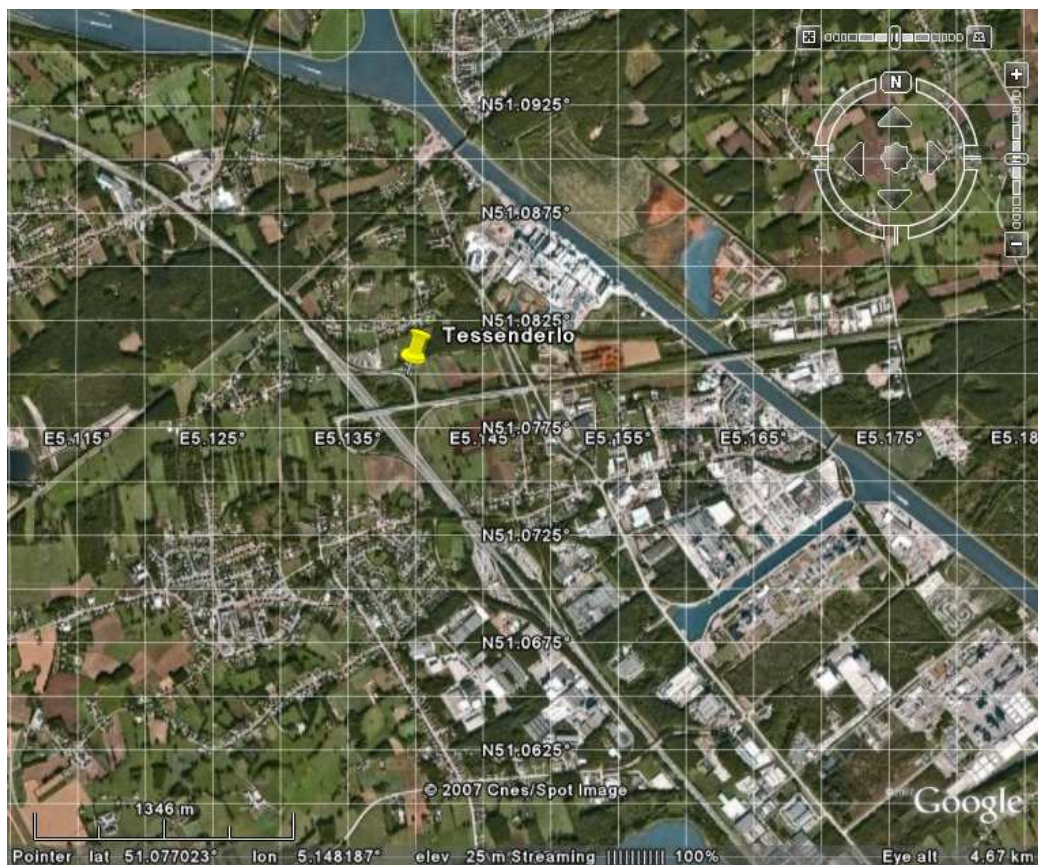
Site	Leuven
Beschrijving	meting vanaf openbare weg
Postadres vlakbij	Terbankstraat 3000 Leuven
Contactpersoon	
Meetlocatie	



Site	Kieldrecht
Beschrijving	meting vanaf openbare weg
Postadres vlakbij	Dreefstraat
	9130 Kieldrecht (Beveren)
Contactpersoon	
Meetlocatie	



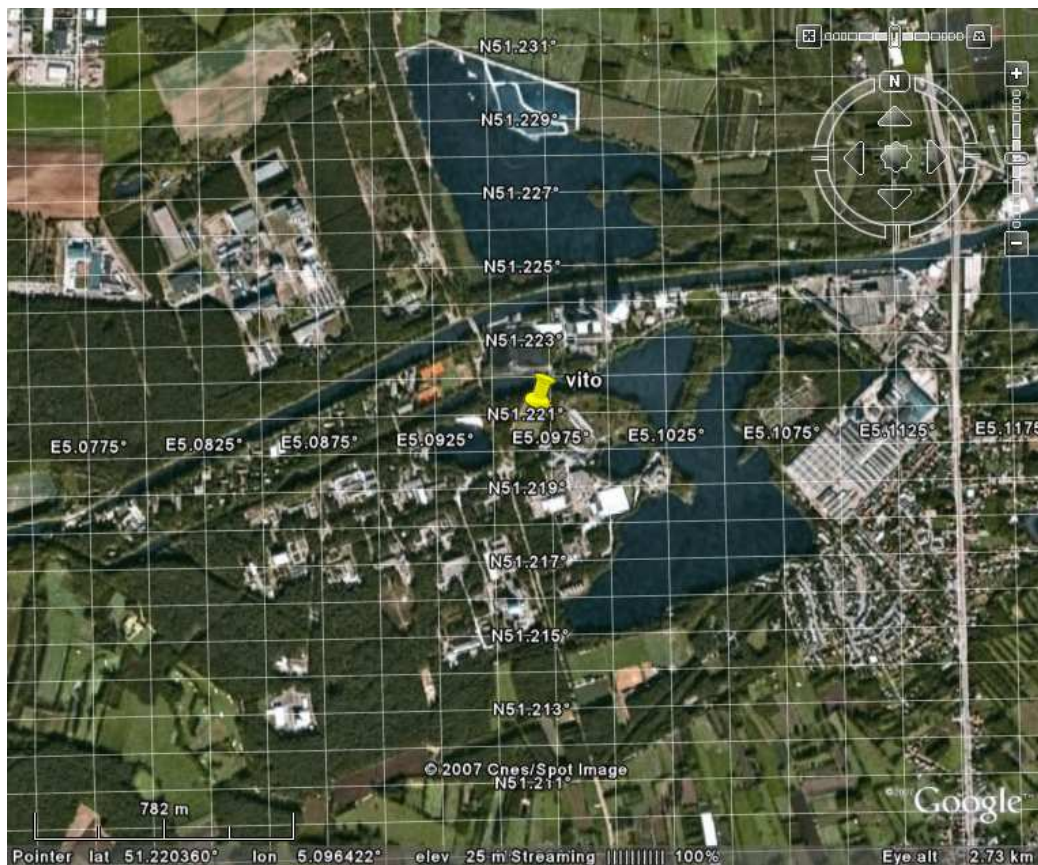
Site	Tessengerlo
Beschrijving	meting vanaf openbare weg
Postadres vlakbij	Bergstraat 3980 Tessenderlo
Contactpersoon	
Meetlocatie	



c) Langdurige meetcampagne

Site	Mol vito
Beschrijving	meting op vanop dak gebouw energie
Postadres vlakbij	Boeretang
	2400 Mol
Contactpersoon	
Meetlocatie	

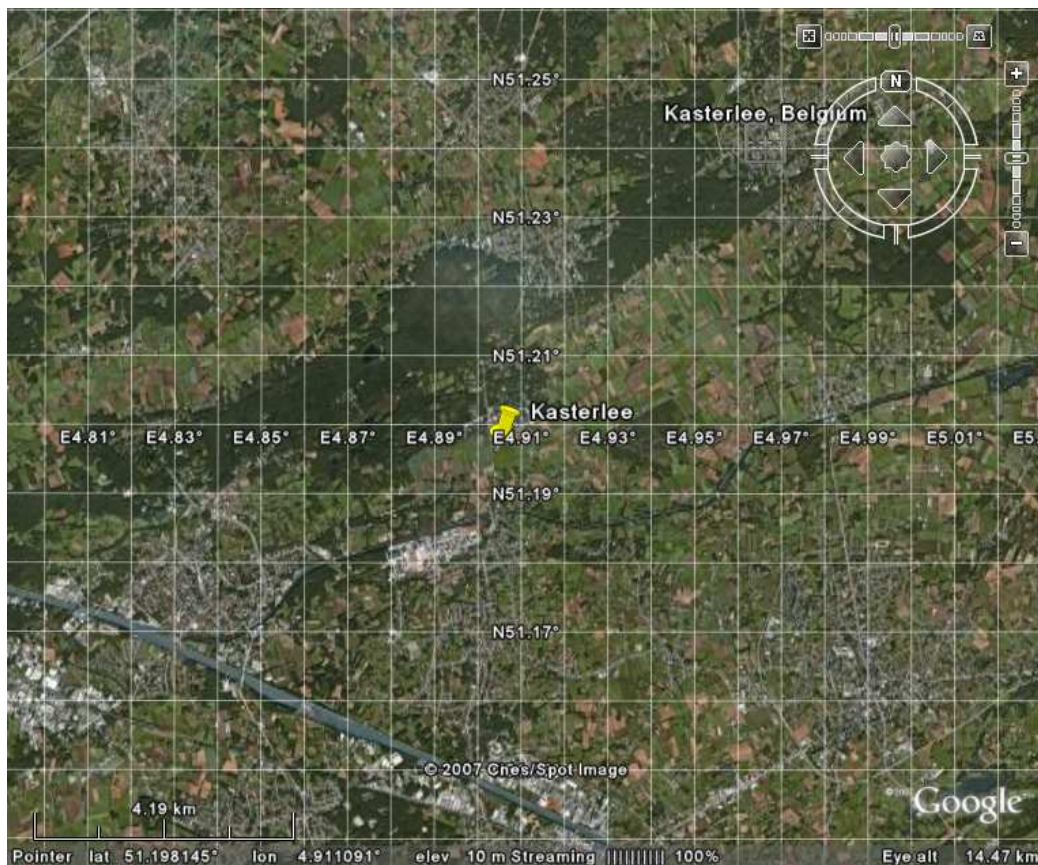
5



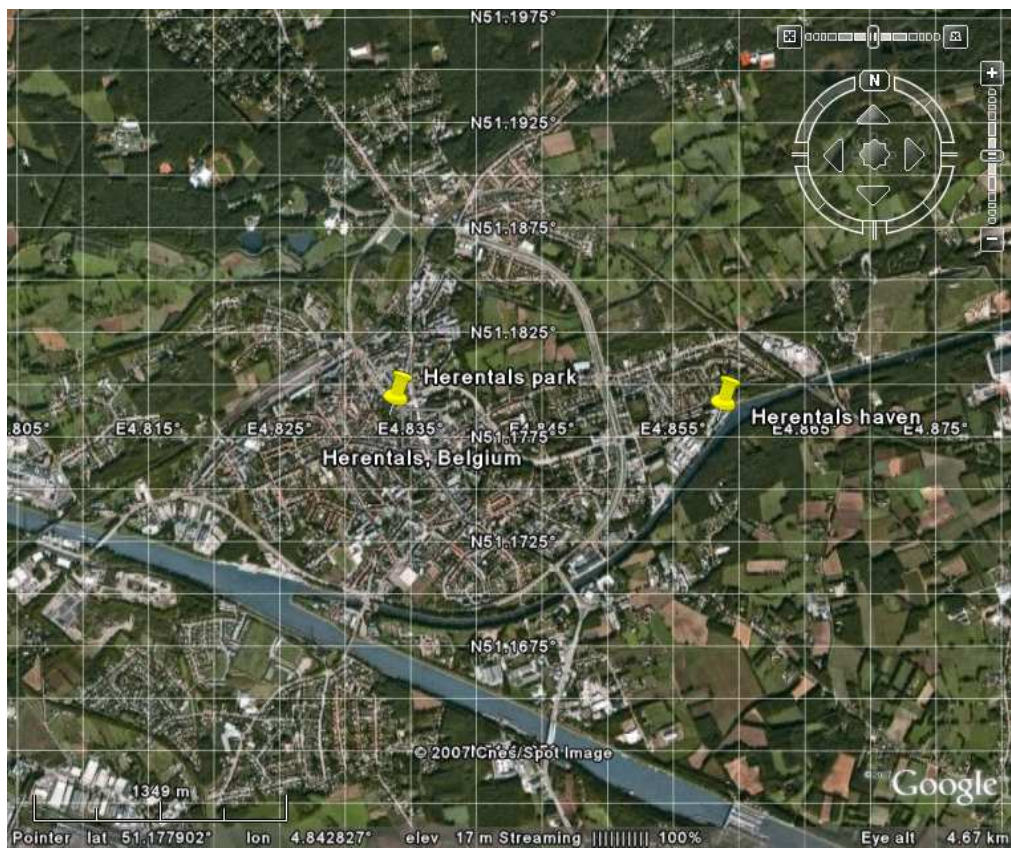
d) Meetlocaties “Nacht van de Duisternis”

Site	Kasterlee
Beschrijving	meting vanaf openbare weg
Postadres vlakbij	Roerdompstraat 2460 Kasterlee
Contactpersoon	
Meetlocatie	

5

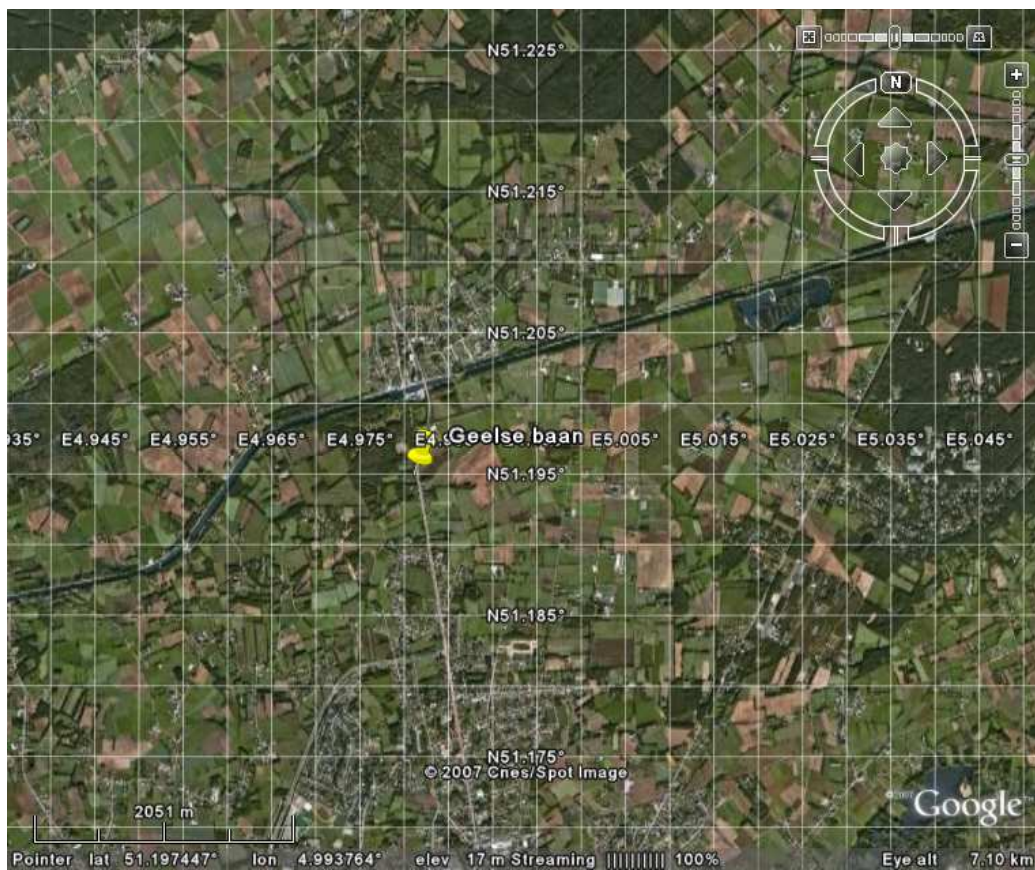


Site	Herentals park Herentals
Beschrijving	Zie foto
Postadres vlakbij	Noordervaart-Belgiëlaan 2200 Herentals
Contactpersoon	
Meetlocatie	



5

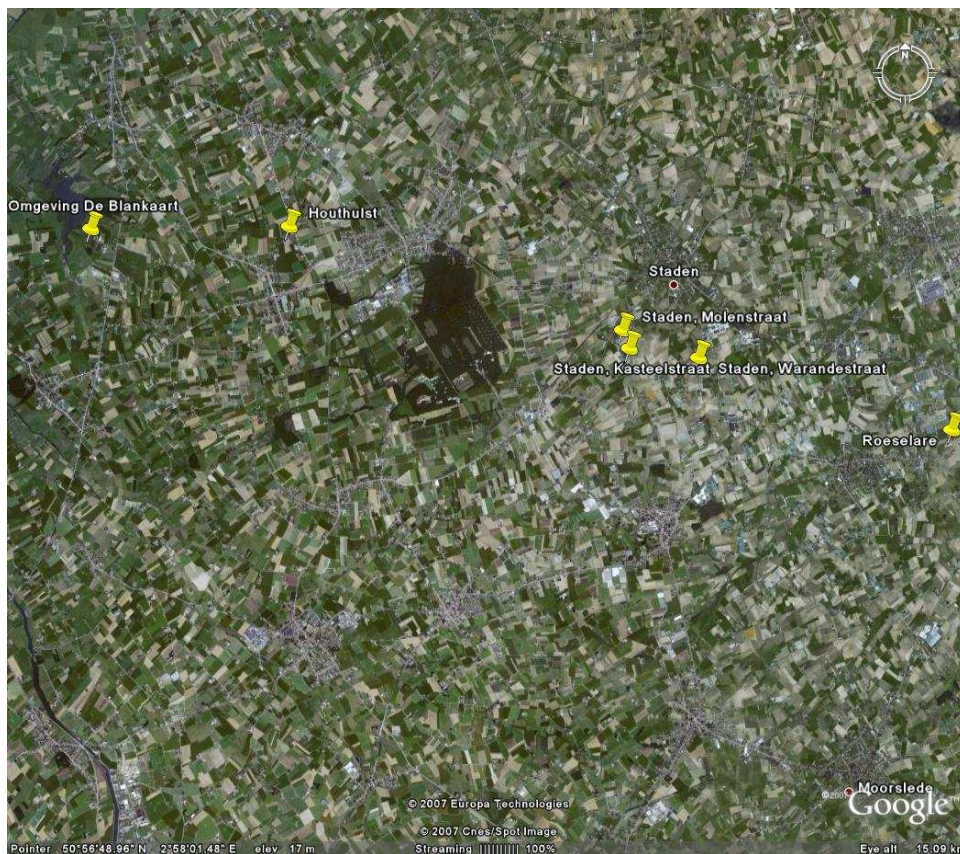
Site	Geel (Geelse baan)
Beschrijving	meting vanaf openbare weg
Postadres vlakbij	Geelsebaan 2440 Geel
Contactpersoon	
Meetlocatie	



e) Verspreidingstest

Roeselare → Diksmuide

Site	Roeselare-Staden-Houthulst-Diksmuide
Beschrijving	meting vanaf openbare weg
Postadres vlakbij	
Contactpersoon	
Meetlocatie	



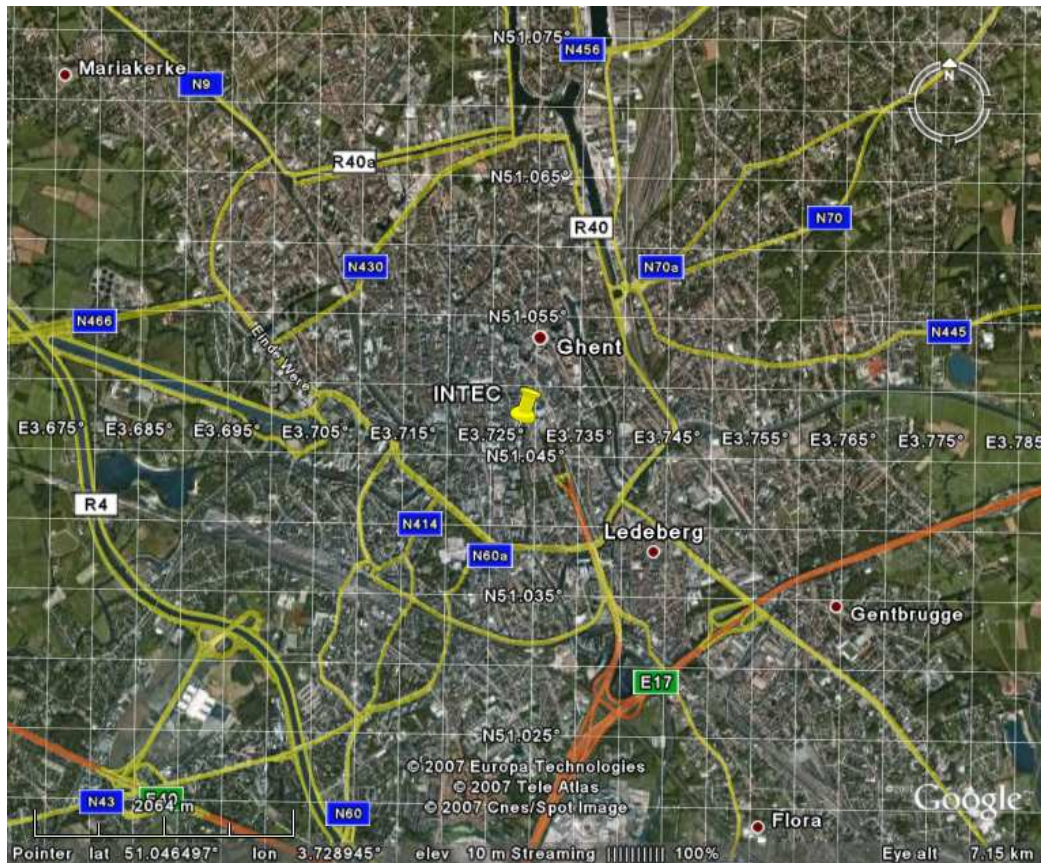
Diest

Site	Omgeving Diest
Beschrijving	meting vanaf openbare weg
Postadres vlakbij	Zie meetresultaten
	3290 Diest
Contactpersoon	
Meetlocatie	



5

Site	Gent
Beschrijving	meting vanaf dak INTEC
Postadres vlakbij	Sint-Pietersnieuwstraat 41 9000 Gent
Contactpersoon	
Meetlocatie	



E. Meetresultaten

a) Selectie metingen

Datum	Locatie	GPS		Tijdstip	Bewolking %	T°	Nr	VITO- sensor	Calibratie	LMT
		N	E							
Donkere gebieden vóór middernacht										
15/02/2007	Geel	51,2044	5,0186	20:25	10%	7,5	4	5,5	6,78	
12/04/2007	Genk	50,95840	5,52400	22:34	0%	17	4	3,00	3,75	
16/02/2007	Messelbroek	50,9936	4,91918	23:12	0%	8	4	1,7	2,17	
7/04/2007	Mol (VITO)	51,21653	5,08770	23:17	0%		3	1,07	1,35	
12/04/2007	Nokere	50,88903	3,50482	22:15			5	2,22	2,80	
Donkere gebieden na middernacht										
15/02/2007	Blankaart	50,97719	2,86313	1:33	5%	6,5	4	1,5	1,93	1,5
15/02/2007	Geel	51,2044	5,0186	0:45	10%	6	4	3,1	3,87	
16/02/2007	Genk	50,9595	5,52727	1:55	0%	2,5	4	1,56	2,00	
17/02/2007	Houthulst	50,97796	2,91454	1:15	5%	7,5	1	1,56	1,91	1,3
16/02/2007	Messelbroek	50,9936	4,91918	0:40	0%	6,5	4	1,3	1,69	
9/04/2007	Mol (VITO)	51,21653	5,08770	0:52	10%		3	1,12	1,40	
15/02/2007	Nokere	50,88903	3,50482	2:55	15%	6	4	2,2	2,78	2,6
13/04/2007	Lampernisse	51,04754	2,77574	0:30			5	1,05	1,38	1,05
16/02/2007	Staden	50,96105	3,00063	0:30	20%	6,5	4	1,6	2,05	1,7
Brongebieden vóór middernacht										
16/02/2007	Gent	51,0687	3,67711	21:54	10%		3	3,8	4,51	
12/04/2007	INTEC	51,04652	3,72789	23:51			3	10,94	12,80	
16/02/2007	Leuven	50,879	4,6616	23:56	0%	7,5	4	2	2,54	
15/02/2007	Mechelen	51,0155813	4,5168843	23:00	0%	5	2	2,9	3,47	
12/04/2007	Roeselare	50,94493	3,08556	23:12			5	3,8	4,72	5,2
12/04/2007	Tessenderlo	51,0812	5,1471	22:03	0%	17	4	4,60	5,69	
Brongebieden na middernacht										
17/02/2007	Gent	51,0687	3,67711	1:39			3	4,3	5,09	
13/04/2007	INTEC	51,04652	3,72789	1:45			3	8,09	9,49	
16/02/2007	Kieldrecht	51,30843	4,21679	2:05	0%	8	2	2,55	3,06	
16/02/2007	Leuven	50,879	4,6616	1:11	4%	7,5	4	2	2,54	
17/02/2007	Mechelen	51,0155813	4,5168843	1:20	0%	6	2	3,05	3,64	
15/02/2007	Roeselare	50,94493	3,08556	0:11	35%	6	4	3,3	4,11	3,9
15/02/2007	Tessenderlo	51,0812	5,1471	1:07	10%	6	4	3,07	3,83	

b) Meetcampagne februari

Tabel 10 - samenvatting meetcampagne februari

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	T °C	ID	VITO-sensor	LMT
			N	E					
16/02/2007	20:30	Mechelen	51,015581	4,516884	50	10	1	9,33	10,09
16/02/2007	20:30	Mechelen	51,015581	4,516884	50	10	1	9,96	10,04
16/02/2007	20:30	Mechelen	51,015581	4,516884	50	10	2	11,30	10,09
16/02/2007	20:30	Mechelen	51,015581	4,516884	50	10	2	10,25	10,04
16/02/2007	20:30	Mechelen	51,015581	4,516884	50	10	3	10,35	10,09
16/02/2007	20:30	Mechelen	51,015581	4,516884	50	10	3	10,7	10,04
17/02/2007	01:20	Mechelen	51,015581	4,516884	0	6	2	3,05	
15/02/2007	23:00	Mechelen	51,015581	4,516884	25	5	2	5,05	
15/02/2007	23:00	Mechelen	51,015581	4,516884	0	5	2	2,9	

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	T °C	ID	VITO-sensor	LMT
16/02/2007	22:20	Roeselare	50,94493	3,08556	90	10	1	15,8	2,38
17/02/2007	01:50	Roeselare	50,94493	3,08556	70	6	1	6,12	0,94
16/02/2007	00:11	Roeselare	50,94493	3,08556	35	6	4	3,3	3,9

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	T °C	ID	VITO-sensor	LMT
16/02/2007	22:40	Staden	50,96105	3,00063	50	9	1	2,76	2,9
17/02/2007	01:35	Staden	50,96105	3,00063	50	5	1	4,53	3,1
16/02/2007	00:30	Staden	50,95665	3,02022	20	6,5	4	1,6	1,7
16/02/2007	00:47	Staden	50,95818	3,00237	20	7,5			1,85

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	T °C	ID	VITO-sensor	LMT
16/02/2007	23:05	Houthulst	50,97796	2,91454	50	10,5	1	3,98	2,6
17/02/2007	1:15	Houthulst	50,97796	2,91454	5	7,5	1	1,56	1,3
16/02/2007	1:06	Houthulst	50,97817	2,91478	40	6,5	4		1,65

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	T °C	ID	VITO-sensor	LMT
16/02/2007	23:25	Diksmuide	50,97719	2,86313	35	9	1	2,42	1,4
17/02/2007	01:00	Diksmuide	50,97719	2,86313	50	8	1	1,51	1,3
16/02/2007	01:33	Diksmuide	50,97762	2,86335	5	6,5	4	1,5	1,5

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	T °C	ID	VITO-sensor	LMT
15/02/2007	19:50	Tessenderlo	51,0812	5,1471	5	7	3	6,44	
16/02/2007	01:07	Tessenderlo	51,0812	5,1471	5	6	4	3,07	
16/02/2007	22:11	Tessenderlo	51,0812	5,1471	10	9	4	5,8	
17/02/2007	01:41	Tessenderlo	51,0812	5,1471	5	9	4	3,6	

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	T °C	ID	VITO-sensor	LMT
16/02/2007	23:56	Leuven	50,87863	4,66222	0	7,5	4	2	
15/02/2007	21:30	Leuven	50,87863	4,66222	2	7,5	4	4,1	5,5
16/02/2007	23:35	Leuven	50,879	4,6616	0	8	4	2,2	
17/02/2007	01:11	Leuven	50,879	4,6616	0	7,5	4	2	

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	T °C	ID	VITO-sensor	LMT
16/02/2007	23:12	Messelbroek	50,9936	4,91918	0	8	4	1,7	
17/02/2007	00:40	Messelbroek	50,994625	4,91548	0	6,5	4	1,3	

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	T °C	ID	VITO-sensor	LMT
15/02/2007	20:25	Geel	51,2044	5,0186	10	7,5	4	5,5	
15/02/2007	00:45	Geel	51,2044	5,0186	10	6	4	3,1	

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	T °C	ID	VITO-sensor	LMT
17/02/2007	01:21	Genk	50,95961	5,52585	5	6,5	4	1,9	
16/02/2007	01:55	Genk	50,9595	5,52727	0	2,5	4	1,56	
16/02/2007	22:38	Genk	50,9595	5,52727	10	8	4	5,1	

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	T °C	ID	VITO-sensor	LMT
15/02/2007	22:30	Gent	51,06797	3,67557	10	7,5	4	6,2	8,8
16/02/2007	21:54	Gent	51,06797	3,67557	10		3	3,8	
16/02/2007	01:39	Gent	51,06797	3,67557			3	4,3	

5

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	T °C	ID	VITO-sensor	LMT
15/02/2007	23:15	Nokere	50,88893	3,50473	20	6	4	2,8	3,4
16/02/2007	02:55	Nokere	50,88893	3,50473	15	6	4	2,2	2,6
16/02/2007	01:05	Nokere	50,88893	3,50473			3	5,3	
16/02/2007	01:05	Nokere	50,88893	3,50473			3	3,8	

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	T °C	ID	VITO-sensor	LMT
15/02/2007	21:50	Kieldrecht	51,30843	4,21679	50	7	2	8	
15/02/2007	01:05	Kieldrecht	51,30843	4,21679	50	7	2	2,6	
16/02/2007	22:10	Kieldrecht	51,30843	4,21679	35	9	2	5,5	
16/02/2007	02:05	Kieldrecht	51,30843	4,21679	0	8	2	2,55	

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	T °C	ID	VITO-sensor	LMT
16/02/2007	21:48	Mol(voetbal)	51,21250	5,09778	licht bewolkt	9		5,1	
17/02/2007	02:02	Mol	51,21250	5,09778	licht bewolkt	6,5		1,9	
15/02/2007	20:36	Mol (VITO)						2,4700	
15/02/2007	22:56	Mol (VITO)						1,7800	
15/02/2007	23:06	Mol (VITO)						1,4500	
15/02/2007	2:16	Mol (VITO)						1,1400	

c) Nacht van de Duisternis

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	ID	VITO-sensor
3/03/2007	21:49	Geelsebaan, Geel	51,19611	5,02833	0	2	6,1
3/03/2007	22:18	Herentals/haven	51,17722	4,85750	30	2	17,1
4/03/2007	0:30	Herentals/park	51,17806	4,83361	0	2	2
4/03/2007	1:55	Kasterlee/reserv	51,19500	4,91333	0	2	8,1
4/03/2007	0:30	Hasselt Dussartplein			5	4	4,4

d) Lichtverspreiding Diest

Brongegevens (Hz)			
Meetlocatie	Vroeg	Laat (koplamp uit)	Laat (koplamp aan)
1	1.62		
2	1.65		
3	1.73	1.41	1.47
4	1.80	1.46	1.61
5	1.95	1.58	1.69
6	1.96	1.62	1.68
7	2.30	2.21	2.50
8	2.80	2.67	2.73
9	4.80	3.87	3.87
10	3.80	3.80	3.80
11	7.00	6.20	6.20

5

e) Meetcampagne april

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	ID	VITO-sensor
12/04/2007	23:12	Roeselare	50,94493	3,08556		5	3,8

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	ID	VITO-sensor
13/04/2007	0:01	Blankaart	50,97719	2,86313		5	1,5

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	ID	VITO-sensor
13/04/2007	0:30	Poortershoekweg, Diksmuide (Lampnissse)	51,04754	2,77574		5	1,1

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	ID	VITO-sensor
12/04/2007	23:17	Leuven	50,87863	4,66222	0	4	3,1
13/04/2007	0:45	Leuven	50,87863	4,66222	0	4	2,9

10

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	ID	VITO-sensor
12/04/2007	22:34	Genk	50,95840	5,52400	0	4	3,0
13/04/2007	1:27	Genk	50,95840	5,52400	100	4	2,3

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	ID	VITO-sensor
12/04/2007	22:03	Tessenderlo	51,0812	5,1471	0	4	4,6
13/04/2007	1:53	Tessenderlo	51,0812	5,1471	100	4	3,7

Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	ID	VITO-sensor
6/04/2007	22:00	Mol(vito)(GSM)	51,21653	5,08770	0	3	2,0
6/04/2007	22:50	Mol(vito)(GSM)	51,21653	5,08770	20	3	2,4
6/04/2007	23:12	Mol(vito)(GSM)	51,21653	5,08770	50	3	4,9
7/04/2007	23:17	Mol(vito)(GSM)	51,21653	5,08770	0	3	1,1
8/04/2007	0:32	Mol(vito)(GSM)	51,21653	5,08770	0	3	1,0
8/04/2007	22:50	Mol(vito)(GSM)	51,21653	5,08770	10	3	2,7
8/04/2007	22:46	Mol(vito)(GSM)	51,21653	5,08770	10	3	2,8
8/04/2007	23:10	Mol(vito)(GSM)	51,21653	5,08770	10	3	2,2
9/04/2007	0:52	Mol(vito)(GSM)	51,21653	5,08770	10	3	1,1
13/04/2007	2:16	Mol(voetbal)	51,21250	5,09778	100	4	1,4

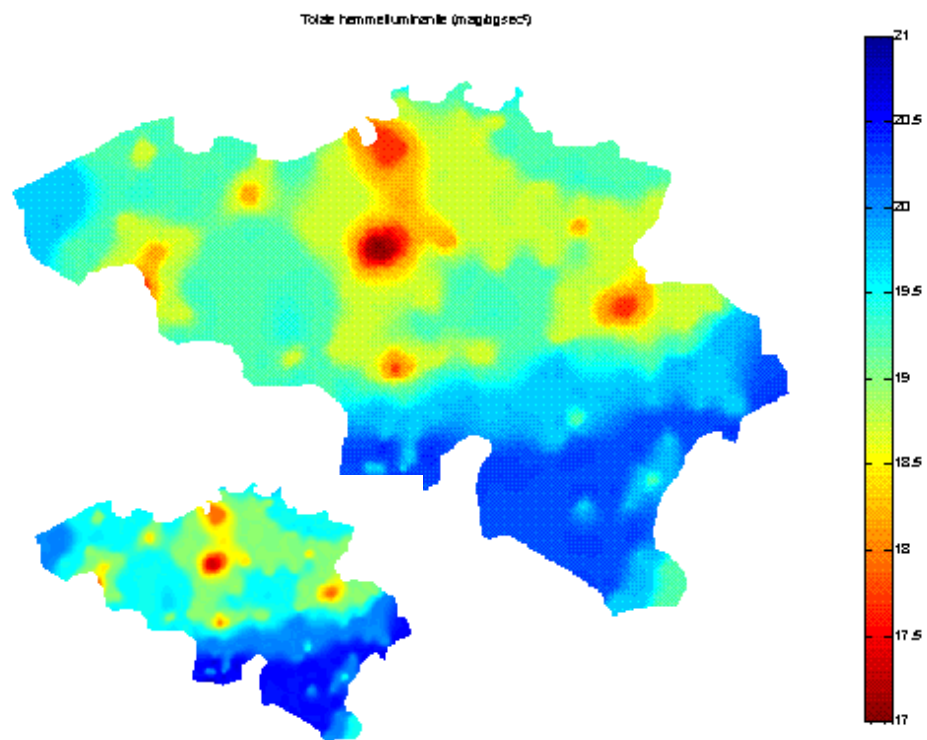
Datum	Tijdstip	Locatie	GPS coördinaten		Bewolking %	ID	VITO-sensor
12/04/2007	21:20	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	113,6
12/04/2007	21:28	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	54,7
12/04/2007	21:39	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	23,1
12/04/2007	21:49	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	15,5
12/04/2007	21:59	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	14,1
12/04/2007	22:11	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	13,3
12/04/2007	23:11	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	12,7
12/04/2007	23:14	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	12,1
12/04/2007	23:51	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	12,1
13/04/2007	0:02	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	11,6
13/04/2007	0:28	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	9,3
13/04/2007	0:34	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	9,2
13/04/2007	1:07	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	9,0
13/04/2007	1:45	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	9,1
13/04/2007	2:19	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	12,6
13/04/2007	2:41	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	18,6
13/04/2007	3:00	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	20,5
13/04/2007	3:01	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	17,4
13/04/2007	3:32	INTEC(GSM)	51,04652	3,72789		3	18,2

F. Hemelluminantiekaarten op basis van metingen in donkere en brongebieden

Tabel 11 - schaalfactoren extrapolatie

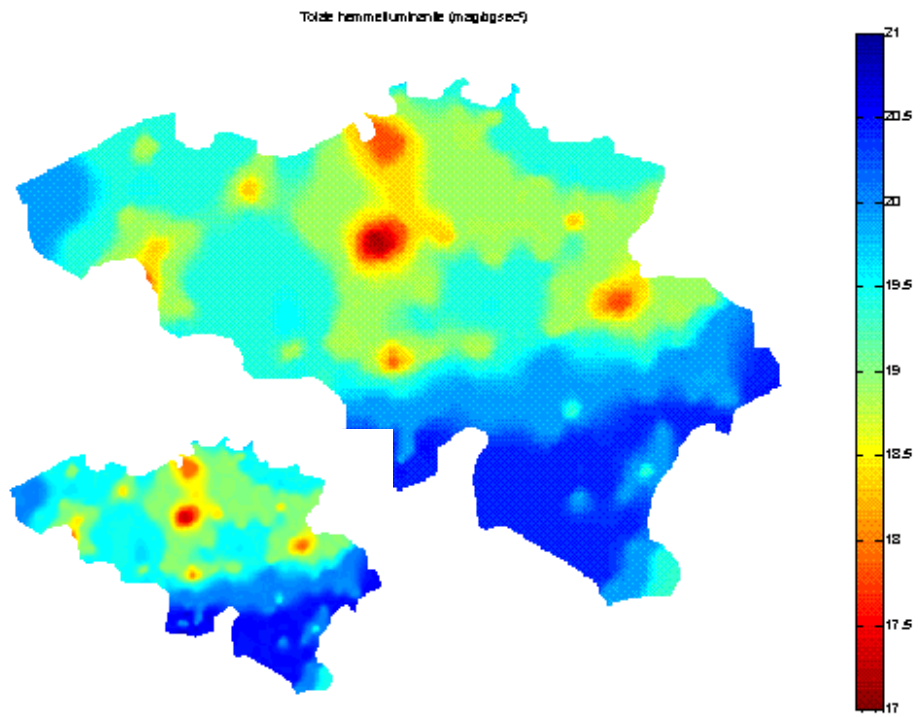
Metingen	correctieterm a $y[\text{Cinzano}] = a + x[\text{meting}]$
totaal vroeg	0,253206
totaal laat	0,117745

5



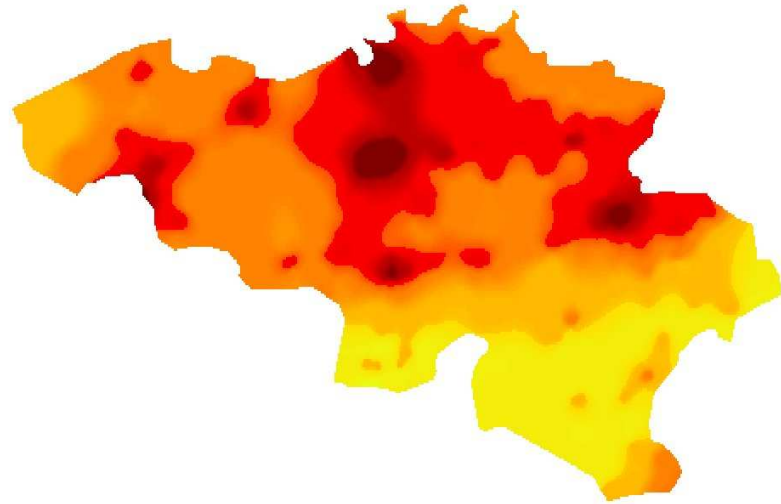
Figuur 27 totale hemelluminantie 2007 vóór middernacht (alle gebieden-benadering)

10

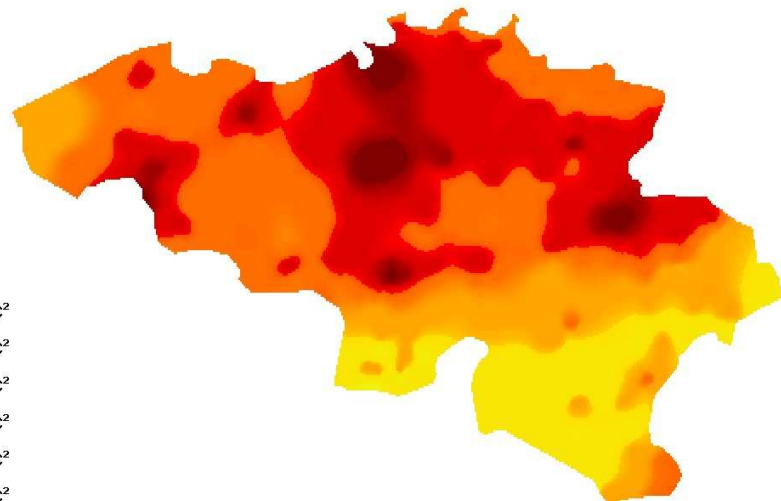


Figuur 28 totale hemelluminantie 2007 (alle gebieden-benadering)

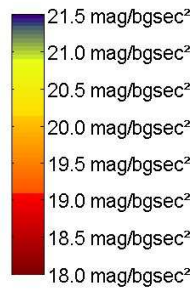
G. Alternatieve schaal voor de hemelluminantiekaarten



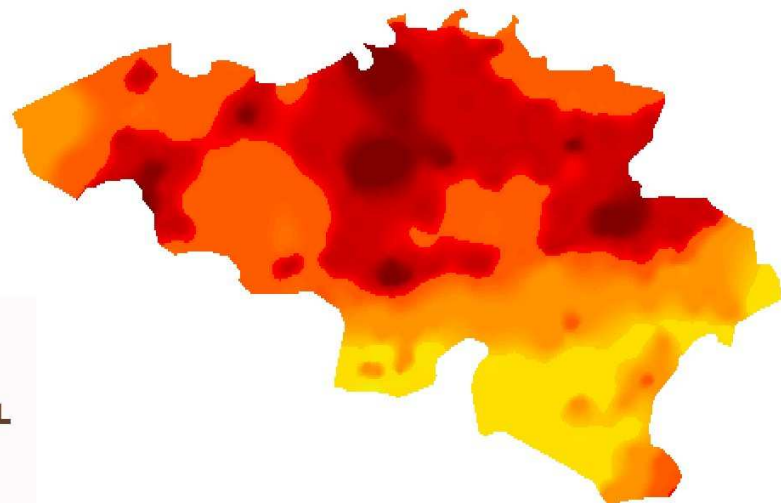
Referentiesituatie 1998-1999, Cinzano et al. (2001)



Situatie 2007, na middernacht



50 km



Situatie 2007, vóór middernacht

H. Broncode voor opstellen van kaarten (MATLAB)

Interpolaties voor afleiden van kaarten

```
5  mg = imread('data.tif');
   img=img(:,:,1:3); % alpha channel?
   data=img(:,:,1); % grijswaarden 333333, 555555, 777777, 999999, ... 1 channel volstaat

   % beeld omzetten naar "zak" puntwaarden in vectoren X,Y,Z
10  index=1;
   for i=1:270,
       for j=1:491,
           if (data(i,j)>1),
15             X(index)=i;
              Y(index)=j;
              Z(index)=data(i,j);
              index=index+1;
           end,
       end,
20  end

   % grijswaarden naar magnitudes volgens schaal
   hex=[3 5 7 9 11 13 15]; % gebruikte grijswaarden in brontif
   mags=[20.5 20 19.5 19 18.5 18 17.5]; % schaal cinzano
25  vals=hex*16+hex;
   Z=double(Z);
   for n=1:7,
       Z(Z==vals(n))=mags(n);
   end
30  Z=double(Z);

   % omzetting naar Cd/m2
   Zcd=108000*10.^(-0.4*Z);
```

35 **Opstellen kaart Candela**

```
   unctio plotcd(zz)
   surf(zz,'LineStyle','none');
   axis off;
40  caxis([-3e-3 12e-3]);
   colorbar('YLim',[0 12e-3]);
   view(90,90);
   title("Totale hemmelluminantie (Cd/m2)");
```

45 **Opstellen kaart in magnitudes**

```
   unctio plotmag(zz)
   figure;
```



```
surf(zz,LineStyle','none');  
axis off;  
colormap(flipud(jet));  
caxis([17 21]);  
5 colorbar('YLim',[17 21]);  
view(90,90);  
title('Totale hemmelluminantie (mag/bgsec2)')
```