

Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen



Studie uitgevoerd in opdracht van
MIRA, Milieurapport Vlaanderen

Onderzoeksrapport

MIRA/2015/05, januari 2015

Dankwoord

Resultaten uit dit rapport bouwen verder op verschillende onderzoeksprojecten, met name CLIMAQS (Climate and Air Quality Modelling for Policy Support) gefinancierd door het Vlaams agentschap voor Innovatie door Wetenschap en Technologie (IWT) en MACCBET (Modelling Atmospheric Composition and Climate for the Belgian Territory) gefinancierd door het Federaal Wetenschapsbeleid (BELSPO) - <http://ees.kuleuven.be/maccbet/>. De onderzoekers van dit rapport zijn IWT en BELSPO zeer dankbaar voor de steun. In eerdere fases van voormelde projecten werd belangrijk werk verricht door Erwan Brisson. Voor de modelsimulaties is infrastructuur gebruikt van de VSC (Vlaamse Supercomputer Centrum) gefinancierd door de Hercules Stichting en het Departement EWI van de Vlaamse overheid. De onderzoekers van dit rapport danken ook de CLM-gemeenschap voor het beschikbaar stellen van de modelcode en het gebruik van het klimaatmodel COSMO-CLM. Voor het gebruik van de E-OBS dataset betuigen de onderzoekers hun dank aan het EU-FP6 project ENSEMBLES (<http://www.ensembles-eu.org>) en de datavoorziening in het ECA&D project (<http://eca.knmi.nl>).

Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen

Koen De Ridder, Bino Maiheu
Afdeling Ruimtelijke Milieuaspecten
VITO

Hendrik Wouters, Nicole van Lipzig
Departement Aard- en Omgevingswetenschappen
KU Leuven

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

MIRA/2015/05

Januari 2015

Vlaamse overheid



Documentbeschrijving

Titel

Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen

Dit rapport verschijnt in de reeks MIRA Ondersteunend Onderzoek van de Vlaamse Milieumaatschappij. Deze reeks bevat resultaten van onderzoek gericht op de wetenschappelijke onderbouwing van het Milieurapport Vlaanderen.

Samenstellers

Koen De Ridder, Bino Maiheu (Afdeling Ruimtelijke Milieuaspecten, VITO)

Hendrik Wouters, Nicole van Lipzig (Departement Aard- en Omgevingswetenschappen, KU Leuven)

Dit rapport kwam tot stand in samenwerking met de wetenschappelijke begeleidingsgroep, met als leden:

Johan Brouwers, Willem Defloor, Edward Roekens, Leen Verlinden (Vlaamse Milieumaatschappij)

Johan Bogaert (Departement Leefmilieu, Natuur, en Energie van de Vlaamse overheid)

Priscilla Declerck, Olivier Brasseur (Leefmilieu Brussel)

Griet Lambrechts (Stad Antwerpen)

Gerrit Tilborghs, Koen Schoeters (Agentschap Zorg en Gezondheid)

Rafiq Hamdi (Koninklijk Meteorologisch Instituut)

Wijze van refereren

De Ridder K., Maiheu B., Wouters H. & van Lipzig N. (2015), Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2015/05, VITO. Raadpleegbaar op www.milieurapport.be.

Vragen in verband met dit rapport

Vlaamse Milieumaatschappij

Milieurapportering (MIRA)

Van Benedenlaan 34

2800 Mechelen

tel. 015 45 14 61

mira@vmm.be

D/2015/6871/008

ISBN 9789491385438

NUR 973/943

Inhoudstafel

Samenvatting	8
Summary	9
Inleiding	10
Deel 1 Indicator gebaseerd op in-situ metingen	15
1.1 Inventarisatie van bestaande metingen	15
1.1.1 KMI – synoptisch waarnemingsnetwerk	15
1.1.2 KMI – klimatologisch waarnemingsnetwerk	17
1.1.3 Belgocontrol	18
1.1.4 Meteo Wing	19
1.1.5 VMM – meetnetwerk Lucht	20
1.1.6 VMM – meetnetwerk Water	22
1.1.7 FANC Telerad netwerk	23
1.1.8 BIM stations	24
1.1.9 Semi-permanente VITO stations Antwerpen	26
1.1.10 VITO meetcampagnes Gent (2012) & Antwerpen (2013)	28
1.1.11 Hobbymeteorologen	28
1.2 Invloed van actieve versus passieve ventilatie op de temperatuurmeting	29
1.3 Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland	33
1.3.1 Analyse op basis van metingen in Parijs en Melun	35
1.3.2 Indicator berekend voor Antwerpen	38
1.4 Strategie voor nieuw te installeren meetposten	41
Deel 2 Indicator gebaseerd op satellietmetingen	45
2.1 Inleiding	45
2.1.1 Afleiden van de oppervlaktetemperatuur op basis van satelliet gegevens	46
2.1.2 Heterogeniteit van het oppervlak in relatie tot de temperatuur	47
2.1.3 Gebruik van satelliet-gebaseerde oppervlaktetemperatuur voor stedelijk klimaat	49
2.2 Inventarisatie en toepasbaarheid bestaande thermisch-infrarode satelliet instrumenten	50
2.2.1 Data verwerking en data beschikbaarheid	53
2.2.2 Bespreking toepasbaarheid voor stedelijk klimaat en SUHI	56
2.3 Verkenning van mogelijke indicatoren voor het stedelijk hitte-eiland	57
2.3.1 LST – gebaseerde indicatoren	57
2.3.2 Relevante indicatoren, niet gebaseerd op oppervlaktetemperatuur	60
2.4 Toepassing voor Vlaamse steden	61
2.4.1 Verwerking LST beelden	61
2.4.2 Ruimtelijke maskers voor stad en platteland	65
2.4.3 Analyse van de LST waarden	72
2.4.4 SUHI effect voor Vlaamse steden als functie van de bevolkingsdichtheid	74
2.4.5 SUHI effect voor Vlaamse steden als functie van de verhardingsgraad	77
2.4.6 Rangschikking van Vlaamse steden i.f.v. SUHI effect	80
2.4.7 SUHI sterkte als functie van de tijd	84
2.4.8 Oppervlakte of ‘hotspot’ indicatoren, ‘HIA’	86
2.5 Slotbespreking indicatoren gebaseerd op satelliet data	93
Deel 3 Indicator gebaseerd op stedelijke klimaatmodellering (SKM)	96
3.1 Inleiding	96
3.2 Methodologie voor stedelijke klimaatmodellering	96
3.2.1 Het stedelijk klimaatmodel (SKM)	96
3.2.2 Input parameters	97
3.2.3 Indicatoren gebaseerd op SKM	99
3.3 Modevaluatie voor 2012	101

3.3.1 Evaluatie van SKM op basis van in-situ metingen voor Antwerpen	101
3.3.2 SKM versus observatiedataset E-OBS.....	102
3.3.3 Evaluatie stedelijke hitte-indicator voor 2012 op basis van SKM	104
3.3.4 Evaluatie stedelijk hitte-indicator voor 2012 op basis van gecorrigeerde SKM	105
3.4 Toepassing stedelijke klimaatmodellering (SKM) op hitte-eilandindicator	106
3.4.1 Retrospectieve SKM	106
3.4.2 Artificiële scenario's voor stedelijke uitbreiding 2060	111
3.4.3 Artificiële scenario's voor globale klimaatverandering 2060.....	112
3.5 Conclusies	114
3.6 Slotopmerkingen.....	116
Conclusies	117
ANNEX 1 OVERZICHT BESTAANDE IN-SITU METEOROLOGISCHE METINGEN	122
ANNEX 2 KOST VAN SYNOPTISCHE DATA (KMI, BELGOCONTROL)	123
ANNEX 3 KOST VAN KLIMATOLOGISCHE DATA (KMI).....	124
ANNEX 4 LOCATIES FIDAS-MONITOREN VMM	125
ANNEX 5 CORRECTIES VOOR TEMPERATUREN BIJ STEDELIJKE KLIMAATMODELLERING.....	126
ANNEX 6 Methodefiche indicator 'IN-SITU'	128
ANNEX 7 Methodefiche indicator 'SATELLIET'	135
ANNEX 8 Methodefiche indicator 'MODELLERING'	142

Inhoudstafel figuren

Figuur 1: Dagelijkse maximum sterkte van het stedelijk hitte-eiland (stedelijk-ruraal temperatuursverschil) voor Antwerpen zoals waargenomen in de VITO meetstations in het centrum van Antwerpen en het nabijgelegen Vremde, voor de periode januari-oktober 2013	10
Figuur 2: Dagelijkse gang van stedelijk en rurale temperatuur (bovenaan), en (onderaan) het verschil tussen beide	11
Figuur 3: Gesimuleerde 2-m temperatuur, gemiddeld om 23:00 lokale tijd, voor de periode mei-september 2009, voor centraal België.....	11
Figuur 4: UHI sterkte in functie van de bevolkingsdichtheid voor een selectie van Belgische steden..	12
Figuur 5: Gesimuleerd aantal hittegolfdagen per jaar voor de regio Berlijn, voor de periode 1986-2005 (links) en 2081-2100 (rechts).....	13
Figuur 6: Positie van de meetstations van het synoptisch netwerk van het KMI in het noordelijk deel van België	16
Figuur 7: Gemiddelde dagelijkse gang van het temperatuurverschil tussen het station van Ukkel en dat van de luchthaven van Brussel Nationaal, voor juli-augustus 2008.....	17
Figuur 8: Posities van de stations in het klimatologisch netwerk van het KMI	18
Figuur 9: Dagelijkse gang van de UHI sterkte voor de zomer van 2013 voor een aantal meetstations in het Antwerpse, ten opzichte van het rurale station in Vremde.....	19
Figuur 10: Locatie van stations in het VMM netwerk Lucht waar temperatuur gemeten wordt	21
Figuur 11: Invloed van de meethoogte (3 m versus 2 m) op de luchttemperatuur, zoals gesimuleerd voor de rurale site van Melle bij Gent, voor de maand augustus 2012.....	21
Figuur 12: Posities van meetstations in het VMM-Water netwerk waar luchttemperatuur gemeten wordt	22
Figuur 13: Het station Herentals van VMM-Water	23
Figuur 14: Positie van de FANC stations (gele pins) van Mol, Doel, Kluizen en Poperinge	24
Figuur 15: Positie van de BIM stations van St Agatha Berchem (M011), Ukkel (M003) en Molenbeek (M001)	25
Figuur 16: Positie van het BIM station van Molenbeek	25
Figuur 17: Gemiddelde dagelijks verloop van het 2-m temperatuurverschil tussen Molenbeek (BIM station) en de luchthaven Brussel Nationaal (KMI station)	26
Figuur 18: Overzicht van de instrumenten die opgesteld staan in de meetstations van VITO in en rond Antwerpen.....	27
Figuur 19: Positie van de VITO meetstations in en rond Antwerpen	28
Figuur 20: Actief (rood) en passief (blauw) geventileerde temperatuurmeting (boven) voor de site van Antwerpen; verschilplot van passief-minus-actief geventileerde metingen (midden) voor zowel Antwerpen als Vremde, en de UHI sterkte bekomen uit passieve en actieve metingen (onder); telkens voor de periode 20-29 juli 2013.....	30
Figuur 21: Dagelijkse maximum (boven) en gemiddelde (onder) UHI sterkte, gebaseerd op metingen van de stations Antwerpen en Vremde, voor de periode januari-oktober 2013.....	31
Figuur 22: Dagelijkse gang van de UHI sterkte voor Antwerpen-Vremde, per maand in 2013, voor de actief (rood) en passief (blauw) geventileerde temperatuurmetingen	32
Figuur 23: Gemeten dagelijkse maximum temperatuur voor de periode mei-september 2013, voor Antwerpen (boven) en Vremde (onder), voor de actief (rood) en passief (blauw) geventileerde temperatuursensoren	33
Figuur 24: Gemeten dagelijkse minimum temperatuur voor de periode mei-september 2013, voor Antwerpen (boven) en Vremde (onder), voor de actief (rood) en passief (blauw) geventileerde temperatuursensoren	33
Figuur 25: Dagelijkse maximum (rood) en minimum (blauw) temperatuur voor Paris-Montsouris (bovenaan) en Melun (onderaan), voor de periode 2001-2010	36
Figuur 26: Gemiddelde dagcyclus van de UHI sterkte voor Parijs-vs-Melun voor de periode 2001-2010 (boven) en voor Antwerpen-vs-Vremde voor 2013 (onder).....	36
Figuur 27: Dagelijkse maximum (rood) en minimum (blauw) temperatuur voor Paris-Montsouris (bovenaan) en Melun (onderaan), voor de periode juli-augustus 2003	37
Figuur 28: De HGD indicator voor Parijs (rood) en Melun (blauw), voor de periode 2001-2010.....	38
Figuur 29: Meetreeks van T_{min} (blauw) en T_{max} (rood) voor de periode 1 april - 30 september 2013, voor de stations in Antwerpen (boven) en Vremde (onder)	39
Figuur 30: Meetreeks van T_{min} (blauw) en T_{max} (rood) voor de periode 1 april - 30 september 2014, voor de stations in Antwerpen (boven) en Vremde (onder)	39

Figuur 31: Meetreeks van T_{\min} (blauw) en T_{\max} (rood) voor de periode zomer 2012, voor de stations in Antwerpen (boven) en Vremde (onder).....	40
Figuur 32: Dagelijkse maximum en minimum temperaturen voor Ukkel, voor de periode 2012-2014 .	40
Figuur 33: Hittegolf graaddagen: de indicator berekend voor 2012-2013-2014 voor de stedelijke locatie (rood) en de rurale locatie (blauw) in en rond Antwerpen	41
Figuur 34: Absorptie karakteristiek van de aardatmosfeer in het infrarode deel van het elektromagnetisch spectrum.....	46
Figuur 35: Illustratie van het effect van de waarnemingshoek voor satelliet gebaseerde observaties van oppervlaktetemperatuur.....	48
Figuur 36: Vergelijking tussen twee gemeten emissiviteits spectra als functie van de golflengte, links voor asfalt, rechts voor een bodemstaal van zanderige bodem in Arizona	48
Figuur 37: Satelliet gebaseerde oppervlaktetemperatuur voor Gent (links) en Antwerpen (rechts)	49
Figuur 38: Schematische weergave van de trade-off in ruimtelijke resolutie en terugkeerperiode	52
Figuur 39: Illustratie van heliosynchrone baan.....	53
Figuur 40: Voorbeeld van een MODIS oppervlaktetemperatuurbeeld eind maart 2003.....	55
Figuur 41: Tabel met UHI indicatoren op basis van remote sensing data	57
Figuur 42: Voorbeeld van Gaussisch oppervlak	58
Figuur 43: Verschil tussen een dag opname (MODIS 10/07/2001 om 09:30) voor Athene en een nachtopname (28/07/2000 om 20:55)	59
Figuur 44: Typische spectrale reflectantie van vegetatie (groene cirkels) en gewone grond (blauwe cirkels)	61
Figuur 45: Overvliegtijden voor de MODIS instrumenten aan boord de Terra en Aqua satellieten boven Gent (UTC)	62
Figuur 46: Uitvergroting van de vergelijking tussen MODIS LST waarden en luchttemperatuur gemeten te Antwerpen Deurne gedurende de maand januari 2006	63
Figuur 47: Uitvergroting van de vergelijking tussen MODIS LST waarden en luchttemperatuur gemeten te Antwerpen Deurne gedurende de maand juli 2006	63
Figuur 48: Afbeeldingen van de jaargemiddelde MODIS LST voor België	64
Figuur 49: Administratieve grenzen van de Vlaamse steden en gemeenten.....	65
Figuur 50: Resulterend masker voor stedelijk gebied afgebeeld op het CORINE grid.....	67
Figuur 51: Resulterend masker voor ruraal gebied, afgebeeld op het CORINE grid.....	68
Figuur 52: Uitvergroting ruraal masker uit Figuur 51 voor Antwerpen en Gent	68
Figuur 53: Vergelijking in landgebruik simulaties a.d.h.v. het RuimteModel Vlaanderen, bovenaan de referentie (2010), onderaan de prognose voor 2050 in het 'Global Economy' scenario.....	69
Figuur 54: Totale fractie verhard gebied in Vlaanderen, gebaseerd op een inschatting met het RuimteModel	69
Figuur 55: Wijzigingen in de CORINE 2006 dataset t.o.v. de versie 2000, met detail voor Gent en Antwerpen.....	71
Figuur 56: Verschillen in het stedelijke landgebruiksmasker voor CORINE 2006 t.o.v. CORINE 2000	71
Figuur 57: LST medianen voor het stedelijke masker voor Gent, Antwerpen en gans Vlaanderen per maand versus jaar	73
Figuur 58: Analyse waarbij boxplots genomen zijn van de 2m luchttemperatuur data te Deurne (periode 2002 - 2012) en uitgezet als functie van de bewolgingsgraad (in tienden, waarbij 0 wolkenvrij is en 10 volledig bewolkt)	74
Figuur 59: EEA bevolkingsdichtheidskaart voor België, verrasterd naar het MODIS 1x1 km ² rooster. 75	75
Figuur 60: Relatie tussen het logaritme van de bevolkingsdichtheid (in # / km ²) en de sterkte van het SUHI effect, bovenaan voor 2013, in het midden voor 2006 en onderaan voor 2003.....	76
Figuur 61: Detail voor Antwerpen van de EEA dataset met de verhardingsgraad op 20 m voor gans Europa	78
Figuur 62: Relatie tussen de verhardingsgraad van een stad en de sterkte van het SUHI effect, bovenaan voor 2013, in het midden voor 2006 en onderaan voor 2003	79
Figuur 63: SUHI effect berekend op de zomergemiddelde LST kaarten voor elk jaar, voor de dagbeelden.....	84
Figuur 64: SUHI effect berekend op de zomergemiddelde LST kaarten voor elk jaar, voor de nachtbeelden	85
Figuur 65: Gelijkaardige analyse als in Figuur 63, maar ditmaal op maandbasis.....	86
Figuur 66: Histogram van de oppervlakte stedelijke temperaturen in Vlaanderen voor de zomerperiodes van 2002 tot en met 2013.....	87
Figuur 67: Berekende zomer - HIA voor gans Vlaanderen voor de periode 2002 - 2013.....	89
Figuur 68: Berekende zomer - HIP voor gans Vlaanderen voor de periode 2002 - 2013.....	89

Figuur 69: Analyse van de finaal geconstrueerde HIA indicator voor de jaren 2002 - 2013 voor een aantal Vlaamse steden opgedeeld volgens de 3 SUHI klassen van steden uit Tabel 14 (hoog, gemiddeld en laag SUHI) en onderaan de indicator voor gans Vlaanderen.....	90
Figuur 70: Analyse van de finaal geconstrueerde HIP indicator voor de jaren 2002 - 2013 voor een aantal Vlaamse steden opgedeeld volgens de 3 SUHI klassen van steden uit Tabel 14 (hoog, gemiddeld en laag SUHI) en onderaan de indicator voor gans Vlaanderen.....	91
Figuur 71: Analyse van de hot island indicator (HIA) voor de steden, waarbij werd afgeweken van de vooropgestelde P95 percentielwaarde en P50, P70 en P80 getest werden om de drempelwaarden te bepalen voor de dag- en nachtmaandgemiddelden. Bovenaan een analoge figuur als Figuur 69, maar dan voor P50, in het midden voor P70 en onderaan voor P80	92
Figuur 72: Het verband tussen de versteningsgraad (= verstening/oppervlakte-eenheid) geaggregeerd voor België op het SKM grid op 2,8 km horizontale resolutie, volgens de observatiedataset van de EEA (Maucha et al. 2010) op de X-as, en deze afgeleid uit VITO's landgebruiksmodel (Engelen et al., 2011) op de Y-as	98
Figuur 73: Uurlijkse tijdsreeksen en gemiddelde dagcycli volgens in-situ metingen (ISM; dunne lijnen), stedelijke klimaatmodellering (SKM; dikke lijnen) en standaard regionale klimaatmodellering (STD; zwarte lijnen)	102
Figuur 74: Dagelijkse temperatuurminima voor in-situ metingen (ISM), E-OBS, stedelijke klimaatmodellering (SKM) en gecorrigeerde stedelijke klimaatmodellering (CORR) gedurende de zomer van 2012.....	103
Figuur 75: De in-situ stedelijke hitte-indicator voor Antwerpen	104
Figuur 76: Idem als figuur 75, maar volgens stedelijke klimaatmodellering waarvoor correcties werden toegepast volgens Annex 5 m.b.t de grootschalige temperatuur en de intensiteit van stedelijke hitte-eilanden (Antwerpen en Vremde, 2012).....	106
Figuur 77: Historiek van de in-situ stedelijke hitte-indicator voor Antwerpen volgens gecorrigeerde stedelijke klimaatmodellering.....	108
Figuur 78: Historiek van de in-situ stedelijke hitte-indicator volgens gecorrigeerde stedelijke klimaatmodellering (idem als figuur 76) voor Brussel (Molenbeek en St Pieters-Leeuw, 2000 tot en met 2010).....	109
Figuur 79: Historiek van de in-situ stedelijke hitte-indicator volgens gecorrigeerde stedelijke klimaatmodellering (idem als figuur 76) voor Gent (Gent en Melle, 2000 tot en met 2010)	109
Figuur 80: Historiek van de in-situ stedelijke hitte-indicator volgens gecorrigeerde stedelijke klimaatmodellering (idem als figuur 76) voor Hasselt (Hasselt en Diepenbeek, 2000 tot en met 2010)	110
Figuur 81: Historiek van de in-situ stedelijke hitte-indicator volgens gecorrigeerde stedelijke klimaatmodellering (idem als figuur 76) voor Brugge (Brugge en Moerkerke, 2000 tot en met 2010)	110
Figuur 82: Historiek van de in-situ stedelijke hitte-indicator volgens gecorrigeerde stedelijke klimaatmodellering (idem als figuur 76) voor Lier (Lier en Vremde, 2000 tot en met 2010)	111
Figuur 83: De verandering in maandgemiddelde temperatuur te Ukkel voor de zomermaanden over 60 jaar (2060 versus 2000) volgens het hoog (rode lijn), midden (groene lijn) en laag (blauwe lijn) klimaatscenario uit van Lipzig & Willems (2015)	112
Figuur 84: De 'klimatologische' stedelijke hitte-indicator: jaarlijks aantal hittegolf graaddagen gemiddeld voor de stedelijke gebieden (paarse symbolen), rand -of lichtstedelijke gebieden (rode symbolen), en rurale gebieden (groene symbolen) volgens modelgecorrigeerde klimaatsimulaties .	113
Figuur 85: De 'ruimtelijke' stedelijke hitte-indicator voor Vlaanderen/België: de jaarlijkse hittegolf graaddagen voor stedelijke klimaatmodellering gemiddeld over 10 jaar	115
Figuur 86: Gemeenschappelijk 1x1 km ² rooster voor de projectie van de MODIS beelden	137
Figuur 87: CORINE landgebruiksmasker voor stedelijke gebieden	138

Inhoudstafel tabellen

Tabel 1: Meetstations beheerd door Belgocontrol	19
Tabel 2: Meetstations beheerd door de MeteoWing (enkel die stations die in of dichtbij het Vlaams Gewest gelegen zijn)	20
Tabel 3: VMM Lucht meetstations waar ook meteorologische variabelen gemeten worden	20
Tabel 4: VMM-Water meetstations waar ook meteorologische variabelen gemeten worden	22
Tabel 5: FANC meetstations waar ook meteorologische variabelen gemeten worden	23
Tabel 6: Potentieel interessante locaties voor uitbreiding van het stedelijk meteorologisch observatienetwerk in Vlaanderen en Brussel	42
Tabel 7: Basiskarakteristieken van oppervlakte (SUHI) en atmosferische (CLUHI) hitte-eilanden	45
Tabel 8: Huidige satelliet missies met TIR sensoren (dd. 2011)	50
Tabel 9: Geplande satelliet missies met TIR sensoren (dd. 2011)	51
Tabel 10. Relatie tussen de sterkte van het SUHI, berekend op de gemiddelde MODIS LST gedurende de zomerperiode (april - september), en de \log_{10} van de bevolkingsdichtheid (P) van het stedelijk gebied	77
Tabel 11: Relatie tussen de verhardingsgraad en de sterkte van het SUHI effect	80
Tabel 12: Rangschikking van de steden i.f.v. de sterkte van het SUHI effect, afgeleid op basis van de zomergemiddelde oppervlaktetemperatuur kaarten overdag	81
Tabel 13: Rangschikking van de steden i.f.v. de sterkte van het SUHI effect, afgeleid op basis van de zomergemiddelde oppervlaktetemperatuur kaarten 's nachts	82
Tabel 14: Expliciete rangschikking van de steden volgens de sterkte van het SUHI effect in de zomer (april - september) overheen de jaren 2002 - 2013	83
Tabel 15: Percentielwaarden van de stedelijke oppervlaktetemperatuur in Vlaanderen voor de periode 2002 - 2013	88
Tabel 16: Locaties van de (toekomstige) in-situ metingen gebruikt voor de in-situ stedelijke hittestressindicator	107

Samenvatting

De temperatuur in steden is doorgaans hoger dan in de nabijgelegen plattelandsgebieden; naar dit fenomeen wordt verwezen als het stedelijk hitte-eiland. Terwijl dit temperatuurverschil gemiddeld enkele °C bedraagt, kan het in bepaalde omstandigheden oplopen tot 7-8 °C en meer. Internationaal onderzoek heeft aangetoond dat, tijdens hittegolven, deze extra hitte-stress in steden aanleiding geeft tot een bijkomende oversterfte. Verder zijn er effecten van het stedelijk hitte-eiland op verhoogd energieverbruik (airconditioning) en op de transportinfrastructuur (schade aan o.a. spoorlijnen). Met de verwachte temperatuurstijging door de klimaatverandering zal de impact van het hitte-eiland alleen maar belangrijker worden.

In dit rapport wordt een beschrijving gegeven van de ontwikkeling en toepassing van nieuwe indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen.

Om te beginnen werd een indicator opgesteld op basis van **in-situ metingen**. Na een analyse van bestaande meetresultaten werd een indicator opgesteld voor Antwerpen, op basis van de metingen van de VITO klimaatstations in en nabij de stad. Deze *Hittegolf Graaddagen*-indicator werd gedefinieerd als de cumulatieve overschrijding van de dagelijkse minimum en maximum temperatuur boven de drempelwaarden die gebruikt worden in de definitie van een hittegolf die gehanteerd wordt door de FOD Volksgezondheid. Op deze manier is de indicator een maat voor zowel de duur als de sterkte van een hittegolf. Door de stedelijke en rurale waarden naast mekaar te leggen komt het stedelijk effect tot uiting; gebaseerd op de meetresultaten van de periode 2012-2014 bleek dat de waarde van de indicator in steden beduidend hoger is dan in landelijke gebieden. De in-situ indicator is voorlopig beperkt, in de zin dat (1) de periode met data aan de korte kant is, en (2) er slechts één stad over relevante metingen beschikt om de indicator op te stellen. Met betrekking tot het tweede puntje werd een voorstel gedaan tot uitbreiding van de metingen naar bijkomende steden.

Vervolgens werd een indicator van het stedelijk hitte-eiland opgesteld op basis van **thermisch infrarood satellietbeelden**, die het voordeel hebben gebiedsdekkend te zijn, en beschikbaar voor langere perioden. Na een verkennende analyse, waaronder een afweging tussen de ruimtelijke- en de tijdsresolutie van satellietbeelden, werd gekozen voor data afkomstig van heliosynchrone platformen, met een pixelgrootte van ongeveer 1 km. Op basis van zulke beelden werden satelliet-gebaseerde indicatoren afgeleid: de *Hot Island Area (Hot Island Population)* geeft het percentage van de oppervlakte (bevolking) in Vlaanderen in gebieden met oppervlaktetemperaturen boven bepaalde drempelwaarden. Deze indicator werd berekend voor de periode 2002-2013, waarbij duidelijk de hete zomers van 2003 en 2006 in het oog sprongen. Verder werd deze indicator gebruikt om verschillende steden in Vlaanderen met mekaar te vergelijken.

In een laatste stap werd dan een **modelgebaseerde indicator** voor het stedelijk hitte-eiland ontwikkeld. Modelleren heeft het voordeel om, naast gebiedsdekkend te zijn, toe te laten om toekomstprojecties en -scenario's op te stellen. Er werd gebruik gemaakt van het CCLM regionaal klimaatmodel, geconfigureerd met een (voor klimaatmodellen) hoge resolutie van 2,8 km, en met een recent ontwikkelde stedelijke module. De indicator die ontwikkeld werd is dezelfde dan de hierboven vermelde in-situ indicator die de *Hittegolf Graaddagen* weergeeft; echter, in plaats van te resulteren in één waarde per jaar, genereert het model kaarten met indicatorwaarden. Modelsimulaties werden toegepast op de huidige periode, en op de periode 2060-2070, met voor deze laatste periode verschillende klimaatscenario's. Verder werd de invloed van de veranderende verstedelijking in rekening gebracht. Uit deze simulaties bleek dat de verwachte stedelijke hitte-stress enorm zal stijgen in de toekomst.

Summary

The air temperature in cities is generally higher than in the nearby rural areas, a phenomenon which is referred to as the urban heat island effect. While, on average, this temperature difference amounts to a few °C, under certain circumstances it can increase to 7-8 °C and more. It has been demonstrated that, during heat waves, the additional heat stress may give rise to excess mortality in the urban population. Apart from these health effects, the urban heat island has an impact on enhanced energy use (air conditioning devices), and on transportation infrastructure (among other things, damage to railway tracks). With the projected rising temperature associated with global warming, the impact and relevance of the urban heat island is expected to further increase in the future.

The present report describes the development and application of new indicators of the urban heat island in the Flemish Region in Northern Belgium.

In a first step, an indicator was established, based on **in-situ** measurements. Following an analysis of existing observational data sets, an indicator was developed for Antwerp, using measurements acquired at VITO's climate stations in and near the city. The resulting *Heat Wave Degree Days* indicator was defined as the cumulative exceedance of the daily minimum and maximum temperature, beyond limit values prescribed by the Federal Public Service for Public Health. Thus defined, the indicator is a measure for both the duration as the intensity of a heat wave. By plotting together the urban and rural values of this indicator, the urban heat island effect emerges prominently. Using observations for the period 2012-2014, it was found that the value of the indicator is considerably higher in the city than in the nearby rural areas. It should be noted that this in-situ indicator currently is fraught with certain limitations, mainly because (1) the time period with available data is rather short, and (2) the required data are currently being measured in one city only (i.e., Antwerp). Regarding this latter restriction, recommendations were made for an extension of the measurement activities towards other urban areas.

Subsequently, an urban heat island indicator was developed based on **thermal infrared satellite imagery**, which has the advantage of providing full spatial coverage, and to be available for relatively long time periods. After an initial analysis, including an assessment of the spatial versus the temporal resolution of available data, we selected imagery from sun-synchronous satellite platforms with a pixel size of approximately 1 km as a source to establish the indicator with. Two indicators were derived from these data: the *Hot Island Area (Population)* yields the percentage of the surface area (population) in the Flemish Region experiencing land surface temperatures in excess of pre-defined threshold values. This indicator was calculated for the period 2002-2013, in which the hot Summers of 2003 and 2006 could be clearly identified. Moreover, the satellite-based indicator was employed to compare the urban heat island of different cities in the study domain.

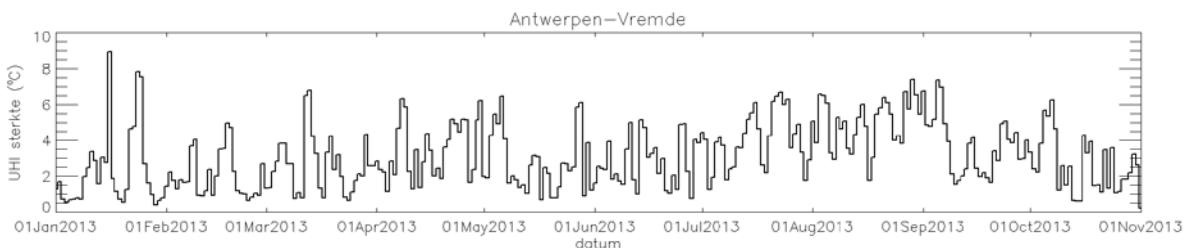
In a final step, a **model-based** indicator for the urban heat island was developed. The advantage of modelling, in addition to its full spatial coverage, is the capability to perform calculations of future projections and scenarios. Use was made of the CCLM regional climate model, configured with a high spatial resolution of 2.8 km, and containing a recently developed urban surface exchange module. The indicator developed is calculated in the same manner as the above-mentioned in-situ indicator, i.e., the *Heat Wave Degree Days*. Yet, rather than producing one value each year, the model-based approach generates maps containing the spatial distribution of indicator values. Model simulations were conducted for the present situation, as well as for the future (2060-2070), considering several climate scenarios for the latter. Moreover, the model was employed to assess the relative impact (compared to that of climate change) of urbanisation on the urban heat island effect. The main conclusion here is that urban heat stress is expected to increase drastically in the future.

Inleiding

Steden zijn gemiddeld enkele graden warmer dan de nabije landelijke omgeving. Onder bepaalde condities, met name bij lage windsnelheden en heldere hemel, kan dit temperatuurverschil oplopen tot 7-8 °C en meer, zie bijvoorbeeld Figuur 1. De oorzaken van dit stedelijk hitte-eiland zijn o.m. een verminderde koeling door evapotranspiratie (door de afwezigheid van vegetatie), het invangen van kort- en langgolvlige straling tussen gebouwen, de relatief beperkte turbulente warmte-transfer tussen het stedelijk weefsel en de atmosfeer, de hoge thermische inertie van stedelijke materialen, en het vrijkomen van antropogene warmte (uit o.a. gebouwenverwarming en verkeer). Voor verdere inleidende informatie over het verschijnsel en de mechanismen van het stedelijk hitte-eiland verwijzen we naar 'The Urban Canopy Layer Heat Island, IAUC Teaching Resources' van Gerald Mills (2004).

Hoewel het stedelijk hitte-eiland al enkele eeuwen gekend is (i.h.b. sinds Luke Howard's 'The Climate of London' van 1833), heeft dit fenomeen in recente jaren aan belang gewonnen, enerzijds door de groei van stedelijke gebieden en inwoneraantallen, anderzijds ook omdat verwacht wordt dat door globale klimaatverandering de hitte-stress in het algemeen zal toenemen. Dit is uiteraard allemaal bijzonder relevant voor het sterk verstedelijkte Vlaanderen.

Figuur 1: Dagelijkse maximum sterkte van het stedelijk hitte-eiland (stedelijk-ruraal temperatuurverschil) voor Antwerpen zoals waargenomen in de VITO meetstations in het centrum van Antwerpen en het nabijgelegen Vremde, voor de periode januari-oktober 2013



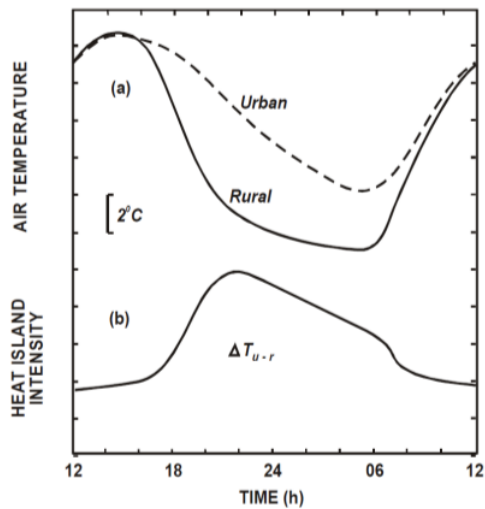
Bron: VITO

In het verdere verloop van dit rapport korten we de term 'stedelijk hitte-eiland' vaak af met zijn Engelse acroniem UHI (voor 'urban heat island'). Verder maken we gebruik van de term 'sterkte van het stedelijk hitte-eiland' of UHI sterkte, waarmee het stedelijk-ruraal temperatuurverschil bedoeld wordt.

Zoals aangetoond door metingen en modelleren doet het stedelijk hitte-eiland zich vooral gevoelen na zonsopgang, terwijl overdag het effect eerder beperkt is (zie Figuur 2). De reden hiervoor is enerzijds dat de overdracht van voelbare warmte van het stedelijk oppervlak naar de lage atmosfeer overdag niet zo drastisch verschilt van die in rurale gebieden (zie bv. De Ridder et al, 2014), ondanks het grote verschil in oppervlaktetemperatuur. Dat komt dan weer omdat, terwijl in rurale gebieden een groot deel van de beschikbare stralingsenergie wordt omgezet in latente warmte, er in steden vooral een conversie plaatsvindt van stralingsenergie naar de opslag van energie in het stedelijk weefsel, vanwege de hierboven vermelde hoge thermische inertie en de eerder lage turbulente transfer van warmte-energie tussen het stedelijk oppervlak en de lage atmosfeer. Voorts is de menglaag overdag vaak relatief diep, zodat de warmteflux van het stedelijk oppervlak sterk 'uitgesmeerd' (of 'verdund') wordt, m.a.w. de effectieve massa lucht die opgewarmd wordt door de stedelijke warmteflux is groot, met als gevolg een navenant beperkte temperatuurstijging.

's Nachts zijn er andere mechanismen aan het werk. In rurale gebieden zal er dan bij helder weer een grote uitstraling plaatsvinden aan het oppervlak richting de atmosfeer, t.t.z. het aardoppervlak zal energie verliezen door het afgeven van thermische infraroodstraling, waardoor het oppervlak afkoelt, evenals de lucht in contact ermee. In steden daarentegen wordt deze afkoeling sterk tegengegaan door het vrijkomen van de grote hoeveelheden warmte die eerder overdag opgeslagen werden.

Figuur 2: Dagelijkse gang van stedelijk en rurale temperatuur (bovenaan), en (onderaan) het verschil tussen beide

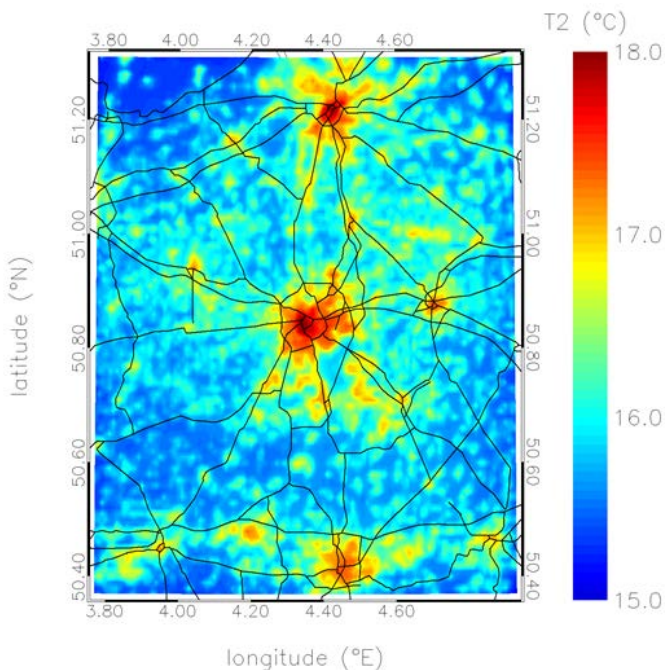


Hieruit blijkt dat het UHI effect wordt vooral veroorzaakt door een mindere afkoeling in steden gedurende de nacht.

Bron: Oke (1987)

Er bestaan tevens aanwijzingen dat het vooral de hoge nachtelijke minimumtemperaturen zijn die aanleiding geven tot gezondheidsproblemen, omdat die zouden verhinderen dat mensen, na overdag blootgesteld te zijn geweest aan hitte-stress, 's nachts voldoende rusten en dus recupereren (Grize et al., 2005; Kovats and Hajat, 2008; Dousset et al., 2011). Bij het opstellen van een indicator van het UHI fenomeen is het van belang om hiermee rekening te houden, en dus niet enkel te kijken naar de dagelijkse temperatuurmaxima, maar ook rekening te houden met de dagelijkse minima, die in steden gewoonlijk een stuk hoger liggen dan in ruraal gebied.

Figuur 3: Gesimuleerde 2-m temperatuur, gemiddeld om 23:00 lokale tijd, voor de periode mei-september 2009, voor centraal België



Brussel bevindt zich in het midden.

Bron: VITO/ESA (Urban Heat Island project)

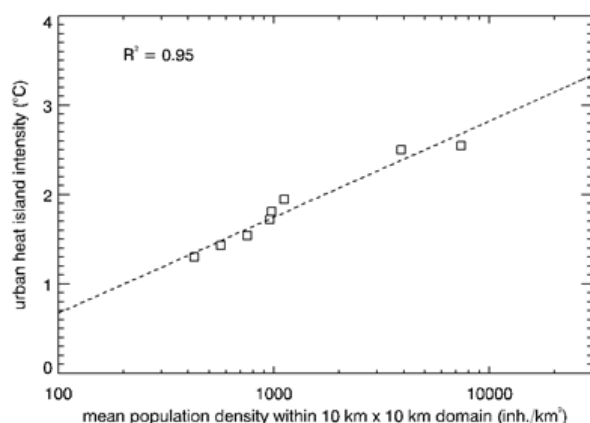
In een recente VITO studie (Aertsens et al., 2012) werd, op basis van modelresultaten, onderzoek gedaan naar het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen. Daaruit bleek onder meer dat de sterkte van het

hitte-eiland voor kleine steden relatief groot is in vergelijking met dat van grotere steden, zie Figuur 3 en Figuur 4. Zo heeft bijvoorbeeld een stad als Lier een UHI sterkte die nog ongeveer de helft bedraagt van die van Brussel, waarvan het inwoneraantal dertig maal hoger ligt.

Zoals hierboven aangehaald heeft het stedelijk hitte-eiland een invloed op de lokale volksgezondheid. Gabriel en Endlicher (2011) stelden tijdens hitte-episodes een hogere mortaliteit vast in de stad Berlijn, en dan vooral in de meest dichtbebouwde districten, in vergelijking met de omringende landelijke gebieden. Dousset et al. (2012), in een studie voor Parijs gedurende de hete zomer van 2003, vonden dat de gebieden gekenmerkt door de hoogste nachtelijke infrarood-temperatuur (zoals gemeten door satellieten) tevens de hoogste oversterfte kenden; gelijkaardige resultaten werden gevonden voor steden in de Verenigde Staten (Luber en McGeehin, 2008). In een recent overzicht van de verwachte gezondheidseffecten van klimaatverandering (Patz et al., 2014) werd het UHI fenomeen dan ook apart vermeld als een verzwarende omstandigheid bij situaties van hittestress. Langs de andere kant verwacht men wel dat de mortaliteit in de winter lager ligt in steden door de verminderde blootstelling aan koude-stress (Conlon et al., 2012).

Behalve een invloed op de gezondheid heeft het UHI fenomeen ook een belangrijke impact op andere sectoren, o.a. luchtkwaliteit (Sarrat et al., 2006; Davies et al., 2007), energie (om aan de koelingsvraag te voldoen) (Short et al., 2009), residentieel watergebruik (Guhathakurta en Gober, 2007), en (falende) infrastructuur (Wilby, 2007). Uiteraard speelt hier ook een winter-effect, zo ligt bv. de winterse warmtevraag en energieverbruik in steden lager (Hinkel et al., 2003). Voor een meer gedetailleerde analyse van de impact van het stedelijk hitte-eiland op allerlei sectoren verwijzen we naar Lauwaet et al. (2013).

Figuur 4: UHI sterkte in functie van de bevolkingsdichtheid voor een selectie van Belgische steden

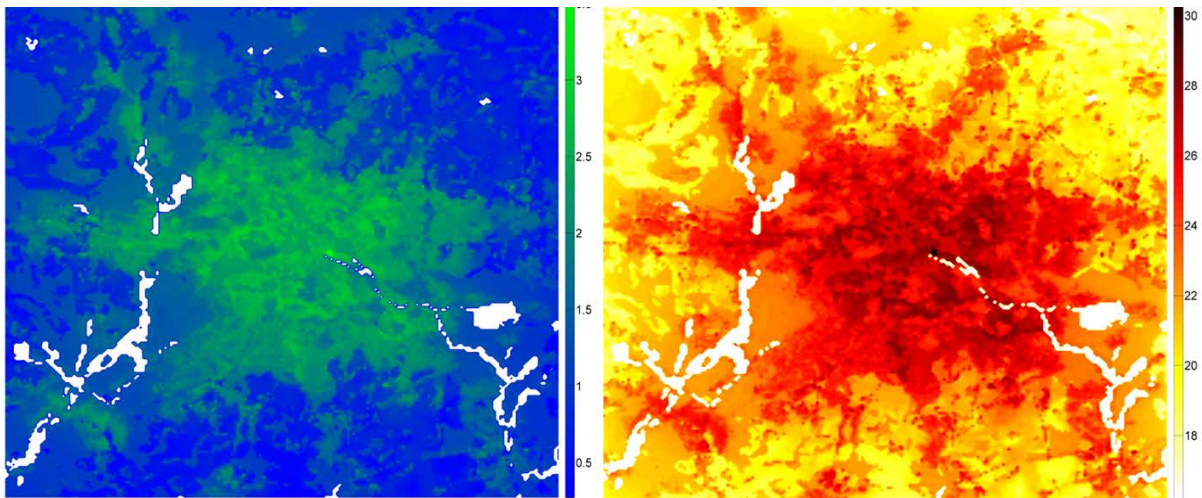


Bron: VITO/ESA (Urban Heat Island project)

Modelleringsstudies uitgevoerd bij VITO tonen aan dat het aantal hittegolfdagen in steden twee à drie keer hoger ligt dan in de nabije landelijke gebieden (Figuur 5). Echter, hittegolven en de daarbij horende maatregelen vastgelegd in het Hittegolf- en Ozonplan (FOD Volksgezondheid, 2014) worden in België officieel afgekondigd op basis van de temperatuurverwachtingen in Ukkel, waarvan de locatie niet representatief is voor de stedelijke situatie. Anders gesteld: stedelijke bewoners ondergaan regelmatig hittegolven zonder dat daarvoor adequate maatregelen worden genomen, en dat terwijl de urbane bevolking meer kwetsbare groepen telt (alleenwonende ouderlingen, slechte behuizing ...).

Een verder belangrijk aspect is dat de UHI sterkte de neiging heeft om toe te nemen tijdens hittegolven. Dit werd aangetoond voor Parijs voor de zomer van 2003 (De Ridder et al., 2011), en recent nog voor de agglomeratie Baltimore-Washington in de V.S. (Li en Bou-Zeid, 2013). De reden is dat de atmosferische condities die zich voordoen tijdens hittegolven, zoals wolkenloze hemel en lage windsnelheden, net ook de voorwaarden zijn die het stedelijk hitte-eiland bevorderen.

Figuur 5: Gesimuleerd aantal hittegolfdagen per jaar voor de regio Berlijn, voor de periode 1986-2005 (links) en 2081-2100 (rechts)



Voor de periode 2081-2100 (figuur rechts) werd gebruikt gemaakt van het IPCC scenario RCP8.5 en werd onveranderd landgebruik (i.v.m. de huidige periode) verondersteld.

Bron: VITO

Het is echter niet duidelijk of het UHI effect in de toekomst zal toenemen. Langs de ene kant zou men verwachten van wel, omdat alle klimaatprojecties wijzen op een toenemende intensiteit, duur, en frequentie van hittegolven (Schär et al., 2004; Meehl and Tibaldi 2004; Diffenbaugh and Giorgi, 2012; IPCC, 2012). Dat, in combinatie met de net vermelde tendens van de UHI sterkte om toe te nemen tijdens hittegolven, zou doen verwachten dat met klimaatverandering ook de UHI sterkte zal toenemen. Langs de andere kant wijzen stedelijke klimaatprojecties eerder op een status quo of zelfs een lichte daling van de UHI sterkte in de toekomst. Zo vonden Oleson et al. (2012) in een globaal model, met daarin een stedelijk model ingebed, dat de UHI sterkte gelijk blijft in de toekomst, wat werd verklaard door de toenemende neerwaartse langgolvlige straling als gevolg van de stijgende concentraties aan broeikasgassen in de atmosfeer. Dit effect werd in detail bestudeerd door Lauwaet et al. (2014) in een gevoeligheidsstudie over Brussel, waarbij bevestigd werd dat de toenemende neerwaartse langgolvlige straling de luchttemperaturen nabij de grond meer doet toenemen in landelijke dan stedelijke gebieden. Dat heeft te maken met de sterke temperatuurinversies die zich boven landelijk gebied – eerder dan boven steden – voordoen, en die ervoor zorgen dat de extra energie-input van deze neerwaartse straling slechts over een klein volume lucht verdeeld wordt. Dat heeft op zijn beurt te maken met de beperkte dispersieve kracht van de lage atmosfeer bij zulke sterke inversies, en geeft dus aanleiding tot een grotere stijging van de temperatuur nabij de grond in ruraal gebied.

In alle geval, zelfs bij een gelijkblijvende of dalende UHI sterkte zullen steden in de toekomst, door de globale en regionale temperatuurstijgingen, zeer waarschijnlijk toenemend geconfronteerd worden met regelmatige en extreme hitte-stress. Als men weet dat er in de zomer van 2003 in Europa tijdens de hittegolf naar schatting 70 000 hittedoden vielen (Robine et al., 2008), samen met de verwachting dat zulke episodes zich vaker zullen voordoen (Schär et al., 2004), dan is er reden tot bezorgdheid.

Een element dat hierbij ook een belangrijke rol speelt is dat van de perceptie, en het besef van het probleem van extreme hitte. Vaak wordt het hitte-eilandfenomeen lacherig afgedaan als een non-probleem, in het beste geval een gelegenheid voor extra terrasjesbezoek... Blootstelling aan hitte is natuurlijk minder 'zichtbaar' dan bij voorbeeld overstromingen of orkanen, terwijl hitte toch wel beduidend meer slachtoffers blijkt te maken (Ashley and Ashley, 2008); vergelijk bijvoorbeeld maar de 1.500 slachtoffers van orkaan Katrina van 2005 (Beven et al., 2005) met de 70 000 slachtoffers van de Europese hittegolf van 2003 (Robine et al., 2008).

Tot slot is het van belang te beseffen dat hitte-stress geen geïsoleerd probleem is, en met name bij episodes van extreem heet weer kunnen er cascades van allerlei klimaat-gerelateerde storingen ontstaan. Beschouw bijvoorbeeld het volgende potentiële scenario voor een stad tijdens een langdurige en sterke hittegolf:

- door de droogte zakt het peil van de waterlopen, waardoor de drinkwatervoorziening in het gedrang komt (of anders wel het binnenvaartverkeer);
- een drinkwatervoorziening die het laat afweten zorgt voor een mindere bedeling van water bij kwetsbare groepen (bv. alleenstaande ouderlingen), met navenante gezondheidseffecten;
- door de droogte verliezen stedelijke parken en ander stedelijk groen ook hun koelende werking (stomata van de planten sluiten, evapotranspiratie stopt);
- door de extreme hitte trekken spoorlijnen krom, geraakt het trein- en tramverkeer ontregeld, waardoor vele pendelaars en goederen niet op hun bestemming geraken;
- door de droogte en de laagwaterstand, en het resulterende tekort aan koelwater, komt ook de electriciteitsproductie in het gedrang;
- de resulterende electriciteitspannes veroorzaken problemen met koelingssystemen, o.a. in de ziekenhuizen, die ondertussen overvol geraken met hitte-slachtoffers;
- er ontstaat algemene chaos door het uitvallen van ICT systemen.

Dit mag dan een erg extreem en apocalyptisch scenario lijken, het zou wel zo verstandig zijn om zich voor te bereiden op en te wapenen tegen dit soort van situaties. (Zie trouwens ook het voorwoord in van Ypersele en Marbaix (2004) voor een gelijkaardige beschouwing.) Om te beginnen heeft het simpele feit van hittestress ernstig te nemen, en plannen op te stellen, al belangrijke voordelen. Zo zijn er aanduidingen dat de minder-dan-verwachte oversterfte in Parijs tijdens de hittegolf van 2006 voor een deel te danken was aan de verbeterde waarschuwingssystemen die zijn opgericht na de hittegolf van 2003 (Fouillet et al., 2008). Buiten 'softe' maatregelen, zoals aangepaste waarschuwingssystemen, bestaan er ook mogelijkheden om in te grijpen in de infrastructuur van een stad, om zodoende extreme hitte te temperen. Zo is er aan de KU Leuven onderzoek gebeurd naar 'water sensitive urban design' als een middel om extreme temperaturen in te perken (Coutts et al., 2012).

Echter, een eerste vereiste om zulke maatregelen op de agenda van de beleidsbeslissingen te krijgen is om het probleem onder de aandacht te brengen. We hopen in alle geval dat de 'Indicatoren voor het Stedelijk Hitte-eiland in Vlaanderen' daartoe zullen bijdragen.

In de volgende hoofdstukken beschrijven we deze indicatoren voor het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen, op basis van (1) in-situ metingen, (2) waarnemingen vanop satellietplatformen, en (3) gemodelleerde klimaatprojecties.

Deel 1 Indicator gebaseerd op in-situ metingen

Dit eerste hoofdstuk beschrijft een indicator van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen die gebaseerd is op in-situ metingen, in het bijzonder gebruik makend van de gemeten luchttemperatuur nabij de grond op ongeveer 2 m hoogte. Om te beginnen wordt een overzicht gegeven van relevante bestaande meteorologische metingen in Vlaanderen en Brussel. Dan worden enkele technische aspecten van de temperatuurmeting behandeld, met name het belang van actief geventileerde metingen. Vervolgens wordt de indicator (hittegolf graaddagen voor een stedelijk en een nabijgelegen landelijk meetpunt) beschreven. Tot slot worden suggesties gedaan voor de uitbreiding van de bestaande metingen.

1.1 Inventarisatie van bestaande metingen

In deze sectie wordt een overzicht gegeven van bestaande in-situ meteorologische metingen die (in principe althans) toelaten om indicatoren van het stedelijk warmte-eiland te berekenen. De data worden gegroepeerd volgens de organisaties die ze meten en archiveren. Telkens wordt daarbij een overzicht gegeven van het aantal en de aard van de stations, hun locaties (met name al dan niet in steden), de meetmethode, de gemeten variabelen, de beschikbaarheid (stabiliteit, kost, ...), en de periode waarvoor meetgegevens beschikbaar zijn.

Hier worden de data tevens beoordeeld op hun geschiktheid voor gebruik in de berekening van stedelijk hitte-eiland indicatoren. Die beoordeling gebeurt op basis van de volgende criteria: locatie (stations in of nabij steden), meetmethode (hoe betrouwbaar is die), beschikbaarheid (voor welke periodes zijn de data beschikbaar, en wat is hun eventuele kost).

De uiteindelijk geselecteerde indicator is enkel en alleen gebaseerd op gemeten luchttemperatuur, wat ingegeven is door de wens om consistent te zijn met de definitie van een hittegolf zoals gehanteerd door de FOD Volksgezondheid (meer details hierover later in dit rapport). Vanwege deze focus op luchttemperatuur zal in de beschrijving van de metingen in de komende secties vooral gekeken worden naar deze grootheid in het bijzonder, en andere parameters (windsnelheid, luchtvochtigheid ...) zullen slechts sporadisch aan bod komen. Annex 1 bevat een tabel waarin alle hieronder aan bod komende bronnen van gegevens beknopt opgelijst staan.

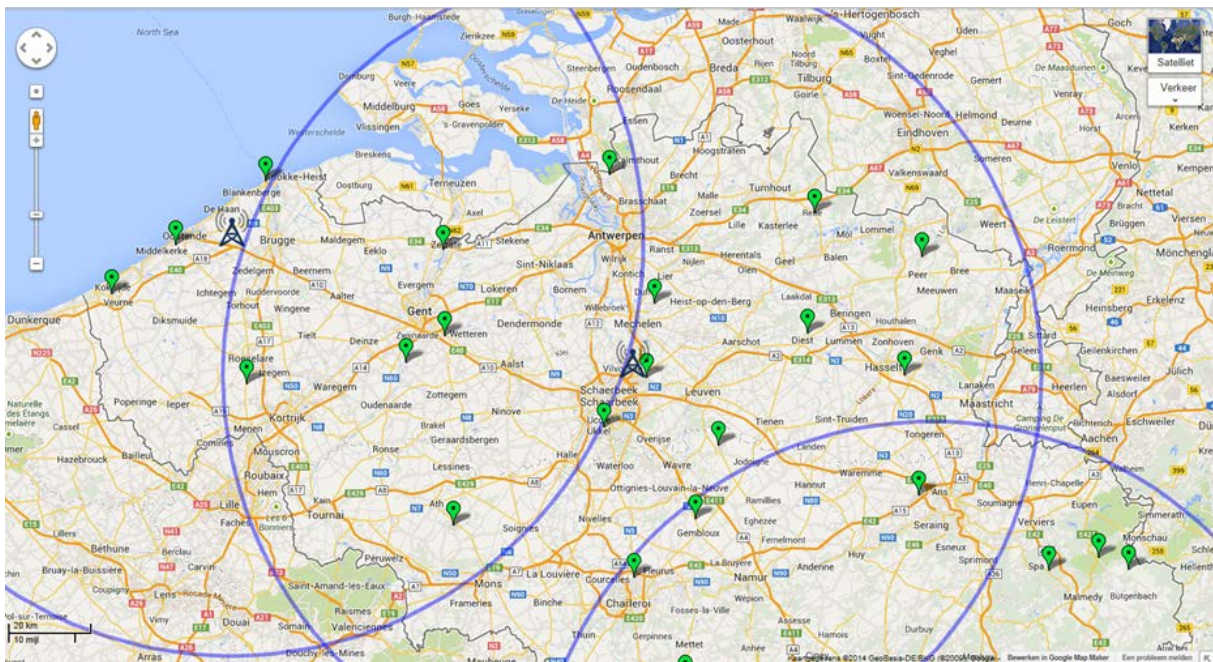
1.1.1 KMI – synoptisch waarnemingsnetwerk

Het Koninklijk Meteorologisch Instituut (KMI) meet op een operationele manier een aantal meteorologische variabelen in zijn synoptisch meetnetwerk, volgens de richtlijnen van de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO). De meetfrequentie varieert al naargelang de stations en de perioden, maar is typisch uurlijks of beter.

Temperatuur wordt gemeten hetzij in actief geventileerde stralingsschilden, hetzij in zogenaamde Stevenson weerhutten; de meethoogte bedraagt standaard 1,5 à 2 m. De meeste metingen gebeuren automatisch, en worden via een telemetrisch netwerk naar het KMI gestuurd en daar gearchiveerd.

Er zijn momenteel enkele tientallen stations beschikbaar in dit netwerk, verspreid over België. De kaart in Figuur 6 toont de positie van deze stations. Hieruit wordt onmiddellijk duidelijk dat er nagenoeg geen stations in stedelijk gebied gelegen zijn. Dat heeft te maken met de voorschriften van het WMO, die o.a. zeggen dat stations voldoende ver van obstakels dienen verwijderd te zijn, wat in een stedelijke omgeving uiteraard moeilijker te bereiken is. Voorts wil men in het synoptische netwerk temperaturen meten die representatief zijn voor ietwat grotere domeinen, en probeert men lokale effecten (zoals het microklimaat van het stedelijk hitte-eilandeffect) te vermijden.

Figuur 6: Positie van de meetstations van het synoptisch netwerk van het KMI in het noordelijk deel van België



De blauwe cirkels geven het bereik van de neerslagradars weer.

Bron: KMI

Stations in of dichtbij het Vlaams/Brussels Gewest zijn de volgende:

- KUST: Koksijde, Middelkerke, Zeebrugge
- GENT: Zelzate, Melle, Semmerzake
- ROESELARE: Beitem
- ANTWERPEN: Stabroek (sinds 2012)
- BRUSSEL: Ukkel, Zaventem
- MECHELEN/LIER: St Katelijne-Waver
- DIEST: Schaffen
- HASSELT: Diepenbeek
- KEMPEN: Retie, Kleine Brogel
- LEUVEN: Beauvechain

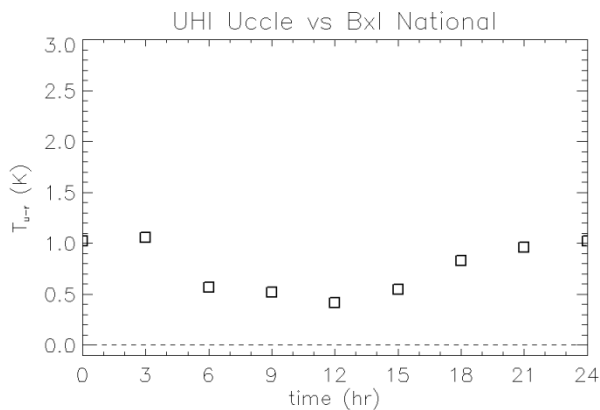
Voor de uiteindelijke evaluatie van de geschiktheid van de KMI stations is een nauwkeurige opgave van de positie nodig, om (initieel via Google Earth) na te gaan of de omgeving vrij is van obstakels (met name bebouwing) of andere elementen van het landschap die de representativiteit van het station in het gedrang kunnen brengen. De nauwkeurige posities van de synoptische stations worden om veiligheidsredenen niet in dit rapport weergegeven, maar zijn wel beschikbaar voor eventueel toekomstig gebruik. Een gedetailleerde beschrijving van de meetinstrumenten en -methodes is eveneens door het KMI aan ons ter beschikking gesteld.

Voor de meeste stations uit dit netwerk zijn lange historische tijdsreeksen beschikbaar. Hoewel stations soms van positie of meetmethode veranderen zijn de metingen eerder stabiel over lange periodes, en ook in de toekomst zullen deze metingen beschikbaar blijven. De data kunnen bekomen worden tegen betaling, de tarieven en berekeningsmethode stemmen overeen met die van Belgocontrol (zie onder, en ook Annex 2). Men moet rekenen op een kost van een dikke honderd euro per variabele per station, voor een volledig jaar aan uurlijkse data.

Data van het KMI synoptisch netwerk zijn kwalitatief zeer goed, hoewel er rekening mee moet gehouden worden dat sommige stations actief geventileerde thermometers gebruiken en andere niet. De posities van de stations en de gebruikte meetmethodes zijn in principe wel stabiel (wat uiteraard in het belang van KMI zelf is gezien zijn opdracht) en dus wat dit aspect betreft kan moeilijk beter gevonden.

Een probleem is wel dat er in dit netwerk (bedoeld) geen echt stedelijke stations zitten. Op zich is dat een logische zaak, omdat synoptische metingen per definitie representatief moeten zijn voor een eerder wijde omgeving, en die representativiteit voor de synoptische schaal (t.t.z., de schaal waarop weersystemen zoals hoge- en lagedruk gebieden zich voordoen) komt in het gedrang in het geval van stedelijke locaties. Het enige min of meer stedelijk station in het netwerk is dat van Ukkel, maar het is onvoldoende representatief voor een stedelijke omgeving. Een analyse van de gemiddelde dagcyclus in Ukkel in vergelijking met die op de luchthaven van Brussel Nationaal toont inderdaad een eerder beperkte UHI sterkte, wat niet verwonderlijk is gezien de locatie van Ukkel in de residentiële groene rand van de stad Brussel.

Figuur 7: Gemiddelde dagelijkse gang van het temperatuurverschil tussen het station van Ukkel en dat van de luchthaven van Brussel Nationaal, voor juli-augustus 2008



Bron: VITO/MACCBET project (BELSPO).

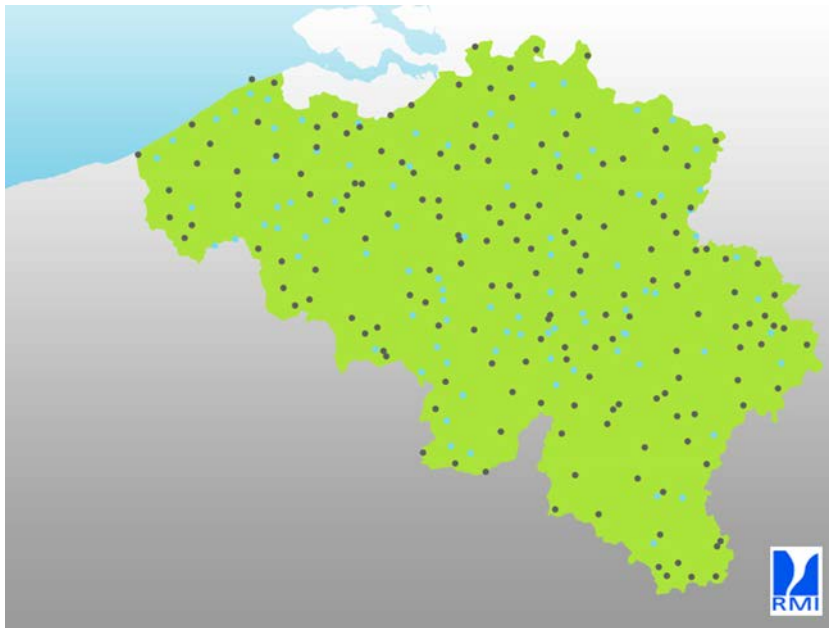
Andere KMI stations zijn dan weer wel relevant om gebruikt te worden als rurale meetposten. Melle (bij Gent), Stabroek (bij Antwerpen), St Katelijne-Waver (Mechelen & Lier) zijn voorbeelden van zulke stations. Hier dient echter telkens weer gecheckt of de stations inderdaad representatief zijn voor een rurale omgeving. Van het station Melle weten we uit ervaring dat dit meer dan waarschijnlijk het geval is (De Ridder et al., 2014). Voor andere locaties dient dit nog bekeken. Kaarten aangemaakt op basis van modelresultaten kunnen bij de evaluatie van potentiële meetsites eventueel als hulpmiddel aangewend worden.

1.1.2 KMI – klimatologisch waarnemingsnetwerk

Naast het synoptisch netwerk baat het KMI ook een klimatologisch netwerk uit. Hierin worden minder variabelen gemeten, en ook de meetfrequentie ligt lager. Zo worden voor temperatuur enkel de dagelijkse extrema genoteerd (minimum en maximum temperaturen, genoteerd om 08:00 's morgens).

De waarnemingen gebeuren door vrijwilligers, op een manuele manier, wat een risico op fouten inhoudt (bv. verkeerd afgelezen waarde), maar op het KMI gebeurt nadien wel een kwaliteitscontrole. Temperaturen worden in principe in gestandaardiseerde weerhutten gemeten, echter zonder actieve ventilatie. Met 270 stations (Figuur 8) ligt het aantal meetpunten veel hoger dan bij het synoptische netwerk. De exacte posities van de stations zijn bij het KMI beschikbaar. Er bestaat ook de mogelijkheid om van het KMI een (zij het waarschijnlijk ietwat subjectief samengestelde) lijst te krijgen met de aard van elk station (ruraal, deels stedelijk, etc).

Figuur 8: Posities van de stations in het klimatologisch netwerk van het KMI



Bron: KMI

Data zijn beschikbaar voor relatief lange perioden, tegen betaling. De kost is erg laag zolang men een bescheiden volume aan data bestelt (in het geval van twee parameters voor vijf stations, dagelijkse waarden voor een gans jaar, is er een kost van 22 euro; voor grotere volumes stijgt de prijs nogal sterk, zie ook Annex 3). Hoewel slechts een beperkte hoeveelheid data per station wordt genoteerd, is met name de dagelijkse minimum temperatuur een interessante grootheid, omdat die sterk verschilt tussen rurale en stedelijke gebieden (zie Inleiding). Verder zijn de dagelijkse minimum en maximum temperaturen die voor deze stations gearchiveerd worden precies de variabelen die nodig zijn voor het bepalen van een hittegolf volgens de definitie van de FOD Volksgezondheid (zie ook hieronder).

Nadelen van deze data in de context van hun gebruik voor het stedelijk klimaat zijn echter:

- Het ontbreken van stedelijke stations – net zoals bij de synoptische data probeert men het plaatsen van stations in specifieke microklimaten (zoals die in steden) te vermijden.
- De zogenaamd rurale stations worden vaak beïnvloed door (minder sterke, maar toch) hitte-eilandeffecten van de dorpen waar ze zich bevinden (en zoals hierboven getoond hebben relatief kleine bebouwde locaties nog een relatief sterk UHI effect).
- De onmiddellijke omgeving van de klimatologische stations is onderworpen aan veel minder strikte eisen (voor wat betreft de afstand tot obstakels bijvoorbeeld).
- Veel van de klimaatstations worden beheerd, en de data ervan uitgelezen, door vrijwilligers, wat weinig garantie geeft op de blijvende aanwezigheid van stations, en zoals gezegd is de kans op fouten ook groter.

1.1.3 Belgocontrol

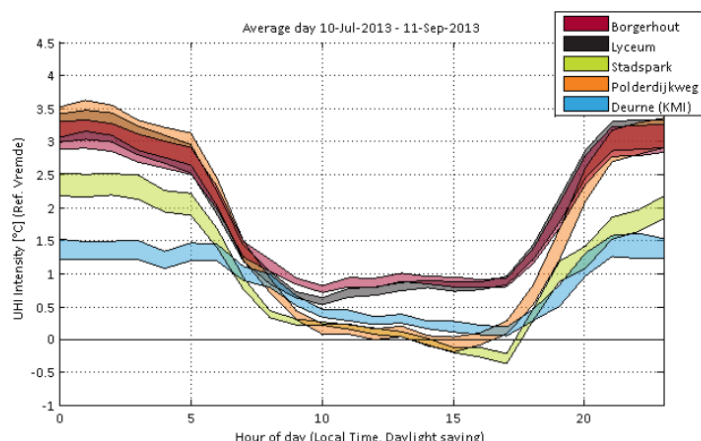
Belgocontrol beheert een aantal meetstations op Belgische luchthavens en vliegvelden, en heeft daarvoor een overeenkomst met het KMI rond data uitwisseling en prijszetting. Temperatuur wordt gemeten in een Stevenson weerhut, zonder actieve ventilatie, op de luchthavens van Zaventem, Deurne, Oostende, Luik, Charleroi, en de vliegvelden van Saint-Hubert en Spa (Tabel 1). Instrumenten zijn geïnstalleerd volgens de voorschriften van de WMO en de International Civil Aviation Organization (ICAO), o.a. obstakelvrije omgeving. Data zijn beschikbaar voor relatief lange perioden, tegen betaling. (Belgocontrol data kunnen ook bij het KMI besteld worden, in principe tegen dezelfde kostprijs.) Voor een jaar uurlijkse gegevens van één variabele voor één station komt de kost op een dikke 100 euro, meer details worden gegeven in Annex 2.

Tabel 1: Meetstations beheerd door Belgocontrol

naam	CODE	X	Y	LON	LAT
Liège	EBLG	227104.0	148878.8	5.458947	50.64544
Charleroi	EBCI	155055.8	127050.1	4.439941	50.45427
Oostende	EBOS	46453.2	211081.2	2.887215	51.20041
Antwerpen	EBAW	155799.2	209056.0	4.451711	51.19146
Brussel	EBBR	161157.5	176231.1	4.527350	50.89632
Saint-Hubert	EBSH	224148.2	81357.65	5.403842	50.03884
Spa	EBSP	259383.1	130893.0	5.909959	50.47863

De metingen van Belgocontrol komen technisch gezien redelijk overeen met de synoptische gegevens van het KMI. Het enige verschil met deze laatste is dat de stations die door Belgocontrol beheerd worden een specifieke locatie hebben, nl. luchthavens en vliegvelden. Op zich is dit potentieel interessant omdat die meestal in de buurt van steden gelegen zijn. Langs de andere kant geeft een luchthavenlocatie een beetje een noch-vis-noch-vlees situatie: de metingen op zulke een plek zijn niet echt stedelijk (want ze gebeuren meestal op of langs een uitgestrekt grasveld) maar langs de andere kant zijn de metingen ook niet echt ruraal, vanwege de nabijheid van gebouwen, en van start- en landingsbanen. Verder bevinden sommige luchthavens zich zodanig dicht bij bebouwde gebieden dat ze daardoor beïnvloed worden.

Figuur 9: Dagelijkse gang van de UHI sterkte voor de zomer van 2013 voor een aantal meetstations in het Antwerpse, ten opzichte van het rurale station in Vremde



Resultaten van het Belgocontrol station op de luchthaven van Deurne worden weergegeven door de blauwe lijn.

Bron: VITO/Stad Antwerpen (Hittekaartstudie)

In het kader van dit project zijn de metingen van Zaventem, Deurne en Oostende potentieel interessant; ze zouden dienst kunnen doen als ruraal referentiestation, hoewel enige studie vereist is om te checken of deze stations inderdaad representatief zijn voor een rurale omgeving. Zo blijkt uit een recente studie van VITO alvast dat het station op de luchthaven van Deurne karakteristieken vertoont die zich situeren tussen die van een stedelijk en van een ruraal station in (Figuur 9), wat dit station onbruikbaar maakt voor UHI monitoring.

1.1.4 Meteo Wing

De Meteo Wing meet op een aantal Belgische militaire luchthavens en vliegvelden. Daarvan liggen de volgende in of dichtbij het Vlaams Gewest: Beauvechain, Kleine-Brogel, Koksijde, Schaffen, en Semmerzake (Tabel 2). De temperatuurmetingen worden niet actief geventileerd.

In tegenstelling tot de grotere luchthavens zouden de locaties van deze kleinere vliegvelden de data in principe meer representatief moeten maken voor een rurale omgeving; zo zou bv. Beauvechain kunnen dienen als ruraal referentiestation voor Leuven. Het probleem blijft echter dat het om niet actief geventileerde metingen gaat.

Tabel 2: Meetstations beheerd door de MeteoWing (enkel die stations die in of dichtbij het Vlaams Gewest gelegen zijn)

station	ID	lat (HDDD MM SS.SS)	lon (HDDD MM SS.SS)
Beauvechain	EBBE	N50 44 44,47	E4 45 47,80
Kleine-Brogel	EBBL	N51 10 7,79	E5 27 45,71
Koksijde	EBFN	N51 5 17,10	E2 39 8,65
Schaffen	EBDT	N50 59 49,08	E5 3 43,07
Semmerzake	EBSZ	N50 56 26,03	E3 40 10,96

Noteer dat deze stations onder het SYNOPS netwerk vallen, en daardoor ook voorkomen in de lijst met synoptische stations van het KMI (zie boven). Ook de stabiliteit van de locatie, de (lange) duur van meetreeksen, etc is te vergelijken met de stations van het KMI en Belgocontrol. De data kunnen tevens via het KMI besteld worden.

1.1.5 VMM – meetnetwerk Lucht

In het kader van de metingen van concentraties van luchtverontreinigende stoffen voert de VMM Afdeling Lucht op enkele locaties ook metingen uit van meteorologische parameters.

Temperatuursensoren worden actief geventileerd, wat in principe een goede nauwkeurigheid geeft. De meethoogte van de meeste stations is 3 m, in Zwijndrecht wordt ook op een hoge mast gemeten, maar die metingen lijken minder relevant voor het opstellen van UHI indicatoren. Verder gebeuren in een aantal stations metingen van vochtigheid, en windrichting en -snelheid. Temperatuurmetingen op 3 m hoogte gebeuren in Antwerpen-Luchtbal, Gent-Tolhuiskaai, Evergem-Ertvelde, Roeselare-Haven, en Veurne-Houtem, zie ook Figuur 8 en Tabel 3. We gaan er van uit dat deze data beschikbaar zijn voor het opstellen van MIRA indicatoren.

Tabel 3: VMM Lucht meetstations waar ook meteorologische variabelen gemeten worden

naam	CODE	X	Y	LON	LAT
Antwerpen (Luchtbal)	42M802	153880	216800	4.424342	51.26108
Zwijndrecht	42H801	147625	214950	4.334747	51.24446
Gent (Tolhuiskaai)	44M701	105050	195630	3.727454	51.06906
Evergem (Ertvelde)	44M702	107560	206410	3.762007	51.16615
Roeselare (Haven)	44M705	64330	182310	3.149699	50.94476
Veurne (Houtem)	44N029	24650	191070	2.582252	51.01627
Steenokkerzeel	40SZ01	159500	178720	4.503854	50.91872

De bruikbaarheid van de huidige data is beperkt door de locatie van de meetstations: voor zover we kunnen inschatten zijn er geen echt stedelijke noch echt rurale stations in het netwerk. De meeste locaties lijken representatief voor een omgeving met industriële activiteit. Echter, de meetmethode (geventileerde temperatuurmeting), zowel als het feit dat VMM zelf deze stations beheert, maken van dit type metingen een goeie kandidaat voor extra te installeren meetposten, zie ook verder in de tekst.

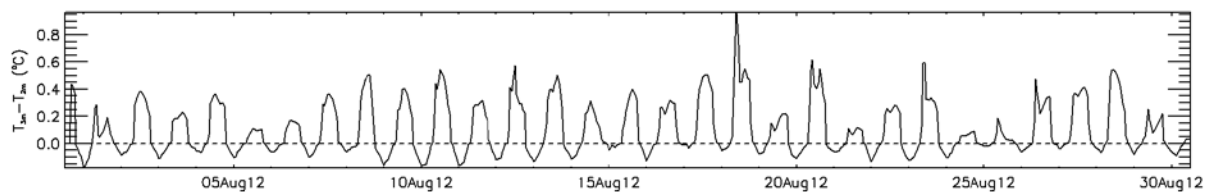
Figuur 10: Locatie van stations in het VMM netwerk Lucht waar temperatuur gemeten wordt



Bron: VMM, Luchtqualiteit in het Vlaamse Gewest - Jaarverslag Immissiemeetnetten kalenderjaar 2012

Een punt dat echter aandacht verdient is de meethoogte van 3 m, die niet overeenstemt met de standaard meethoogte (althans volgens de richtlijnen van het WMO, die 1.5-2 m voorschrijven). Dit kan potentieel problematisch zijn wanneer er zich sterke temperatuurgradiënten voordoen nabij de grond in ruraal gebied. (Dit is trouwens vaak het geval net op de momenten dat het hitte-eiland sterk ontwikkeld is).

Figuur 11: Invloed van de meethoogte (3 m versus 2 m) op de luchttemperatuur, zoals gesimuleerd voor de rurale site van Melle bij Gent, voor de maand augustus 2012



Bron: VITO

In de afwezigheid van meetgegevens van het temperatuurverschil tussen de meethoogten van 2 en 3 m, hebben we een schatting gemaakt op basis van de theorie die de verticale structuur van de onderste atmosfeerlagen beschrijft ('Monin-Obukhov surface layer similarity theory', zie bv. Garratt, 1992):

$$T_{3m} - T_{2m} = \frac{\theta_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z_{3m}}{z_{2m}} \right) - \Psi_H \left(\frac{z_{3m}}{L} \right) + \Psi_H \left(\frac{z_{2m}}{L} \right) \right], \quad (1)$$

met θ_* de schaal van de turbulente temperatuurfluctuaties, k de von Kármán constante, en Ψ_H een zogenaamde integrale stabiliteitsfunctie die afhangt van de stabiliteitslengte L (voor meer details zie De Ridder et al., 2014). Omdat deze turbulente variabelen niet standaard gemeten worden hebben we gebruik gemaakt van waarden die gesimuleerd werden voor de regio Gent zoals beschreven in De Ridder et al. (2014), en met name voor de rurale locatie van de Proefhoeve van de UGent in Melle, voor de maand augustus 2012. Het daaruit resulterende temperatuurverschil tussen de meethoogtes van 3 m en 2 m wordt getoond in Figuur 11. Hieruit blijkt dat het verschil in temperatuur het grootst is 's nachts, met waarden die oplopen tot ongeveer een halve °C. Een snelle analyse 'op zicht' leert dat deze temperatuurverschillen gelijklopen met de pieken van UHI sterkte, en overeenkomen met ongeveer 10 % ervan.

Hier dient genoteerd dat de analyse hierboven enkel bedoeld is om een grootteorde inschatting van het effect van de meethoogte te maken. Gezien turbulente warmtefluxen niet behoren tot de standaard gemeten meteorologische parameters, is deze methode weinig geschikt om op regelmatige basis correcties door te voeren van gemeten temperatuurwaarden. Idealiter zouden dus eventuele bijkomende temperatuurmetingen in ruraal gebied gebeuren op de standaard WMO-meethoogte van 2

m. Indien dat niet mogelijk zou blijken, dan dient onderzocht of de correctie zoals hierboven gemaakt kan vereenvoudigd worden, zo zou het bijvoorbeeld in principe kunnen dat de grootte van de correctie-term sterk correleert met de UHI-sterkte zelf.

1.1.6 VMM – meetnetwerk Water

De Afdeling Operationeel Waterbeheer van VMM voert eveneens meteorologische metingen uit op bepaalde locaties van zijn meetnetwerk. Luchttemperatuur wordt gemeten in Boekhoute, Zarren, Herentals, Liedekerke, Melsele, Niel-bij-St.-Truiden, Overpelt en Waregem, zie ook Figuur 12 en Tabel 4.

Tabel 4: VMM-Water meetstations waar ook meteorologische variabelen gemeten worden

naam	CODE	X	Y	LON	LAT
Boekhoute_ME	ME03_017	105304	218235	3.728299	51.27226
Zarren_ME	ME01_003	51907	191193	2.970584	51.02263
Herentals_ME	ME10_011	183364	205910	4.845708	51.16224
Liedekerke_ME	ME07_006	130730	175177	4.094898	50.88663
Melsele_ME	ME04_001	142888	214880	4.266912	51.24379
Niel-bij-St.-Truiden_ME	ME09_012	204580	158887	5.141976	50.73795
Overpelt_ME	ME11_002	224840	210877	5.439589	51.20300
Waregem_ME	ME05_019	82595	172779	3.411318	50.86149

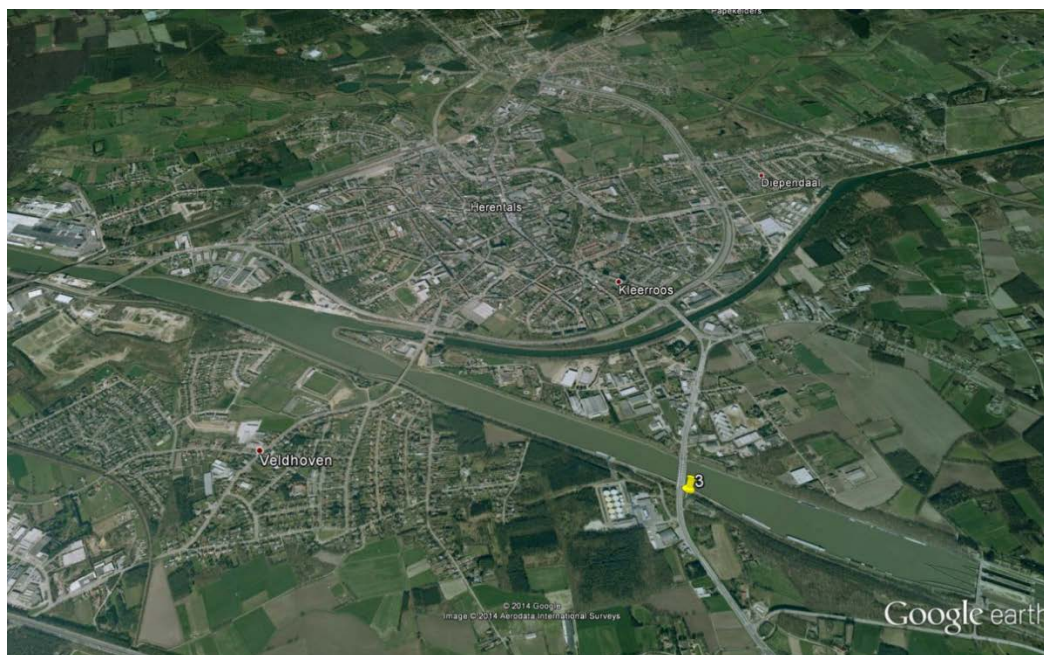
Figuur 12: Posities van meetstations in het VMM-Water netwerk waar luchttemperatuur gemeten wordt



Bron: VMM

Een analyse van de posities van de meetstations toon echter dat hun locatie meestal niet optimaal is in de context van UHI metingen. Langs de ene kant zitten er geen stedelijke stations in het netwerk, anderzijds zijn de meeste locaties echter ook niet geschikt als ruraal referentiemeetpunt. Zo is er een deel van de stations dat zich erg dicht bij wateroppervlakken bevindt (Herentals, Melsele, Zarren), wat een versturende invloed kan hebben (onvoldoende representatief voor de ruimere rurale omgeving), zie bv Figuur 13. Een belangrijk deel van de stations bevindt zich ook dicht bij bebouwing, hetzij geïsoleerde obstakels, of (vaker) woonwijken of industriegebied (Overpelt, Niel, Waregem, Liedekerke). Het station van Boekhoute lijkt qua omgeving wel in orde, maar deze locatie bevindt zich dan weer ver van een stad (bv. op 25 km van Gent). Het station Boekhoute zou in principe kunnen overwogen worden als ruraal referentiestation voor het dorp van Boekhoute, maar dat is wel erg klein (2 000 inwoners).

Figuur 13: Het station Herentals van VMM-Water



Bron: Google Earth

Op de acht meetstations gebeurt de temperatuurmeting via passieve ventilatie. De hoogte van de temperatuursensor bedraagt 1,75 m. Op drie van deze locaties (ME03_017, ME07_006, ME05_019) zijn er tevens temperatuurmetingen via actieve ventilatie, op meethoogtes van 1,75 m en 2,75 m. We gaan er in alle geval van uit dat deze data eveneens beschikbaar zouden zijn voor het opstellen van MIRA indicatoren.

1.1.7 FANC Telerad netwerk

Het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC) meet in zijn netwerk voor het monitoren van radio-actieve straling ook een aantal meteorologische parameters. Van de 130 monitoring locaties in België zijn er 13 uitgerust met meteorologische meetinstrumenten (Tabel 5); vier hiervan bevinden zich in het Vlaams Gewest (Doel, Kluizen, Poperinge, Mol).

Tabel 5: FANC meetstations waar ook meteorologische variabelen gemeten worden

					longitude (°E)	latitude (°N)
MET/C03	C03	Ch	10 m	Doische	4.736056	50.136250
MET/C08	C08	Ch	10 m	Felenne	4.860806	50.069056
MET/D00	D00	Do	30 m	KCDoel	4.250320	51.321830
MET/D05	D05	Do	10 m	Kluizen	2.738685	50.847739
MET/D13	D13	Do	10 m	Poperinge-	3.716111	51.156376
MET/F00	F00	Fl	30 m	IRE - Fleurus	4.533410	50.447380
MET/M00	M00	MD	30 m	MOL	5.091100	51.215410
MET/T00	T00	Ti	30 m	AMAY	5.317556	50.537306
MET/T01	T01	Ti	10 m	AMPSIN 1	5.272210	50.546210
MET/T07	T07	Ti	10 m	HUY2	5.230780	50.518210
MET/T09	T09	Ti	10 m	STREE	5.318020	50.508030
MET/T11	T11	Ti	10 m	HERMALLE-S-H.	5.359590	50.562240
MET/T21	T21	Ti	10 m	VIRTON	5.577420	49.578980

Metingen van temperatuur, en windrichting en -snelheid gebeuren op masten van 10 en 30 m hoog. Op de 30-m masten worden ook solarimetrische data verzameld. Het is niet duidelijk of de temperatuurmetingen geventileerd zijn of niet. Echter, de analyse van de locaties van de meetpunten leert dat deze stations niet erg geschikt zijn, noch om dienst te doen als stedelijk station, noch als ruraal referentiestation.

De potentieel interessante locaties van de stations Mol, Doel, Kluzen, en Poperinge werden nader bekeken, zie ook Figuur 14:

- Het station van Mol bevindt zich op een grasveld maar zit dicht tegen een bosrand aan.
- De meetpost van Doel (in principe relevant als ruraal referentiestation voor Antwerpen) bevindt zich erg dicht bij de infrastructuur van de kerncentrale.
- Station Kluzen is potentieel interessant voor Gent (afstand 12 km tot centrum), maar bevindt zich vlakbij een grote watermassa, dus de representativiteit van dit station is niet ideaal.
- Het meetstation van Poperinge bevindt zich aan de rand van de bebouwing, en is dus niet echt stedelijk, maar zeker ook niet ruraal.

Figuur 14: Positie van de FANC stations (gele pins) van Mol, Doel, Kluzen en Poperinge



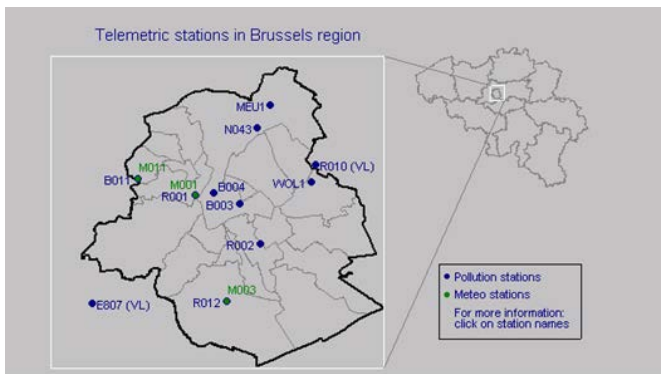
Bron: Google Earth

Volgens de contactpersoon (zie tabel in Annex 1) zijn de data zonder kosten beschikbaar. Het is echter onduidelijk hoe stabiel de beschikbaarheid van de data en de locatie van de meetposten zijn. Zoals hierboven aangehaald is de locatie van de stations (zie boven) is in alle geval niet ideaal.

1.1.8 BIM stations

Het Brussels Instituut voor Milieubeheer (BIM) voert meteorologische metingen uit op drie locaties in het Brusselse: Ukkel (bij het KMI), St Agatha Berchem, en Molenbeek (Figuur 15). Vooral dit laatste station ligt op een erg interessante locatie: hoewel relatief dicht bij een kanaal gelegen, is het station ingebed in dichtbebouwd stedelijk gebied (Figuur 16), op een voor de rest redelijk open locatie.

Figuur 15: Positie van de BIM stations van St Agatha Berchem (M011), Ukkel (M003) en Molenbeek (M001)



Bron: BIM

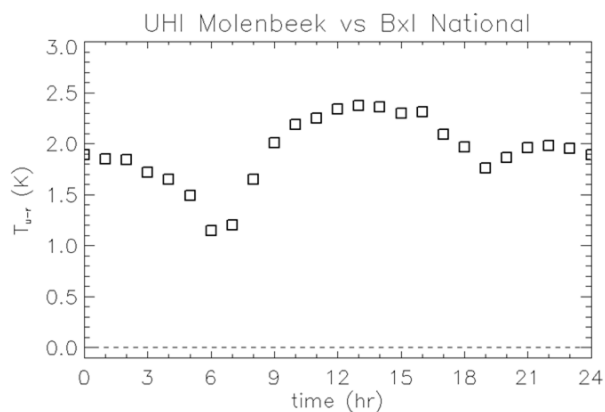
Figuur 16: Positie van het BIM station van Molenbeek



Bron: Google Earth

De temperatuurmetingen gebeuren in een actief geventileerde behuizing. Desondanks vertonen de metingen van UHI sterkte in Molenbeek (t.o.v. de KMI meting van de luchthaven van Zaventem) een dagverloop dat afwijkt van hetgeen we in andere steden vinden, met een UHI piek overdag eerder dan 's nachts. Het is onduidelijk of dit te maken heeft met de referentiemeting in Zaventem, dan wel met de meetmethode of de representativiteit van het station Molenbeek. De conclusie hier is dus: het BIM station in Molenbeek is potentieel erg interessant, en de data ervan zijn beschikbaar via het BIM, maar verdere analyse is nodig om inzicht te krijgen in de enigszins afwijkende temperatuurmetingen op deze locatie. Idealiter zou er een kleine studie dienen te gebeuren waarbij we gedurende een periode van enkele maanden in de zomer een bijkomende geventileerde sensor installeren naast die van het BIM in Molenbeek, en de meetwaarden van de twee toestellen vergelijken.

Figuur 17: Gemiddelde dagelijks verloop van het 2-m temperatuurverschil tussen Molenbeek (BIM station) en de luchthaven Brussel Nationaal (KMI station)



Bron: VITO/MACCBET project (BELSPO)

1.1.9 Semi-permanente VITO stations Antwerpen

Begin juli 2012 installeerde VITO twee meetstations in en rond Antwerpen, met als belangrijkste doel meetgegevens te vergaren voor modelvalidatie. Deze stations werden geïnstalleerd bij gebrek aan bestaande meetstations in de stad. Het vinden van de uiteindelijke locaties (Koninklijk Lyceum Antwerpen, en Bioboerderij Van Leemputten in Vremde) was een zeer tijdrovende affaire; de installatie van de stations was een logistieke uitdaging. De keuze van deze locaties gebeurde initieel op basis van kaarten (luchtfotografie / Google Earth), en vervolgens door op geselecteerde locaties veldbezoeken af te leggen. Een sterke beperking bij de bepaling van de locatie was de vereiste toegang tot een 220 V stroombron, vooral dan in het geval van de rurale locatie waar de bedoeling was om het station op minstens 100 m van bebouwing te plaatsen.

Temperatuur wordt gemeten in actief geventileerde stralingsschilden van het merk Young, met pt1000 sensoren van Campbell. De meethoogte bedraagt ongeveer 1,8 m, in overeenstemming met de WMO richtlijnen. De meetnauwkeurigheid die door de fabrikant wordt opgegeven bedraagt 0,2 °C. Een eigen studie (De Ridder et al., 2014), waarbij onze temperatuurmetingen in Melle bij Gent werden vergeleken met die van het nabijgelegen (afstand van enkele honderden meter) KMI station, gaven een verwaarloosbare bias en een verschil (in de zin van de gemiddelde kwadratische verschillen) van ongeveer 0,4 °C. Het lijkt dus correct om te concluderen dat de onzekerheid op de gemeten temperatuur in de range 0,2-0,4 °C ligt.

Luchtvochtigheid wordt gemeten in een passief (natuurlijk) geventileerd stralingsschild. Omdat bij deze vochtmeting eveneens temperatuur gemeten wordt kan er voor deze stations een vergelijking gemaakt worden tussen de actief versus passief geventileerde temperatuurmetingen (zie ook in een volgende sectie). Bovendien gebeuren er in deze stations metingen van neerwaartse kortgolvlige straling, en van de windsnelheid en -richting. Metingen van deze laatste grootheden gebeurt met een WindSonic, een 2-D ultrasone anemometer van Gill instruments. Deze heeft het voordeel van zelfs bij lage windsnelheden, zoals die vaak voorkomen in steden, nog nauwkeurig te meten. De metingen worden automatisch gelogd, en dan via een GPRS systeem (mobiele telefonie) in near-real time naar een VITO server gestuurd.

Zoals hierboven al gezegd bevat de meetopzet twee meetstations, zie ook Figuur 19. Het rurale station bevindt zich in een weide van bioboer Seger Van Leemputten in Vremde (Boechout), op een 100-tal m van een schuur. Het stedelijke station bevond zich voor de periode begin juli 2012 tot medio december 2013 in het Koninklijk Lyceum Antwerpen (KLA), in het centrale en dichtbebouwde deel van Antwerpen, meer bepaald op een 4-m hoog gebouw op de speelplaats van de school (zoals in een volgende sectie vermeld is de precieze meethoogte in de 'urban canopy' niet zo van belang). Sinds begin juli 2014 bevindt het stedelijk station zich aan de meetpost van VMM in Borgerhout, meer bepaald bovenop het 'meethok' dat zich aan de straatkant bevindt. De reden voor de verhuis van het stedelijk meetstation is dat het goede functioneren van het meetstation op deze locatie niet kon gegarandeerd worden, na een incident waarbij per ongeluk de stroomkabel van het station werd uitgetrokken. Door de verhuis zijn er twee potentiële problemen ontstaan:

- De installatie in Borgerhout is niet onmiddellijk kunnen gebeuren, zodat er een leemte in de data is ontstaan (tussen half december 2013 en begin juli 2014). Zoals in een latere sectie aangetoond wordt is het gelukkig zo dat de ontbrekende periodes de berekening van de beoogde indicator niet in het gedrang brengen (omdat deze indicator enkel berekend wordt voor erg warme episodes, waarvan er geen enkele voor kwam tijdens de periodes van ontbrekende data).
- Door het uitvoeren van de metingen op een nieuwe locatie ontstond er een potentieel probleem van data-continuïteit. Echter, tijdens de zomer van 2013 is er een tijd lang parallel gemeten geweest tussen de KLA site en de VMM Borgerhout site, en daaruit bleek dat beide meetreeksen nagenoeg geen verschil te zien gaven. Met andere woorden: de site Borgerhout lijkt representatief te zijn voor de condities die we voordien op het KLA hadden, en dus lijkt de continuïteit van de data over de verschillende jaren toch niet in het gedrang te komen.

Figuur 18: Overzicht van de instrumenten die opgesteld staan in de meetstations van VITO in en rond Antwerpen

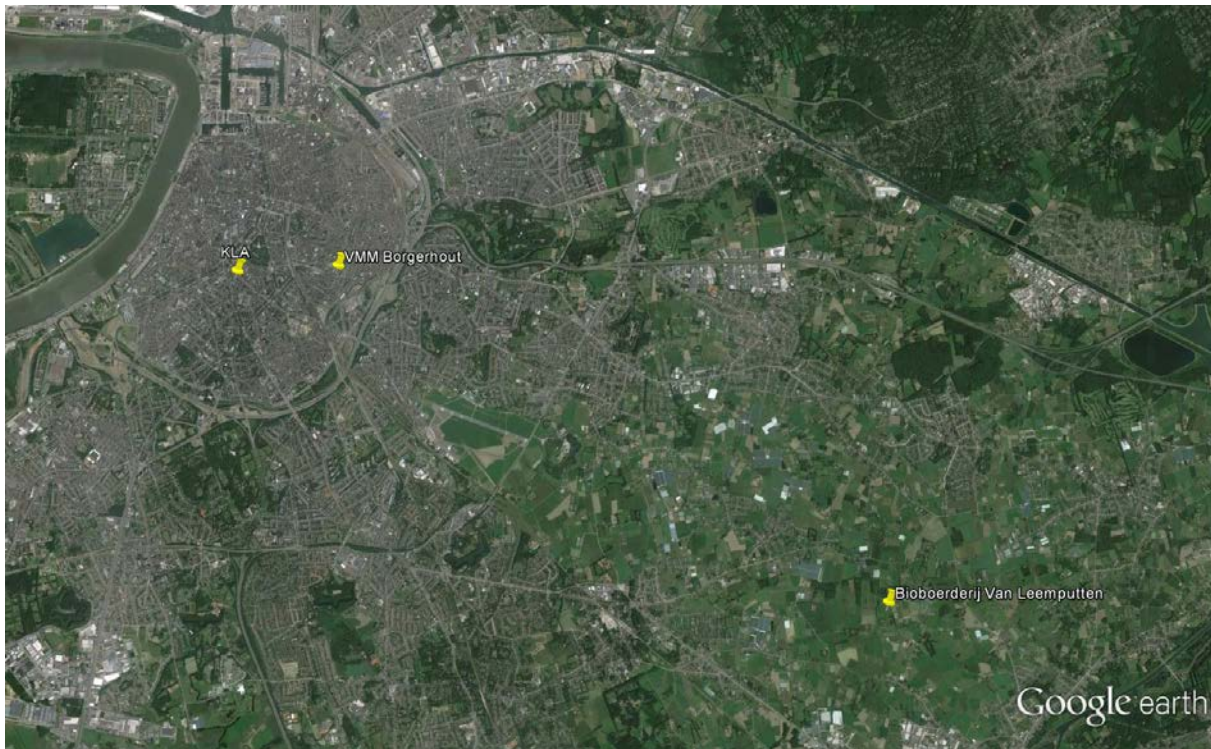


De foto toont linksboven de ultrasone anemometer, in het midden (groene 'knop') de kortgolvlige stralingsmeter, rechts de temperatuurmeting in de geventileerde behuizing, en onderaan (weerhut met de lamellen) de meting van luchtvochtigheid en passief geventileerde luchttemperatuur.

Bron: VITO

De metingen afkomstig van deze stations zijn vrij beschikbaar voor de berekening van MIRA indicatoren. De bedoeling is om de komende jaren deze stations operationeel te houden, maar er zijn wat dat betreft geen garanties. Op termijn zou het dus beter zijn indien de metingen konden overgenomen worden door een organisatie die de operationele capaciteiten heeft om langdurig hoogwaardige metingen uit te voeren, zoals bijvoorbeeld de VMM Afdeling Lucht.

Figuur 19: Positie van de VITO meetstations in en rond Antwerpen



Bron: Google Earth

1.1.10 VITO meetcampagnes Gent (2012) & Antwerpen (2013)

In de voorbije jaren heeft VITO zogenaamde hittekaart-studies uitgevoerd voor de steden Gent (2012) en Antwerpen (2013). Binnen deze studies zijn tijdelijke meetcampagnes opgezet, bestaande uit in-situ metingen

- op vaste locaties, gebaseerd op verscheidene meetpunten in en rond de stad waar een HOBO sensor met interne logging (dus geen near-real time data) werd geïnstalleerd in een behuizing met actieve ventilatie, en met een meetduur van enkele maanden;
- vanaf een mobiel platform, in casu een auto uitgerust met hetzelfde type meting als op de vaste locaties, maar voor meetperiodes van slechts enkele uren, waarbij de auto in kwestie een traject volgde in en rond de stad, om zodoende een beeld te geven van het instantane temperatuurpatroon op het moment van de meting.

Hoewel deze data zeer nuttig zijn geweest in de hittekaart-studies maakt hun tijdelijk karakter ze ongeschikt voor het berekenen van een indicator. Meer informatie over deze meetcampagnes is beschikbaar in Maiheu et al. (2013) en Lauwaet et al. (2013).

1.1.11 Hobbymeteorologen

Hoewel sommige onderzoekers (bv. Steeneveld, 2011) nuttig gebruik hebben gemaakt van gegevens afkomstig van weeramateurs, is dit geen ideale noch stabiele bron van data voor de berekening van een indicator. Hetzelfde geldt voor de gegevens van Netatmo (www.netatmo.com/weathermap): meer nog dan bij de data van weeramateurs hebben de metingen een niet-stabiel karakter (meetposten kunnen plots verdwijnen), en worden er niet-professionele methodes gebruikt bij het verrichten van de metingen. Er ontbreekt een rudimentaire kwaliteitscontrole, zo zouden sommige metingen bijvoorbeeld binnenshuis plaatsvinden. We gaan daarom niet verder in op deze bronnen van data.

Besluit van Sectie 1.1: van alle onderzochte gegevens lijken de volgende geschikt voor de berekening van een stedelijke hitte-eilandindicator:

- De VITO meetstations in Antwerpen en Vremde vormen momenteel het enige paar dat toelaat om een stedelijke hitte-indicator (zie volgende sectie) te berekenen.
- KMI meetstations kunnen dienst doen als ruraal referentiestation indien de locatie voldoende representatief is en indien de metingen op een geventileerde manier gebeuren.
- De meettechniek voor temperatuur gehanteerd door VMM Afdeling Lucht is een goede kandidaat voor nieuw op te richten meetlocaties; wel dient opgelet met de meethoogte (momenteel 3 m in plaats van de gebruikelijke 2 m).
- Het BIM meetstation in Molenbeek verdient een verdere analyse m.b.t. de geschiktheid van de locatie en de meettechniek.

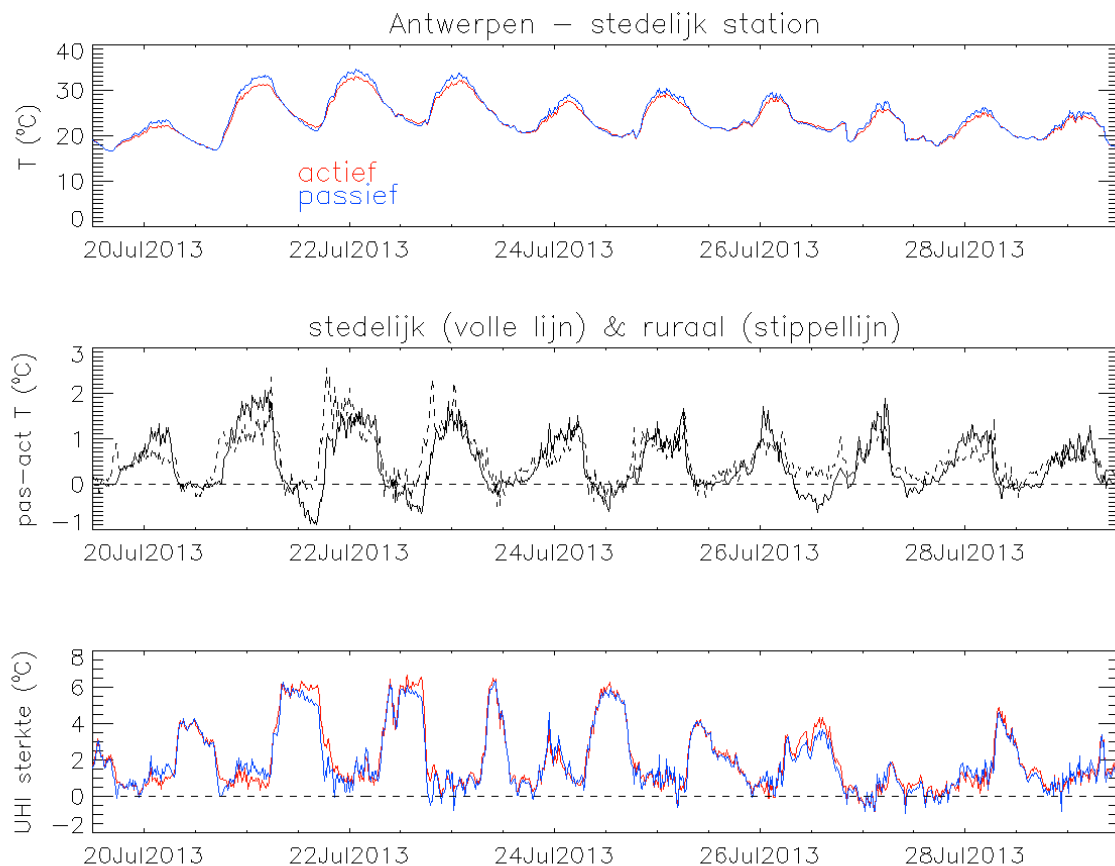
1.2 Invloed van actieve versus passieve ventilatie op de temperatuurmeting

Metingen van luchttemperatuur dienen te gebeuren in een stralingsschild. Een temperatuursensor meet namelijk zijn eigen temperatuur, en het is enkel wanneer die in evenwicht is met de temperatuur van de omringende lucht dat de sensor ook effectief dat laatste meet. De eigen temperatuur van een sensor wordt bepaald door de hoeveelheid straling (kort- en langgolvig) die op de sensor invalt, en door de mate waarin de sensor warmte uitwisselt met zijn omgeving. Het is slechts wanneer die uitwisseling van warmte tussen de sensor en de nabije lucht voldoende groot is in vergelijking met de uitgewisselde stralingswarmte, dat de luchttemperatuur gemeten wordt. Een sensor dient dus zoveel mogelijk afgeschermd te worden van invallende straling. Dat gebeurt door de sensor in een stralingsschild te plaatsen. Maar zelfs in zo'n schild kan de luchttemperatuur erg verschillen van de luchttemperatuur van de omgeving, daarom wordt ook actieve ventilatie toegepast, waarbij omgevingslucht door een elektrisch aangedreven ventilator naar de sensor in de behuizing toegezogen wordt, en zo voor een sterke transfer van warmte naar de sensor zorgt. Natuurlijke ventilatie (door de omgevingswind) wordt ook toegepast, maar is met name in steden problematisch door de lage windsnelheden in de urban canopy. Voor meer informatie over het meten van meteorologische parameters in een stedelijke omgeving verwijzen we naar Oke (2006).

De sterkte van het stedelijk hitte-eiland is gemiddeld van de orde van enkele graden Celsius. Anderzijds is geweten dat de manier waarop een temperatuursensor wordt geventileerd (actief of passief) onder bepaalde omstandigheden een impact kan hebben van dezelfde grootteorde (Richardson et al., 1999; Erell et al., 2005; Nakamura en Mahrt, 2005; Tarara en Hoheisel, 2007; Harrison, 2010). Het is dus van belang goed in te schatten wat de invloed is van de manier van ventileren op UHI indicatoren. Dat is ook van belang bij de uiteindelijke selectie van de meetstations/-methodes die voor het opstellen van een indicator kunnen gebruikt worden. De (in principe althans) meer nauwkeurige meetmethode voor temperatuur is die waarbij actief geventileerd wordt.

Hieronder beschrijven we een korte analyse van de invloed van actief-versus-passief ventileren, op basis van meetgegevens afkomstig van de VITO meetstations in Antwerpen en Vremde, waar temperatuurmetingen plaatsvinden in zowel actief als passief geventileerde thermometerhutten (zie ook de beschrijving van de VITO stations hierboven)

Figuur 20: Actief (rood) en passief (blauw) geventileerde temperatuurmeting (boven) voor de site van Antwerpen; verschilplot van passief-minus-actief geventileerde metingen (midden) voor zowel Antwerpen als Vremde, en de UHI sterkte bekomen uit passieve en actieve metingen (onder); telkens voor de periode 20-29 juli 2013

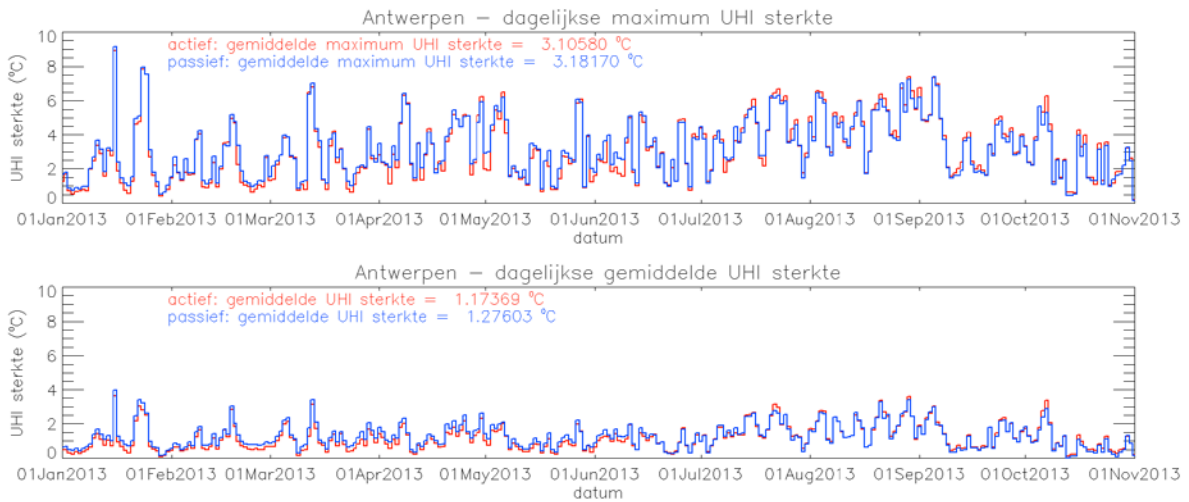


Bron: VITO

Wanneer men een tijdsreeks beschouwt zoals in Figuur 20, dan valt op dat de temperatuurverschillen tussen actief en passief geventileerde metingen al snel oplopen tot 2 °C, wat a priori problematisch zou zijn in de context van het UHI fenomeen. Echter, wanneer we kijken naar reeksen van bepaalde geaggregeerde parameters, die in aanmerking kunnen komen voor het opstellen van UHI indicatoren, blijken de verschillen tussen de actief en passief geventileerde metingen vaak mee te vallen. Zo toont Figuur 21 de dagelijkse maximum en gemiddelde UHI sterkte, geconstrueerd op basis van zowel actief (rood) als passief (blauw) geventileerde temperatuurmetingen. De dagelijkse maximum UHI sterkte, gemiddeld over de periode januari-oktober 2013, bedraagt 3,11 °C bij gebruik van actieve metingen, en 3,18 °C in het geval van passieve metingen. Dat relatief kleine verschil is waarschijnlijk deels te wijten aan compensatie (passief meten geeft meestal een overschatting in de winter maar een onderschatting in de zomer), maar zelfs wanneer men de gemiddelde kwadratische verschillen bekijkt vallen die eerder mee (0,33 °C). Voor wat betreft de daggemiddelde UHI sterkte zijn de numerieke waarden enigszins verschillend maar de conclusie is grotendeels dezelfde, t.t.z. de verschillen tussen de UHI sterktes uit beide meetmethoden zijn beperkt.

Een verdere analyse van resultaten, getoond in Figuur 20, maakt duidelijk waarom de manier van ventileren uiteindelijk een beperkte invloed heeft (althans voor de getoonde reeksen van daggemiddelde/-maximale UHI sterktes). Er zijn namelijk twee mechanismen die de invloed van de actieve/passieve ventilatie beperken. Om te beginnen is het gemeten temperatuurverschil voor beide methoden maximaal gedurende de dag, wanneer de stralingsbelasting ook het grootst is. Maar de maximale UHI sterkte doet zich voornamelijk voor ná zonsondergang, wanneer de stralingsbelasting sterk verminderd is en beide meetmethoden geen drastische verschillen vertonen. Figuur 20 toont inderdaad dat de pieken van hitte-eiland sterkte uit fase zijn met de pieken van het verschil tussen de actief-vs-passief gemeten temperaturen.

Figuur 21: Dagelijkse maximum (boven) en gemiddelde (onder) UHI sterkte, gebaseerd op metingen van de stations Antwerpen en Vremde, voor de periode januari-oktober 2013



De waarden berekend op basis van de actief geventileerde temperatuurmetingen zijn weergegeven in het rood, de passief geventileerde waarden in het blauw.

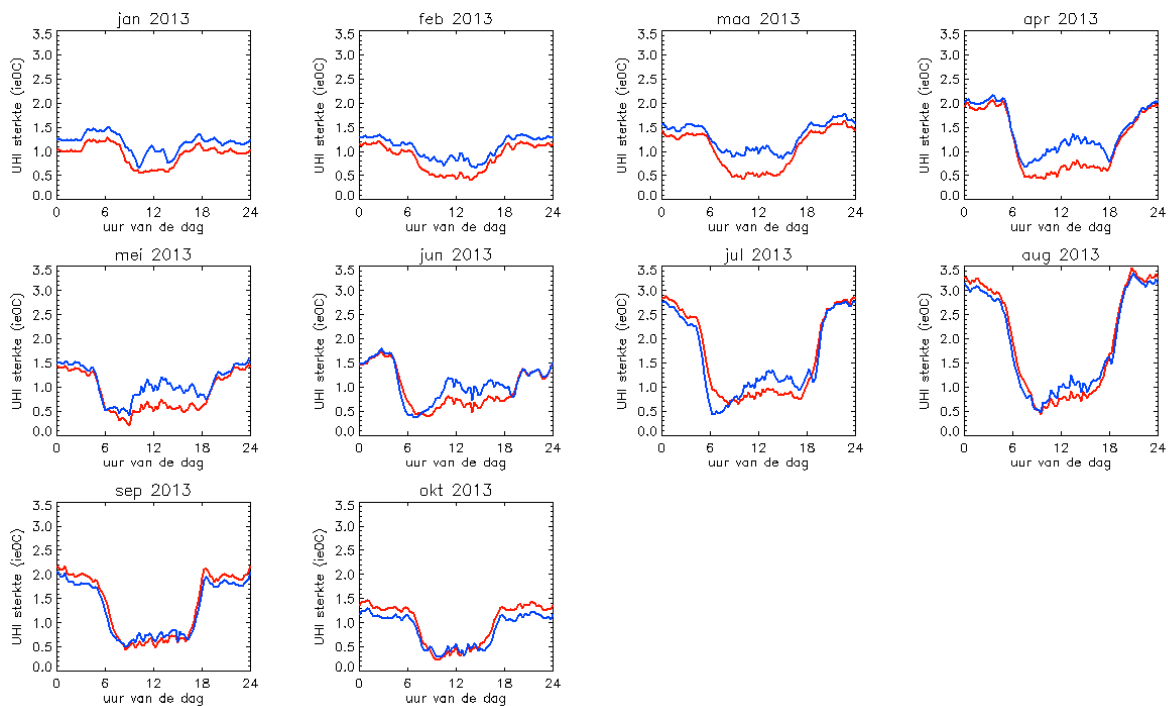
Bron: VITO

Maar zelfs voor de daggemiddelde UHI sterkte, die sterker beïnvloed wordt door de meetmethode (omdat bij de berekening ervan ook dagwaarden gebruikt worden), is de invloed beperkt. Dat komt dan weer omdat het verschil tussen actief en passief gemeten temperatuur ongeveer gelijklopend is bij de rurale en stedelijke locaties (zie middelste grafiek in Figuur 20, en vermits de UHI sterkte berekend wordt als een verschil tussen beide locaties wordt dit effect deels opgeheven in de berekening van de UHI sterkte, m.a.w. er vindt een compensatie plaats. De reden waarom de rurale en stedelijke stations ongeveer dezelfde verschillen vertonen tussen de actief en passief geventileerde metingen heeft te maken met het feit dat de condities die aanleiding geven tot grote actief-passief geventileerde temperatuurverschillen (namelijk wolkenloze hemel en lage windsnelheid) zich meestal op zowel de stedelijke als de rurale locatie voordoen, althans wanneer die zich niet te ver uit mekaar bevinden. (En vandaar ook het belang om de rurale site niet te ver van de stedelijke locatie te plaatsen.)

Hierbij zijn twee belangrijke kanttekeningen te maken:

1. Het zonet vermelde compensatie-effect geldt niet meer wanneer de sensoren van het stedelijke en het rurale station op verschillende manieren worden blootgesteld aan straling, bv. wanneer het stedelijk station op de middag in de schaduw zou komen te liggen. Vandaar ook het belang om de stedelijke sensor in de mate van het mogelijke in voldoende open terrein op te stellen.
2. Het voordeel van de compensatie tussen sensoren verdwijnt uiteraard ook wanneer men verschillende meetmethodes hanteert in de stedelijke locatie in vergelijking met de landelijke site, bv passief geventileerd in de stad versus actief geventileerd op de rurale locatie.

Figuur 22: Dagelijkse gang van de UHI sterkte voor Antwerpen-Vremde, per maand in 2013, voor de actief (rood) en passief (blauw) geventileerde temperatuurmetingen



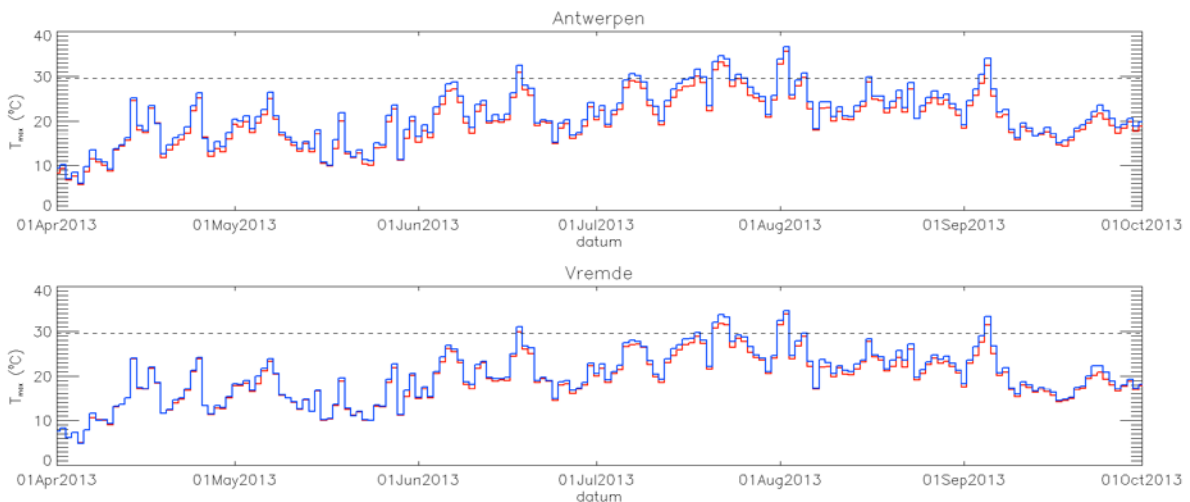
Bron: VITO

Figuur 22 toont de gemiddelde dagelijkse gang van de UHI sterkte voor Antwerpen-Vremde, per maand, en berekend op basis van zowel passief (blauw) als actief (rood) geventileerde temperatuurmetingen. Hier ook zijn de curves grotendeels gelijklopend, behalve dat in sommige maanden de waarden overdag beduidend hoger liggen in het geval van de passieve metingen.

Voor de parameters die we tot dusver hebben beschouwd lijkt dus de manier van ventileren niet zo'n enorme invloed te hebben. Wanneer we echter de dagelijkse maximum temperatuur van een individueel station beschouwen (we kijken dus niet meer naar temperatuurverschillen), en dan in het bijzonder overschrijdingen boven de waarde van 29,6 °C, de dagdrempel voor een hittegolf volgens de definitie van de FOD Volksgezondheid (zie ook volgende sectie), dan blijkt dat het al dan niet ventileren van een temperatuursensor wel een verschil maakt. Zo is Figuur 23 te zien dat het station in Antwerpen o.a. in de eerste helft van juli boven de drempel gaat in de passief geventileerde meting, maar niet in de actief geventileerde.

De situatie voor de dagelijkse minimum temperatuur (Figuur 24) is dan weer verschillend, in die zin dat de invloed van de ventilatiemethode klein is, hetgeen consistent is met eerdere opmerkingen over de kleinere impact van de meetmethode gedurende de nacht. Uit deze figuur wordt ook weer duidelijk dat de overschrijding van de drempel van 18,2 °C (nachtelijke drempel voor hittegolven) grotere verschillen vertoont tussen stad en platteland dan de overschrijding van de dagdrempel van 29,6 °C, wat in overeenstemming is met het gekende fenomeen (zie de Inleiding) dat de UHI sterkte piekt gedurende de nacht, en dat de stad meer invloed uitoefent op de minimum dan op de maximum temperaturen.

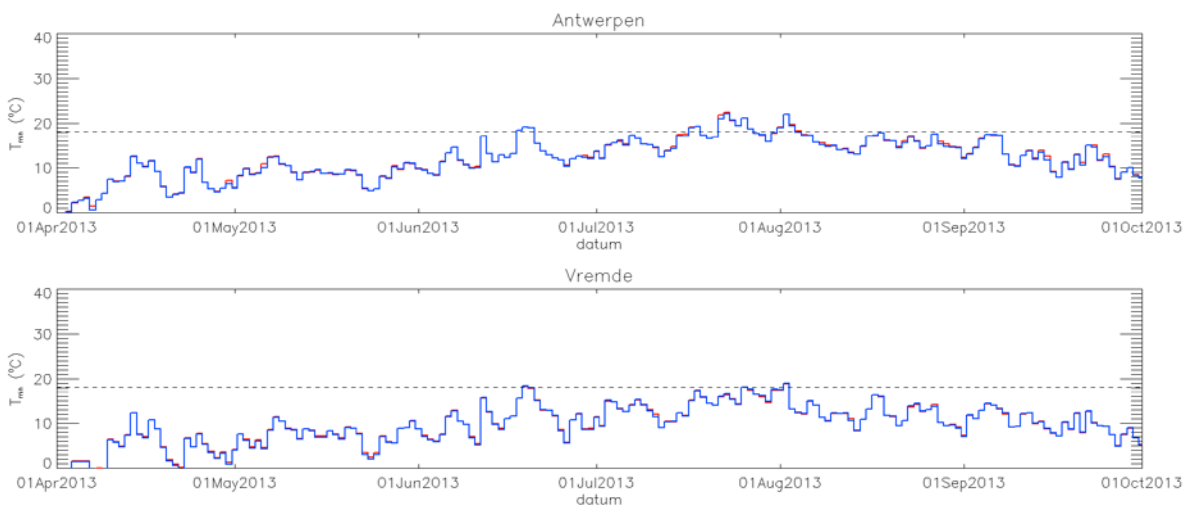
Figuur 23: Gemeten dagelijkse maximum temperatuur voor de periode mei-september 2013, voor Antwerpen (boven) en Vremde (onder), voor de actief (rood) en passief (blauw) geventileerde temperatuursensoren



De stippelijntje geeft de temperatuur van 29,6 °C weer, dit is één van de drempelwaarden die gebruikt wordt om een hittegolf te definiëren in België.

Bron: VITO

Figuur 24: Gemeten dagelijkse minimum temperatuur voor de periode mei-september 2013, voor Antwerpen (boven) en Vremde (onder), voor de actief (rood) en passief (blauw) geventileerde temperatuursensoren



De stippelijntje geeft de drempelwaarde van 18,2 °C weer.

Bron: VITO

Conclusie: wanneer enkel het stedelijk-ruraal temperatuurverschil beschouwd wordt, en bij een gelijke blootstelling aan straling van de stedelijke en rurale meetstations, kan in principe gebruik gemaakt worden van passief geventileerde metingen. Wanneer de temperaturen apart beschouwd worden voor stad en platteland, en met name wanneer overschrijdingen van bepaalde drempelwaarden beschouwd worden, dan zijn actief geventileerde metingen noodzakelijk.

1.3 Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland

Een indicator die enkel gebaseerd is op de temperatuurverschillen tussen stad en platteland, bv afgeleid uit reeksen van dagelijks maximum/gemiddelde UHI sterkte, is op zich wel interessant maar geeft onvoldoende indicaties van het al dan niet voorkomen van hitte-stress in de bevolking. (In de

winter kan de UHI sterkte ook oplopen, maar dan is er geen sprake van hitte-stress.) Het is waarschijnlijk relevanter om een indicator te zoeken die gebaseerd is op de temperatuur zelf (i.p.v. de stedelijk-rurale temperatuurverschillen), maar dan wel op een zodanige manier dat het stedelijk hitte-eilandeffect ook duidelijk tot uiting komt. Verder lijkt het ook zinvol om terug te vallen op de 'officiële' definitie van een hittegolf.

In België worden twee verschillende definities gehanteerd voor hittegolven:

- volgens het KMI: een periode met minstens vijf opeenvolgende dagen met tenminste 25 graden, waarvan op minstens 3 dagen 30 graden of meer wordt genoteerd in Ukkel.
- volgens de FOD Volksgezondheid (2014): een periode van minstens drie opeenvolgende dagen met een gemiddelde minimum temperatuur (gemiddelde over de drie dagen en niet per dag) hoger dan 18,2 °C en een gemiddelde maximum temperatuur hoger dan 29,6 °C, waarden gemeten in Ukkel.

Deze laatste definitie lijkt in de context van het stedelijk hitte-eiland relevanter. Ze zal in alle geval grotere verschillen laten zien tussen stad en platteland omdat, zoals eerder getoond, de minimum temperatuur grotere verschillen vertoont tussen stad en platteland dan de maximum temperatuur. We zullen daarom vanaf nu werken met de definitie van de FOD Volksgezondheid.

Hierbij willen we nog vermelden dat de waarden van de minimum- en maximumtemperatuur telkens op dezelfde kalenderdag genomen worden. Een alternatief zou zijn om de minimum temperatuur te nemen die gemeten wordt de ochtend (dus tevens de dag) nadat een overschrijding zich voordoet in de maximum temperatuur, maar de definitie van de FOD Volksgezondheid maakt gebruik van de waarden van de temperatuurextrema die zich binnen eenzelfde dag voordoen.

Belangrijk is ook om op te merken dat de overschrijdingen bekeken worden als een 'gemiddelde over drie dagen en niet per dag'. Zo zouden drie opeenvolgende dagen met minimum temperaturen van 16 °C, 25 °C, en 16 °C dus wel voldoen aan het (nachtelijk deel van het) criterium, hoewel twee van de drie dagen duidelijk onder de drempel van 18,2 °C zitten.

Verder kunnen er zich met bovenstaande definitie onverwachte effecten voordoen. Beschouw bijvoorbeeld vier opeenvolgende dagen met minimum temperaturen van respectievelijk 17 °C, 21 °C, 17 °C, en 17 °C. De eerste drie dagen zitten (net) boven de drempel van 18,2 °C, en zijn dus hittegolfdagen. Hetzelfde geldt voor de laatste drie dagen. Echter, wanneer men de vier dagen samen beschouwt dan ligt de gemiddelde temperatuur lager dan de drempelwaarde, en zou men kunnen besluiten dat de volle vierdaagse periode geen hittegolf is.

Het algoritme dat we gebruiken hebben, zowel bij de in-situ als bij de model-gebaseerde indicator (zie later), gaat na, voor elke dag van de periode 1 april – 30 september van het beschouwde jaar, of die dag deel uitmaakt van een periode van drie opeenvolgende dagen waarvan de gemiddelde waarden van de minimum en maximum temperaturen de drempels van 18,2 °C resp. 29,6 °C overschrijden. In het voorbeeld van de vorige paragraaf met de vier dagen zou elk van deze dagen dus als hittegolfdag gemerkt worden (althans, op basis van de minimum temperaturen, uiteraard dient tegelijkertijd het criterium gebaseerd op de maximum temperaturen voldaan zijn). Men zou kunnen denken dat de hier gegeven voorbeelden haarkloverij zijn, maar in de meetreeksen die verder in dit rapport behandeld worden hebben zulke situaties zich effectief voorgedaan.

In Figuur 23 en Figuur 24 werd reeds een voorstelling gegeven van de temperatuurdrempels van 29,6 °C en 18,2 °C, en de overschrijdingen ervan door respectievelijk de dagelijkse maximum en minimum temperaturen voor de zomer van 2013 in Antwerpen en Vremde. Bij een strikte toepassing van de definitie van een hittegolf zou het volstaan om het aantal dagen te tellen waarop de grenswaarden overschreden worden. Indicatoren die dit weergeven kunnen op een eenvoudige manier berekend worden, en zijn ook makkelijk te interpreteren en communiceren.

Dat zegt echter niets over de sterkte van de hittegolven die zich in een gegeven jaar voordoen, en 'milde' hittegolven zouden even sterk scoren als sterkere, terwijl onderzoek heeft aangetoond dat zowel de duur als de sterkte van een hittegolf een rol spelen in de effecten op de gezondheid (D'Ippoliti et al., 2010). De Europese hittegolven van 2003 en 2006 zijn een goed voorbeeld: IPCC (2012) meldt dat de hittegolf van 2006 langer was, maar dat de nachtelijke minimum temperaturen

lager waren dan tijdens de hittegolf van 2003. De oversterfte lag in 2006 dan ook een pak lager in o.m. Frankrijk, hoewel dat natuurlijk ook te maken kan hebben met het feit dat de hittegolf van 2003 geleid heeft tot meer adequate maatregelen om de bevolking te beschermen (Fouillet et al., 2008).

Met de hierboven aangehaalde argumenten in gedachten stellen we daarom een nieuwe indicator voor, die de hittestress per jaar in één cijfer samenbalt, uitgedrukt volgens het concept van 'graaddagen', en verder aangeduid met de term 'hittegolf graaddagen' (afgekort *HGD*).

De berekening van de indicator verloopt in drie stappen:

1. Op basis van de 15-minuutswaarden van gemeten luchttemperatuur (actief geventileerde meting) worden dagelijkse minimum (T_{\min}) en maximum (T_{\max}) temperaturen berekend. Dit gebeurt apart voor de stedelijke en de landelijke locatie, voor de periode gaande van 1 april om 00:00 tot 30 september om 23:45. De tijd wordt uitgedrukt in UTC+2, wat overeenkomt met de lokale tijd in België gedurende de zomerperiode.

2. Vervolgens wordt bepaald welke dagen deel uitmaken van een hittegolf, waarbij we ons . dus baseren op de definitie van de FOD Volksgezondheid (2014). Het resultaat is een vector h_i met 183 elementen (één voor elke dag in de periode 1 april tot 30 september), en met $h_i = 1$ dag indien dag i deel uitmaakt van een hittegolf, en $h_i = 0$ dagen in het andere geval. De grootte h_i heeft dus de dimensie van tijd, met eenheid van een dag.

3. In een laatste stap worden voor alle hittegolfdagen de overschrijdingen van de minimum en maximum temperaturen boven de drempelwaarden van respectievelijk 18,2 °C en 29,6 °C opgeteld in de 'hittegolf graaddagen':

$$HGD = \sum_i \left[(T_{\min,i} - 18.2 \text{ °C})^+ + (T_{\max,i} - 29.6 \text{ °C})^+ \right] h_i,$$

waarbij de som loopt over alle dagen i van de periode 1 april tot 30 september van het beschouwde jaar. De '+' symbolen die als superscript gebruikt worden wijzen erop dat enkel positieve argumenten (van hetgeen tussen ronde haakjes staat) in rekening worden gebracht; negatieve argumenten dragen niet bij tot de som. De resulterende getalwaarde voor *HGD* is een maat voor de totale duur van hittegolven in een gegeven zomerperiode, maar ook van hun gewicht, d.w.z. de mate waarin temperaturen tijdens hittegolven meer of minder boven de drempelwaarden uitstijgen. Noteer dat de eenheid van *HGD* gegeven wordt door '°C dag'.

De berekening van de hittegolf graaddagen volgens bovenstaande formule gebeurt afzonderlijk voor een stedelijk en voor een nabijgelegen landelijk meetstation. Het resultaat bestaat voor elk van de beide locaties uit één getalwaarde per jaar. Deze getallen worden samen in een grafiek uitgezet, zodat het stedelijk effect duidelijk tot uiting komt.

De eenheid voor de hittegolf graaddagen is 'graaddagen', ofwel '°C.dag'. Dit is consistent met de gangbare praktijk (zie bijvoorbeeld hierover de glossary van de American Meteorological Society, glossary.ametsoc.org/wiki/Cumulative_temperature). Deze eenheid wordt ook gebruikt in de literatuur (Coskun, 2006; Lee et al., 2014), en in publicaties van het WMO (2011). Tot slot werd in eerdere MIRA rapporten ook gebruik gemaakt van deze eenheden (Couder en Verbruggen, 2008)

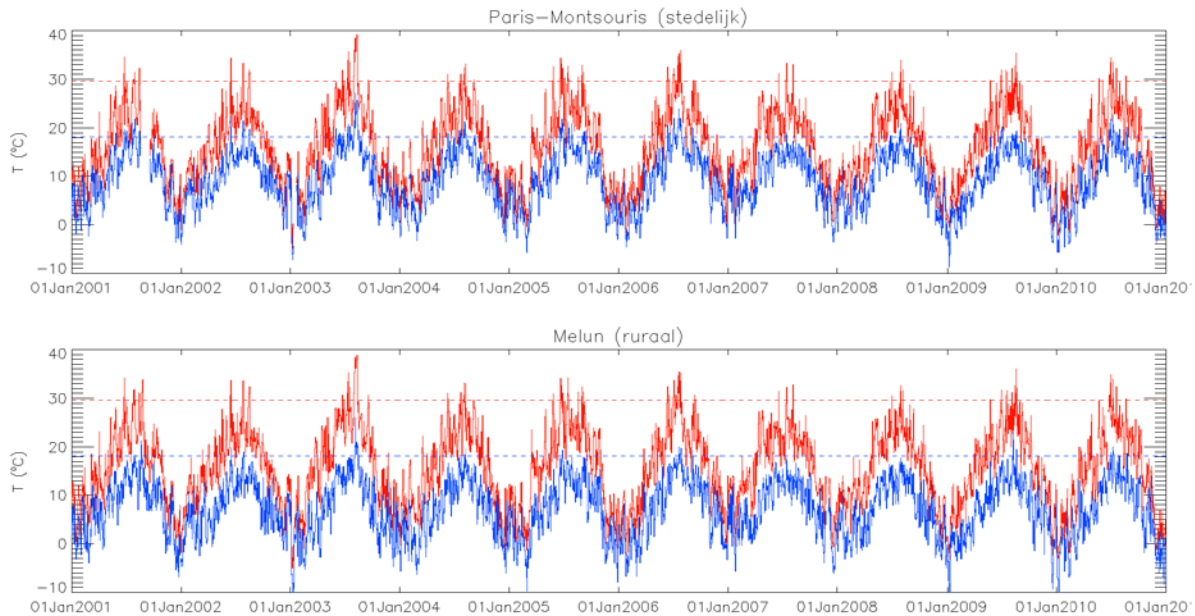
1.3.1 Analyse op basis van metingen in Parijs en Melun

Om deze indicator over een langere periode te kunnen bekijken maken we, in afwezigheid van lange meetreeksen van een stedelijk-ruraal stationskoppel in België, gebruik van uurlijkse metingen van Parijs (Montsouris station) en het nabijgelegen Melun, voor de periode 2001-2010 (Figuur 25). Parijs is natuurlijk veel groter dan om het even welke Belgische stad, maar anderzijds is het Paris-Montsouris station in een park gelegen, wat een temperende werking heeft. En inderdaad, wanneer men de gemiddelde dagcyclus van de UHI sterkte vergelijkt voor Parijs-Montsouris en Antwerpen dan liggen de gemeten waarden niet zo ver uit mekaar.

In alle geval, het voordeel van het gebruik van een langere periode is dat ze toelaat om de jaarlijkse variatie van indicatoren te exploreren. Het bijzondere aan de periode 2001-2010 is verder dat de hete zomer van 2003 erin vervat zit, die bij om het even welke indicator heel duidelijk aanwezig zou moeten

zijn. We willen wel benadrukken dat deze oefening gebaseerd op de metingen in en rond Parijs louter illustratief is. Zo is de beschikbaarheid van de data slechts uurlijks in plaats van de vereiste 4 à 6 keer per uur.

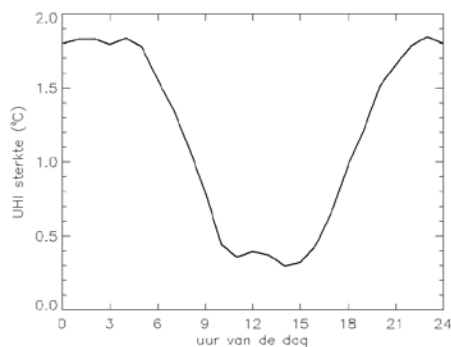
Figuur 25: Dagelijkse maximum (rood) en minimum (blauw) temperatuur voor Paris-Montsouris (bovenaan) en Melun (onderaan), voor de periode 2001-2010

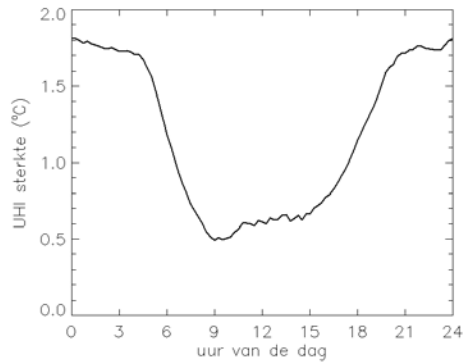


Bron: VITO

Om het principe van de hittegolf graaddagen (*HGD*) uit te leggen maken we gebruik van Figuur 27, waarin de dagelijkse maximum en minimum temperaturen staan weergegeven voor Parijs en Melun, voor de zomer van 2003. Om te beginnen checkt het *HGD* algoritme (dat we geïmplementeerd hebben in een IDL code) of een dag al dan niet een hittegolf dag is, volgens de definitie van de FOD Volksgezondheid. Zo valt de warme periode rond half juli uit de boot, want hoewel de maximum temperatuur drie dagen boven de grenswaarde blijft (zowel in Parijs als Melun), komen de nachtelijke temperaturen niet voldoende lang (en gelijktijdig) boven de grenswaarde voor T_{min} uit.

Figuur 26: Gemiddelde dagcyclus van de UHI sterkte voor Parijs-vs-Melun voor de periode 2001-2010 (boven) en voor Antwerpen-vs-Vremde voor 2013 (onder)

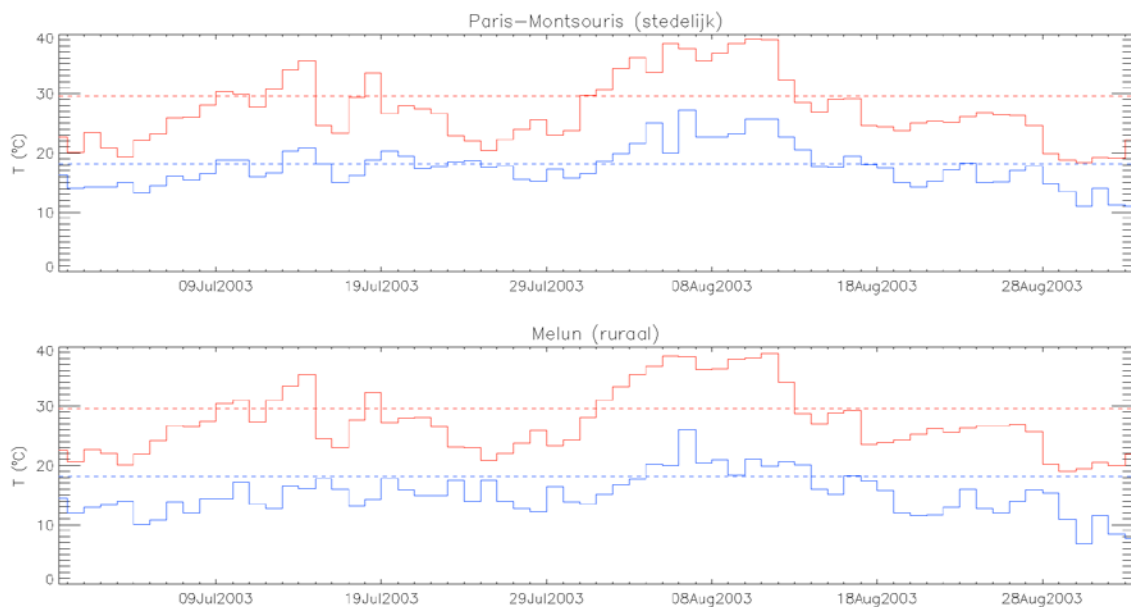




Bron: VITO

De hete periode in de eerste helft van augustus 2003 wordt duidelijk wél als hittegolf gezien, zowel in Parijs als in Melun. Terwijl de graaddagen voor T_{max} in die periode relatief weinig verschil tonen tussen beide meetpunten, is zo'n verschil wel duidelijk aanwezig in de graad-dagen voor T_{min} (eigenlijk de integraal tussen de volle blauwe curve en de stippellijn, op de dagen dat de volle curve boven de stippellijn ligt).

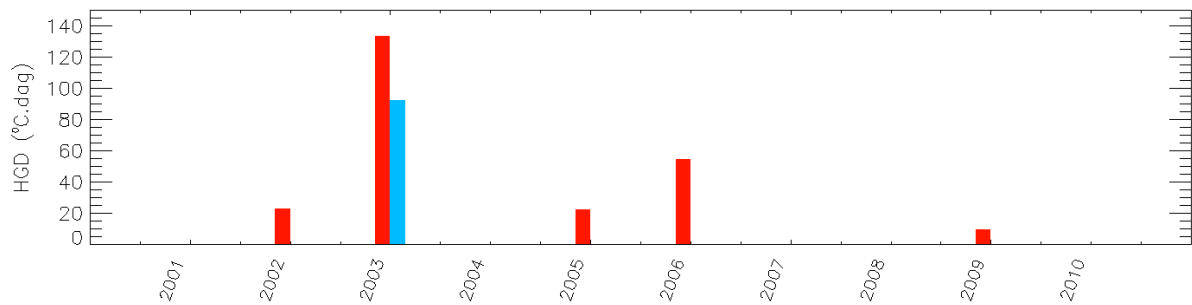
Figuur 27: Dagelijkse maximum (rood) en minimum (blauw) temperatuur voor Paris-Montsouris (bovenaan) en Melun (onderaan), voor de periode juli-augustus 2003



Bron: VITO

In deze specifieke situatie van de zomer van 2003 wordt een hittegolf teruggevonden in zowel de stedelijke als rurale metingen, maar de *HGD* bereikt een hogere score in de stad, en geeft zodoende de grotere hitte-stress daar weer. In andere jaren kan het dan weer gebeuren dat er zich enkel hittegolven voordoen in de stad, en niet op het platteland. Dat heeft dan meestal niet te maken met de hogere maximum temperaturen gedurende de dag, maar wel met het feit dat in steden de drempel van drie opeenvolgende dagen met een gemiddelde $T_{min} > 18,2$ °C vaker gehaald wordt. Figuur 28 geeft de berekende waarde weer van de *HGD*, gescheiden voor Parijs en Melun. Hieruit blijkt duidelijk het stedelijk hitte-eilandeffect.

Figuur 28: De HGD indicator voor Parijs (rood) en Melun (blauw), voor de periode 2001-2010



Bron: VITO

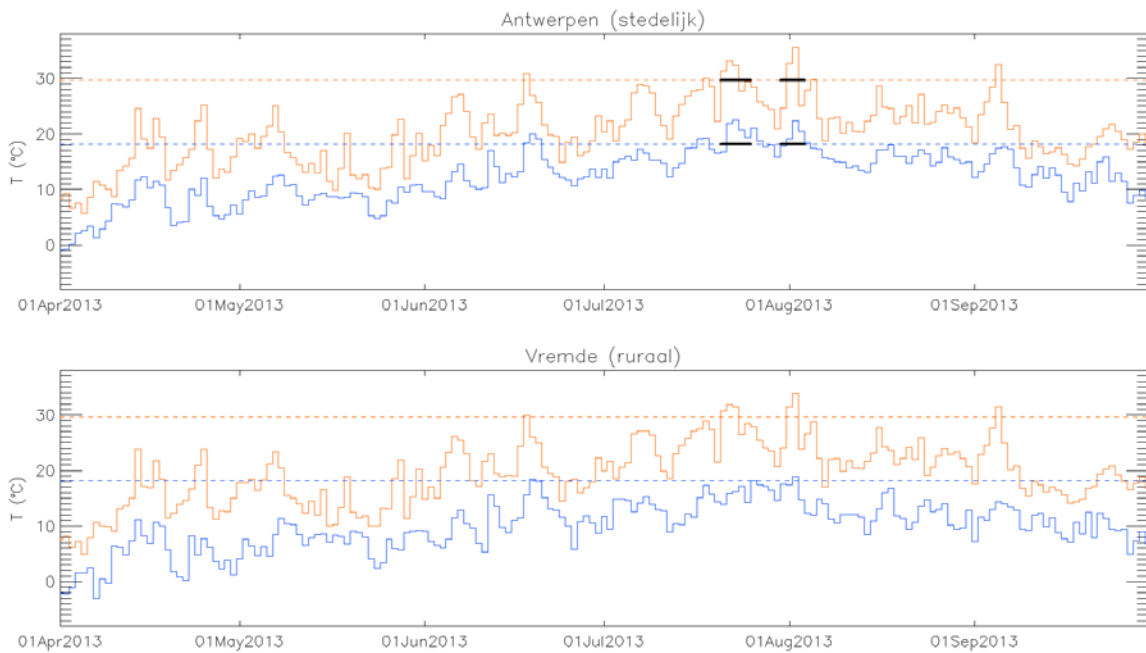
1.3.2 Indicator berekend voor Antwerpen

Op basis van de meetreeksen van de VITO station in Antwerpen en Vremde werd de HGD indicator berekend voor Antwerpen. In eerste instantie gebeurde dat voor de periode 1 april - 30 september 2013, omdat voor die periode een volledige meetreeks ter beschikking was (zie boven). De meetreeks van dagelijkse minimum en maximum temperaturen voor de stations in Antwerpen en Vremde, voor de beschouwde periode, wordt getoond in Figuur 29.

Uit deze figuur kan men al direct afleiden dat in het rurale station geen enkele hittegolf geobserveerd werd, terwijl dat wel het geval was in het stedelijk station. Het aantal hittegolf graaddagen bedroeg 0°·dag voor het landelijk meetpunt, tegen 35,85 °C·dag voor het stedelijk station.

Bij de berekening van de indicator voor 2014 was er het probleem van de ontbrekende metingen voor de periode begin april tot begin juli van dat jaar (zie boven, en Figuur 30). Om alsnog een indicator voor het jaar 2014 werd daarom gecheckt of er überhaupt wel een hittegolf kon zijn voorgekomen gedurende de periode met ontbrekende data. Er werd daarom eerst gekeken naar de metingen van Vremde gedurende deze periode. In het bijzonder werd bij de tijdsreeks met de dagelijkse T_{max} waarden van Vremde een waarde van 2 °C bijgeteld om op die manier een proxy te creëren voor de temperatuur die maximaal in het station Antwerpen verwacht zou worden. Noteer dat uit de (volledige) data van 2013 bleek dat de T_{max} waarden in Antwerpen 99 % van de tijd minder dan 2 °C hoger lagen dan de waarden in Vremde. Gebaseerd op deze procedure werd geen enkele potentiële hittegolfperiode vastgesteld in de stad. Er mag dus van uit gegaan worden dat de indicator berekend met de onvolledige data voor 2014 de correcte waarde van de indicator geeft, want die berekening wordt namelijk enkel geactiveerd voor dagen die als hittegolf gecatalogeerd staan, en daarvan ontbreken er dus in principe geen in de meetreeks voor Antwerpen in 2014. De resulterende indicatorwaarden voor Antwerpen en Vremde bedroegen voor 2014 respectievelijk 17,93 °C·dag en 7,63 °C·dag.

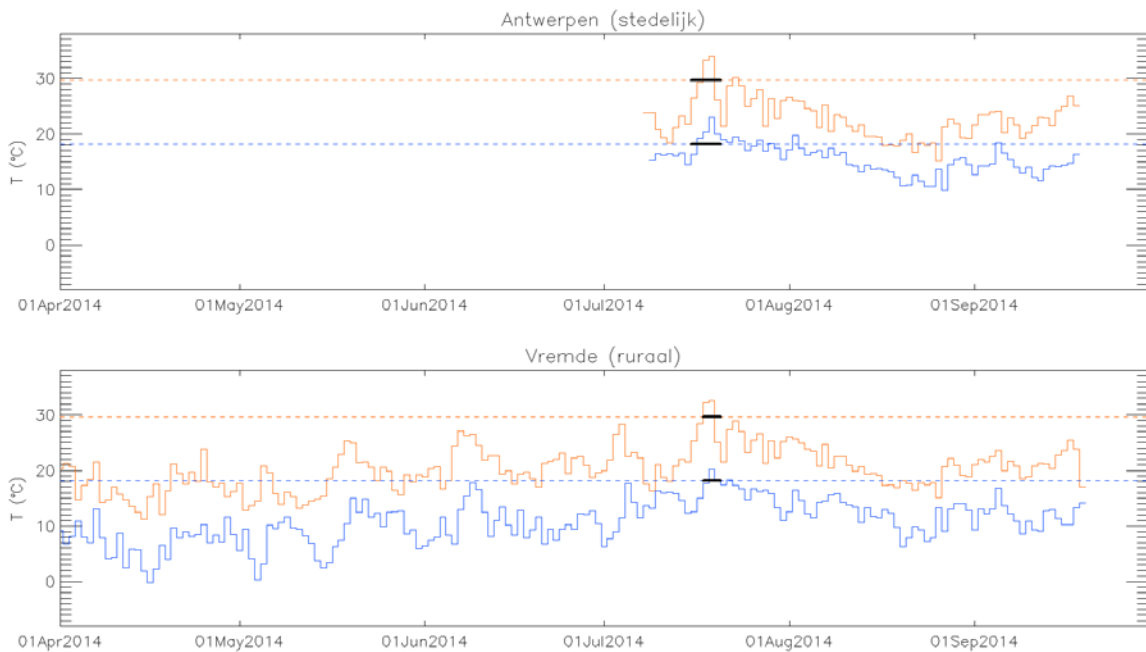
Figuur 29: Meetreeks van T_{min} (blauw) en T_{max} (rood) voor de periode 1 april - 30 september 2013, voor de stations in Antwerpen (boven) en Vremde (onder)



De zwarte balkjes duiden op periodes die volgens de definitie van de FOD Volksgezondheid hittegolfdagen zijn.

Bron: VITO

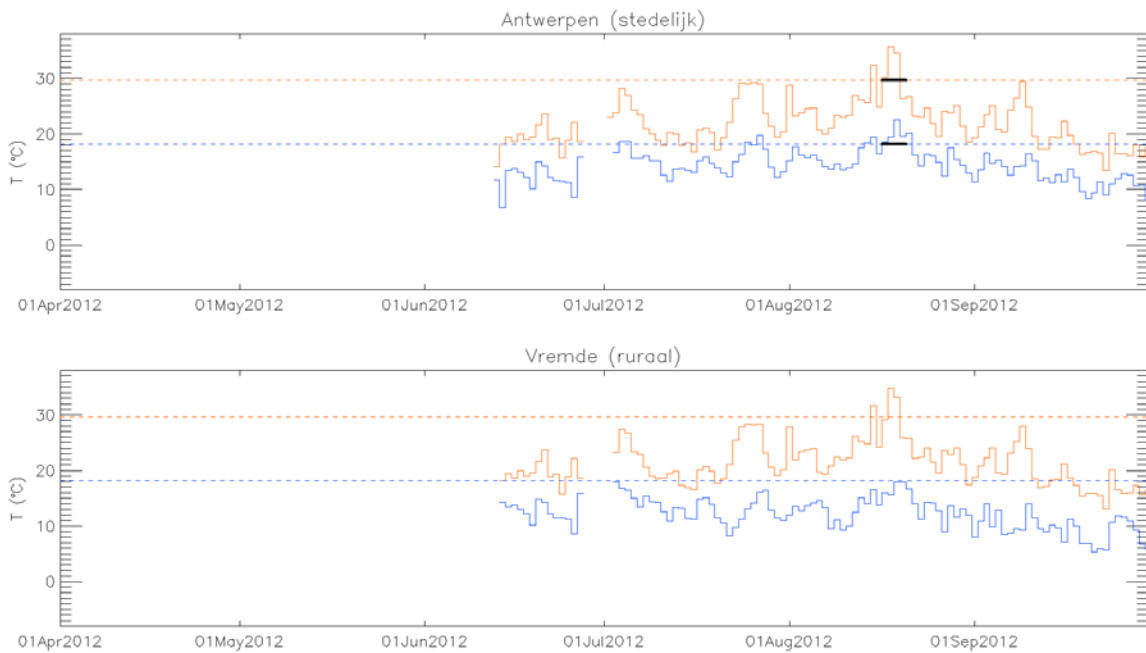
Figuur 30: Meetreeks van T_{min} (blauw) en T_{max} (rood) voor de periode 1 april - 30 september 2014, voor de stations in Antwerpen (boven) en Vremde (onder)



De zwarte balkjes duiden op periodes die volgens de definitie van de FOD Volksgezondheid hittegolfdagen zijn.

Bron: VITO

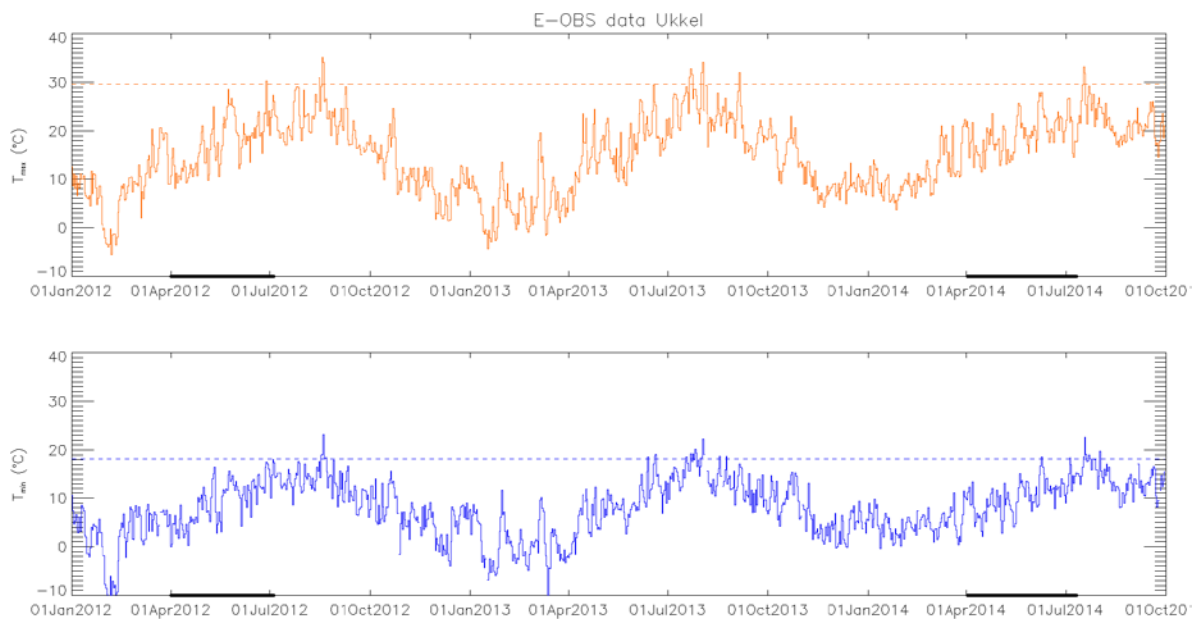
Figuur 31: Meetreeks van T_{min} (blauw) en T_{max} (rood) voor de periode zomer 2012, voor de stations in Antwerpen (boven) en Vremde (onder)



De zwarte balkjes duiden op periodes die volgens de definitie van de FOD Volksgezondheid hittegolfdagen zijn.

Bron: VITO

Figuur 32: Dagelijkse maximum en minimum temperaturen voor Ukkel, voor de periode 2012-2014



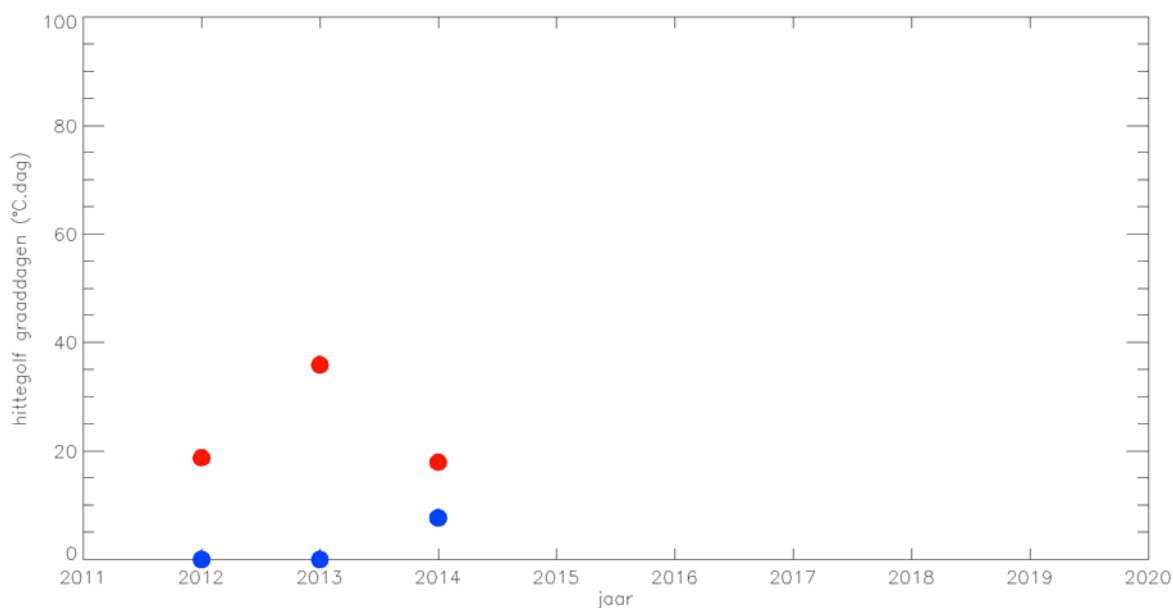
De zwarte balken onderaan komen overeen met de periodes van ontbrekende data in het VITO meetstation van Antwerpen.

Bron: VITO / data uit het E-OBS archief

Het feit dat er voor 2014, ondanks een onvolledige meetreeks, toch een indicatorwaarde kon berekend worden, suggereerde om ook het jaar 2012 op een gelijkaardige manier te analyseren. We herinneren er hier aan dat de VITO metingen in en rond Antwerpen van start gingen begin juli 2012. Het probleem was nu wel dat er ook geen metingen voor Vremde beschikbaar waren om een proxy op te stellen voor de temperaturen in Antwerpen. Daarom werd er gebruik gemaakt van dagelijkse T_{min} en T_{max} data voor Ukkel, uit het (publieke) E-OBS archief, zie Figuur 32, waarin periodes met

ontbrekende data in de VITO metingen aangeduid staan met een zwarte balk onderaan. Ukkel is redelijk representatief voor Vremde (Ukkel ligt wel wat hoger, is daardoor dus koeler, maar het ligt ook in een semi-stedelijke omgeving, en is daardoor wat warmer). Daarom werd verder dezelfde procedure toegepast als voor 2014 om (mogelijke) hittegolven te identificeren voor de periodes met ontbrekende data. Net als voor 2014 bleek ook voor het jaar 2012 dat de beschikbare meetreeksen voor Antwerpen en Vremde alle hittegolven van dat jaar bevatten, en dat de indicator dus hier ook kon berekend worden, ondanks ontbrekende data. De berekende indicatorwaarden voor de HGD in 2012 zijn 18,76 °C.dag en 0 °C.dag voor Antwerpen en Vremde, respectievelijk. De HGD indicatorwaarden voor de jaren 2012-2013-2014 worden getoond in Figuur 33.

Figuur 33: Hittegolf graaddagen: de indicator berekend voor 2012-2013-2014 voor de stedelijke locatie (rood) en de rurale locatie (blauw) in en rond Antwerpen



Bron: VITO

1.4 Strategie voor nieuw te installeren meetposten

Bij het overwegen van nieuwe meetstations is het van groot belang om representatieve locaties te vinden. De beste leidraad hierbij is het Oke (2006) rapport over meteorologische metingen in steden. Uit ervaring weten we dat een goede locatie vinden geen sinecure is: zulk een locatie moet niet enkel representatief zijn voor zijn ruimere omgeving, maar mag ook niet bereikbaar zijn voor het publiek (vandalisme), moet anderzijds wel bereikbaar blijven voor onderhoud en andere interventies, en er moet ook een reguliere stroombron (220 V) beschikbaar zijn.

Op 25 februari 2014 vond er een overleg plaats met collega's van de Afdeling Lucht van VMM in Antwerpen. De reden is dat zij metingen van luchttemperatuur uitvoeren volgens dezelfde methode als die VITO hanteert, met name met actief geventileerde stralingsschilden, weliswaar momenteel niet op locaties die bruikbaar zijn voor het meten van het UHI effect. Gezien verder het feit dat dit MIRA project gebeurt in opdracht van VMM, leek VMM ook de meest logische partner om mee na te denken over de uitbouw van het UHI meetnetwerk. Hetgeen volgt is grotendeels gebaseerd op het verslag van die bespreking in Antwerpen. Aanwezig waren Ward Roekens, Raymond Bogaert, Christine Matheussen (VMM), en Bino Maiheu, Koen De Ridder (VITO).

Eerst werd toegelicht dat in het MIRA project 'indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen', dat door VITO uitgevoerd wordt, indicatoren gedefinieerd worden op basis van in-situ metingen. Door het huidige gebrek aan stedelijke meteorologische metingen is het de bedoeling om in het MIRA project ook suggesties te doen voor extra (nieuw te installeren) meetpunten. (Momenteel laten eigenlijk enkel de VITO meetposten in Antwerpen en Vremde toe om het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen te karakteriseren.) Tijdens de bespreking werd er gekeken naar mogelijk extra

meetpunten, die gebruik zouden kunnen maken van bestaande VMM infrastructuur (meetposten & gebouwen), en die zouden moeten toelaten om voor een aantal bijkomende steden een hitte-eiland indicator te berekenen.

Hieronder wordt een lijst getoond met steden die in aanmerking komen, rekening houdend met

- voldoende diversiteit qua grootte (aantal inwoners);
- voldoende geografische spreiding (van de Kust tot Limburg);
- bij voorkeur nabijheid van KMI en/of VMM meetposten.

De tabel toont, per stad, telkens de voorgestelde posities voor het stedelijk en het ruraal station. De groen gekleurde tekst verwijst naar bestaande VMM of BIM stations, waar dus extra instrumenten zouden kunnen bijgeplaatst worden. Blauw verwijst naar bestaande KMI stations, waarvan data tegen betaling beschikbaar zijn (echter niet in real-time – tenzij er een daarover een overeenkomst met het KMI kan worden bereikt – wel voor a posteriori aanmaken van indicatoren, bv op jaarbasis). Rood duidt op volledig nieuw te plaatsen stations.

Tabel 6: Potentieel interessante locaties voor uitbreiding van het stedelijk meteorologisch observatienetwerk in Vlaanderen en Brussel

stad	# inw.	stedelijk station	ruraal station
Brussel	1 000 000	BIM station Molenbeek	VMM station St Pieters-Leeuw
Antwerpen	500 000	VMM station Borgerhout	VITO station Vremde
Gent	250 000	VMM station Gustaaf Callierlaan	KMI station Melle
Brugge	120 000	nieuw meetpunt centrum Brugge	VMM station Moerkerke
Hasselt	80 000	nieuw meetpunt centrum Hasselt	KMI station Diepenbeek
Lier	35 000	nieuw meetpunt centrum Lier	VITO station Vremde

Voor de kleinere steden bestaan o.a. de volgende alternatieven: Roeselare (60 000 inw. / ruraal station KMI-Beitem in de buurt), Leuven (100 000 inw. / te combineren met Meteo-Wing station Beauvechain), Geel of Mol (40 000 inw / ruraal station KMI-Retie nabij), Tongeren (30 000 inw.) ...

VMM meet dus zelf op een aantal punten reeds temperatuur op een manier die voldoende nauwkeurig is (met name vanwege de actieve ventilatie) voor gebruik bij het opstellen van hitte-eiland indicatoren. De meetopzet is, zoals gezegd, bijna dezelfde als die door VITO gebruikt wordt in zijn stations in Antwerpen/Vremde: pt1000 temperatuursensor in een Young actief geventileerde behuizing, data logger van Campbell. Het toevoegen van dergelijke metingen in andere VMM stations is dus in principe geen probleem. Er dient wel genoteerd dat de VMM stations van het telemetrisch netwerk gebruik maken van dure (10 keuro/stuk) custom-made computers, die de luchtmetingen aansturen. Indien een nieuw meetpunt bijgeplaatst wordt om alleen meteorologische metingen te doen is zo'n zware opstelling niet opportuun, en moet er dus een andere piste gevolgd worden, zoals telemetrie over Internet, of via GPRS.

De kost van extra meteorologische metingen aan bestaande VMM stations werd kort besproken. Het gaat hier om de hardware (orde enkele 1 000-en euro voor instrumenten die temperatuur, wind, vochtigheid meten, data logger en bevestigingsmateriaal), en de kost voor de aansluiting (250-500 euro). Verder zijn er de recurrente kosten voor calibratie (om de 6 maanden), dagelijkse verificatie van de data, etc. alles bijeen goed voor enkele (5-tal) persoon-dagen werk per jaar. Het installeren van nieuwe stations met enkel meteorologische metingen behoort a priori niet tot het takenpakket van VMM Lucht.

Verdere opmerkingen:

- Meetposten aan de luchthaven (Steenokkerzeel), zowel van VMM als van KMI en/of Belgocontrol zijn waarschijnlijk niet geschikt als ruraal referentiestation wegens te 'voorstedelijk' (vergelijkbaar met de situatie van de luchthaven van Deurne, dat zich zowat tussen stedelijk en ruraal in positioneert).

- Het VMM station in Hasselt aan het kanaal verhuist naar het BLOSO complex aldaar, maar die locatie is niet zo geschikt als stedelijk station dan die van de VMM gebouwen aan de ring.
- VMM voert in Brugge (Stijn Streuvelstraat) metingen uit met een Leckel, maar die is al verscheidene keren van positie veranderd, en heeft ook geen telemetrie, dus minder geschikt als positie voor een Brugs stedelijk station. Langs de andere kant is er wel een stroomvoorziening, dus als er een oplossing voor de telemetrie kan gevonden worden zou dit toch nog een potentieel interessante locatie kunnen zijn.
- In Antwerpen komen er 4 meetstations bij (metingen van PM₁₀, NO_x, BC ..., de helft ervan gefinancierd door de stad) ihkv de monitoring voor de Low Emission Zone (LEZ) die er daar gepland is. De overeenkomst is momenteel voor 3 jaar, maar de bedoeling is wel dat dit min of meer permanente stations zouden worden. Stations zijn o.a. voorzien aan de Leien, de Ring, en verder een achtergrondstation. We zouden bij deze graag suggereren om deze stations meteen maar met meteorologische meetinstrumenten uit te rusten. Vanuit Stad Antwerpen is er in alle geval interesse voor het thema van het hitte-eiland.
- Bedenking: het lijkt belangrijk om, bij installatie van nieuwe instrumenten, telkens een test uit te voeren waarbij de rurale en stedelijke instrumenten een tijdje op dezelfde plek draaien (bv stedelijk station tijdje naast ruraal station plaatsen), om inzicht te krijgen in bias etc. Dit lijkt vooral van belang wanneer het gaat om verschillende types van meetinstrumenten (KMI vs VMM, etc).
- De VMM meetposten hebben (nog) geen toegang tot het internet, maar sturen hun data via analoge modems door. Dit is niet onbelangrijk voor het eventueel uitrollen van eigen (VITO) instrumenten. Toegang tot internet is wel gepland voor de toekomst.
- VMM gebruikt identiek dezelfde actief geventileerde stralingsschilden als VITO (Young's aspirated radiation shield type 43502). Ook de RTD probes zien er heel gelijkaardig uit. VMM gebruikt verder ook onder meer ook de Campbell CR-reeks dataloggers.
- VMM werkt via Koenders instruments (<http://www.koenders-instruments.com/>) die onder meer ook de Campbell hardware aanleveren met installatie en mogelijks ook een service contract.
- Het investeringsbudget van VMM voor 2014 ligt reeds vast, maar voor 2015 kan gekeken worden wat mogelijk is.

Aan het eind van dit onderzoeksproject raakte ook bekend dat in een groot aantal stations van het VMM meetnetwerk Lucht sinds kort ook temperatuur wordt gemeten in een actief geventileerde behuizing, in de zogenaamde FIDAS-monitoren. Zoals eerder in dit rapport aangegeven zijn actief geventileerde metingen het meest geschikt voor metingen van het stedelijk hitte-eiland. Die metingen gebeuren met een Lufft-weerstation (type WS300-UMB; zie www.lufft.com/en/products/all-in-one-sensors/ws300-umb-smart-weather-sensor-8372u01/). De lijst met stations waar zulke metingen gebeuren (zie Annex 4) werd geïnspecteerd om de geschiktheid van de locatie van elk station te evalueren. Een station is interessant in de context van het stedelijk hitte-eiland indien het ofwel puur stedelijk, ofwel puur landelijk is. De meeste van de stations voldoen hier niet aan, omdat ze gelegen zijn nabij industriegebied of woonwijken, zonder echter als 'stedelijk' station in aanmerking te komen.

De volgende stations hebben mogelijk potentieel:

- 40AB02 en 42R831 (beide in Berendrecht) zouden eventueel in aanmerking komen als landelijk station voor de Antwerpse regio. De Berendrechtse stations bevinden zich echter erg dicht bij woonwijken en relatief dicht bij de haven en de industrie. Om de geschiktheid ervan na te gaan zou een tijdsreeks van gemeten temperatuur (of eventueel de in-situ indicator zelf) kunnen vergeleken worden met de metingen van Vremde.
- Metingen van de stations 42R801 en 42R802 aan de Plantijn en Moretuslei in Borgerhout zijn mogelijk interessant. De locatie is in alle geval representatief, en VITO voert hier sinds 2014 ook zijn klimaatmetingen uit, wat het bijkomend voordeel heeft dat meetreeksen direct met mekaar kunnen vergeleken worden.
- 40RL01 (Roeselare): zou in aanmerking kunnen komen als stedelijk station (voor een kleinere stad dan), hoewel dit station niet echt centraal gelegen is.
- 42N054 (Walshoutem): ligt op 12 km van St-Truiden, en zou daarvoor als landelijk achtergrondstation kunnen dienen. Dit meetpunt bevindt zich echter midden in velden waar in de zomer geroid/geogst wordt, wat betekent dat er veel blote grond in de omgeving is (een omgeving van grasvelden ware beter geweest).

- 44N012 (Moerkerke): rurale achtergrond voor Brugge, maar eveneens tussen de velden, dus situaties met blote grond in de zomer kunnen hier ook de metingen verstoren.
- 44R701 en 44R702, beide in Gent gelegen: potentieel interessante stedelijke locaties, hoewel de lokale effecten van groenpartijen (bv Baudeloo Park) dient geverifieerd.
- 44R740 (Sint-Kruis-Winkel) is te checken als landelijk achtergrondstation voor de regio Gent. Het station ligt wel redelijk dicht bij een woonwijk (300 m) en de haven (1 km).

In gevallen waarbij, voor een gegeven stad, gebruik zou gemaakt worden van verschillende types meetinstrument op de landelijke versus de stedelijke locatie, dient wel gecheckt te worden of de instrumenten onderling vergelijkbaar zijn. Dit kan gebeuren door ze een tijdje op eenzelfde locatie te laten meten, en de resultaten ervan te vergelijken.

Tot slot van deze sectie: in het kader van de uitbreiding van de metingen is er contact geweest met de steden Hasselt (Joost.Venken@hasselt.be), Brugge (caroline.van.der.steen@brugge.be), en Lier (katrien.dewel@lier.be). De gecontacteerde personen willen uiteraard meer informatie alvorens zich te engageren voor het aanleveren van locaties, stroombronnen, etc, maar ze stonden allen a priori wel open om mee te werken aan de installatie van een klimaatstation in hun respectievelijke steden.

Deel 2 Indicator gebaseerd op satellietmetingen

2.1 Inleiding

Naast in-situ metingen van luchttemperatuur zijn satelliet waarnemingen een tweede beschikbare bron van onafhankelijke temperatuurmetingen. Heel wat satellieten zijn uitgerust met infrarood sensoren die het mogelijk maken de thermische straling afkomstig van het aardoppervlak te registreren. Op basis van de karakteristieken van die straling (intensiteit, golflengte) kan men een inschatting maken van de temperatuur van het oppervlak dat de straling uitzond. We dienen hier dus vanaf het begin al duidelijk te maken dat we letterlijk spreken over de oppervlaktetemperatuur (met spreekt ook van Land Surface Temperature of LST) en niet de luchttemperatuur. De oppervlaktetemperatuur betreft de temperatuur van elk oppervlak dat zichtbaar is door de satelliet sensor, m.a.w. de straatstenen, muren, daken, bladtemperatuur enz. Dit in tegenstelling tot de luchttemperatuur wat de temperatuur van de lucht is, typisch op zo'n 2 m boven het oppervlak. Dit is een belangrijk onderscheid dat duidelijk gemaakt dient te worden om misinterpretatie van de resultaten tegen te gaan. Oppervlakte – en luchttemperatuur (en bijgevolg het overeenkomstige hitte-eiland effect) verschillen sterk in de manier waarop ze tot stand komen, de technieken om ze te identificeren, de gevolgen en in zekere mate ook de beschikbare methoden voor mitigatie (US-EPA 2013). Voor oppervlakte hitte eilanden spreekt men typisch van het 'Surface Urban Heat Island, of SUHI', voor het atmosferische hitte-eiland spreekt men van het 'Canopy Layer Urban Heat Island, of CLUHI'.

Tabel 7: Basiskarakteristieken van oppervlakte (SUHI) en atmosferische (CLUHI) hitte-eilanden

eigenschap	oppervlakte hitte-eiland (SUHI)	lucht hitte-eiland (CLUHI)
dagcyclus	- aanwezig gedurende ganse dag en nacht; - meest intens overdag en in de zomer	- klein of zelfs negatief overdag; - meest intens tijdens de nacht
intensiteit (piek intensiteit)	- sterke ruimtelijke en temporele variatie - tot 10 - 15 °C (overdag), 5 tot 10 °C ('s nachts)	- minder ruimtelijke variatie - overdag -1 tot 3°, 's nachts tot 7 - 12 °C
identificatie methode	- indirecte meting : remote sensing (satelliet)	- directe meting: weerstations, mobiele metingen

Bron: US-EPA

De oppervlaktetemperatuur is belangrijk in die zin dat zij in grote mate de modulatie of dagcyclus van de luchttemperatuur gaat bepalen. Hogere oppervlaktetemperaturen zorgen voor een hogere warmteflux en bijgevolg sterkere opwarming van de atmosfeer. De invloed is echter indirect. Parken en begroeide zones in de stad hebben typisch lagere oppervlaktetemperatuur en zullen dus bijdragen tot een lagere luchttemperatuur. Door turbulente menging en grootschalige atmosferische effecten echter is de relatie tussen oppervlaktetemperatuur en luchttemperatuur niet eenvoudig of eenduidig vast te leggen. Veel hangt af van de exacte eigenschappen van het oppervlak: warmtecapaciteit, albedo, emissiviteit, vochtgehalte, ruwheid, maar dus ook de karakteristieken van de atmosfeer zoals de windsnelheid, stabiliteit en de turbulentie.

Oppervlakte hitte eilanden, zoals reeds aangegeven in Tabel 7 hierboven komen voornamelijk overdag tot uiting, terwijl atmosferische hitte eilanden voornamelijk 's nachts het sterkst zijn. Voor het nachtelijk UHI zullen de verschillen tussen de oppervlakte – en luchttemperatuur kleiner worden naarmate de windsnelheid toeneemt. Bij heldere hemel en kalm weer met lage windsnelheid zullen microschaal processen die afhangen van de thermische eigenschappen van het oppervlak, de sky view factor¹ (die een sterke impact heeft op de afkoeling door thermische straling) en menging op microschaal een belangrijker rol spelen, waardoor het verschil tussen nachtelijke oppervlakte - en luchttemperatuur groter wordt. Voor een goede verklaring van het verschil tussen oppervlakte en luchttemperatuur is echter een volledig gekoppelde (oppervlak – atmosfeer) modelmatige aanpak nodig (Voogt & Oke 2003).

¹ Fractie van de hemel zichtbaar vanaf een bepaald punt op de grond.

Bij het gebruik van satelliet data voor de studie van het stedelijk warmte eiland effect dienen we een aantal overwegingen in acht te nemen. Deze overwegingen zullen we behandelen in twee secties paragrafen. In een derde onderdeel geven we aan waarom de studie van het oppervlakte hitte-eiland en het gebruik van remote sensing data wel uiterst relevant is voor het in kaart brengen van stedelijke hittestress.

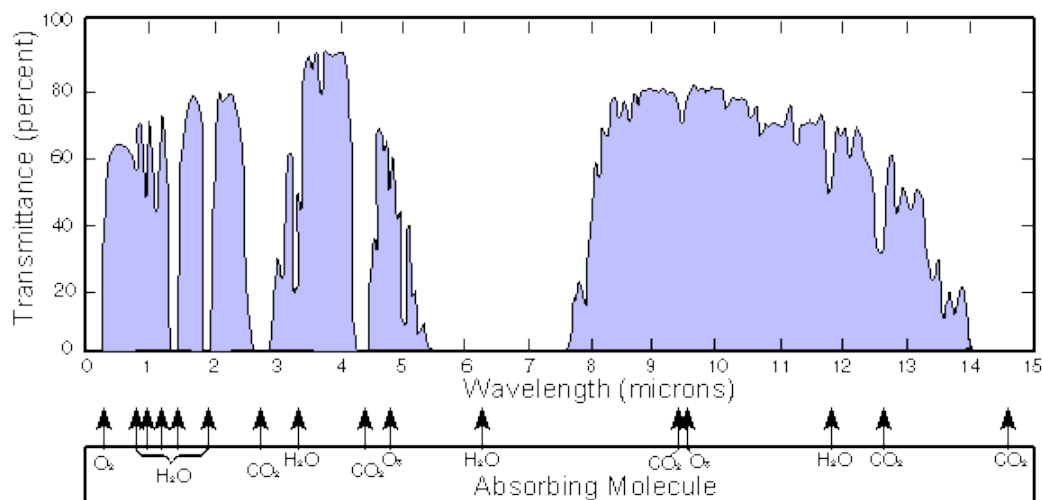
2.1.1 Afleiden van de oppervlaktetemperatuur op basis van satelliet gegevens

Elk lichaam met een zekere temperatuur T boven het absolute nulpunt zendt elektromagnetische straling uit met een intensiteit (meer bepaald: spectrale radiantie) B die afhangt van de golflengte (λ) volgens de gekende wet van Planck:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2\varepsilon_{\lambda}hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

Hierin zijn h , c en k_B respectievelijk de constante van Planck ($6,62606957 \times 10^{-34} \text{ m}^2\text{kg/s}$), de lichtsnelheid ($2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$) en de constante van Boltzmann ($1,3806488 \times 10^{-23} \text{ J/K}$). Deze wet geldt echter slechts voor een ideale zwarte straler². In realiteit zullen verschillende materialen een verschillende emissiviteit ε_{λ} hebben, die sterk van de golflengte van de uitgezonden elektromagnetische straling kan afhangen. De emissiviteit geeft de verhouding van de in werkelijkheid uitgestraalde energie t.o.v. de energie uitgestraald door een ideale zwarte straler bij dezelfde temperatuur. Door de aanwezige waterdamp en broeikasgassen in de aardatmosfeer wordt een deel van de straling geabsorbeerd. Het is echter zo dat voor een aantal 'banden' de absorptie relatief beperkt is, en de atmosfeer relatief transparant³ is voor IR straling. Dit is hieronder aangegeven in Figuur 34.

Figuur 34: Absorptie karakteristiek van de aardatmosfeer in het infrarode deel van het elektromagnetisch spectrum



De grafiek toont het percentage van de infrarode straling die bij een bepaalde golflengte door de atmosfeer wordt doorgelaten. De verschillende absorptiebanden, veroorzaakt voornamelijk door waterdamp (H_2O) en het broeikasgas CO_2 zijn onderaan weergegeven.

Bron: Wikipedia

De band tussen 8 en 14 μm is de zogeheten TIR (Thermisch Infrarode) band. Typische objecten in onze leefomgeving zenden preferentieel straling uit in dit deel van het elektromagnetisch spectrum. De maximum golflengte, gegeven door de verschuivingswet van Wien voor een zwarte straler temperatuur van 20 °C (293,15 K) bedraagt immers 9,88 μm . Door de transparantie van de atmosfeer

² http://nl.wikipedia.org/wiki/Zwarte_straler, Een zwarte straler is een geïdealiseerd object dat alle elektromagnetische straling die erop invalt absorbeert (en dus niet reflecteert).

³ Uiteraard in de afwezigheid van wolken.

voor deze golflengten, kunnen we deze TIR straling vanuit de ruimte waarnemen door middel van satellieten. Er zijn momenteel een aantal TIR sensoren in omloop met verscheiden ruimtelijke resolutie en terugkeer frequentie. Gaande van een resolutie van 4-5 km met een opname frequentie van 15 minuten (SEVIRI 4 instrument aan boord de Meteosat Second Generation satelliet (MSG)), tot een ruimtelijke resolutie van 60 m met een terugkeerperiode van een tweetal weken (Landsat 7 ETM+). In het volgende onderdeel maken we een oplistijng van de thermische sensoren en bespreken we hun karakteristieken en data beschikbaarheid.

Voor het omrekenen van de waargenomen hoeveelheid straling door de satelliet naar een oppervlaktetemperatuur zijn een aantal algoritmen beschikbaar. De toepasbaarheid van de verschillende technieken, meer bepaald voor het afleiden van de emissiviteit, hangt af van de hoeveelheid beschikbare TIR kanalen in het instrument in kwestie, maar in de praktijk veelal ook van de beschikbare visuele en nabij infra rode (NIR) kanalen.

Een belangrijke opmerking die we in deze dienen te maken is het feit dat deze TIR sensoren geen 'temperatuur meten', zoals vaak populariserend wordt aangegeven. Deze sensoren meten de intensiteit van de invallende infrarode straling aan de top van de atmosfeer in een aantal golflengtes, (banden of kanalen). Op basis van deze IR intensiteiten kunnen we een inschatting maken van de temperatuur van het oppervlak dat de straling uitzond. Hier gaat echter wel een uitgebreide verwerkingsketen aan vooraf, waarbij zaken zoals sensor kalibratie en correcties voor de aanwezige waterdamp in de atmosfeer en dus bijhorende absorptie van de infrarode straling cruciaal zijn. Gezien de atmosfeer zelf ook een 'warm lichaam' is zal die ook IR straling uitzenden, waarvoor moet gecorrigeerd worden indien men de temperatuur van het oppervlak wenst af te leiden.

Een belangrijke factor in het bepalen van de werkelijke *kinetische* temperatuur van het oppervlak is de emissiviteit ε_λ van dat oppervlak. Deze grootheid is aan het begin van deze inleiding al kort geïntroduceerd. Het kennen van de radiantie B_λ alleen is niet voldoende voor het terugrekenen naar de temperatuur T . Men dient rekening te houden met de emissiviteit, wat een materiaalconstante is die kan variëren tussen 0 en 1, én afhankelijk van de golflengte van de geëmitteerde straling.

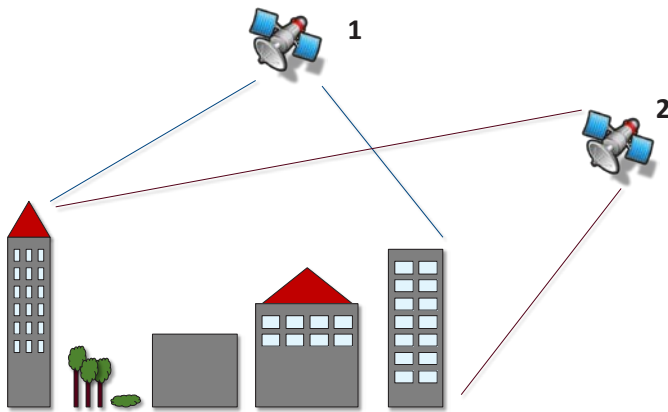
2.1.2 Heterogeniteit van het oppervlak in relatie tot de temperatuur

Een belangrijke overweging bij het werken met oppervlaktetemperaturen van satelliet data is de beperkte ruimtelijke resolutie van de data. Zoals we hieronder zullen aangeven is de pixelgrootte in de hoogste resolutie thermische data van de orde van een 90 - 100 m. Het is dus duidelijk dat, zeker in een heterogene stedelijke omgeving, deze pixels een gemengd signaal zullen bevatten van de temperatuur van de verschillende oppervlakken in deze pixels. Verder is het zo dat de kijk hoek van de satelliet t.o.v. de 3D stedelijke omgeving in relatie tot de stand van de zon een belangrijke rol kan spelen (Lagouarde et al. 2004). In een vliegcampagne boven Marseille toonde men aan dat, afhankelijk van de kijkhoek en de stand van de zon een temperatuurverschil tot 12 °C kan optreden tussen nadir⁵ en off-nadir metingen (zie onderstaande figuur ter illustratie). (Voogt and Oke 2003) onderstrepen het belang van het hanteren van goede definities wanneer we het hebben over thermal remote sensing van stedelijke oppervlakken en hanteren het concept van een 'radiometric source area' of radiometrisch brongebied, wat de zone of het gezichtsveld is die de effectieve oppervlakken bevat die bijdragen tot de gemeten IR straling voor een bepaalde meting. Vanuit een satelliet is men uiteraard slechts gevoelig voor die oppervlakten die rechtstreeks zichtbaar zijn vanaf de ruimte en blijft sowieso een deel van de stedelijke omgeving door schaduw effecten verborgen. Het is verder ook duidelijk dat dit brongebied verschilt voor luchttemperatuur en satelliet-gebaseerde oppervlaktetemperatuurmetingen. Voor een meer gedetailleerde discussie verwijzen we naar de literatuur.

⁴ Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI), zie: (Aminou et al. 1997)

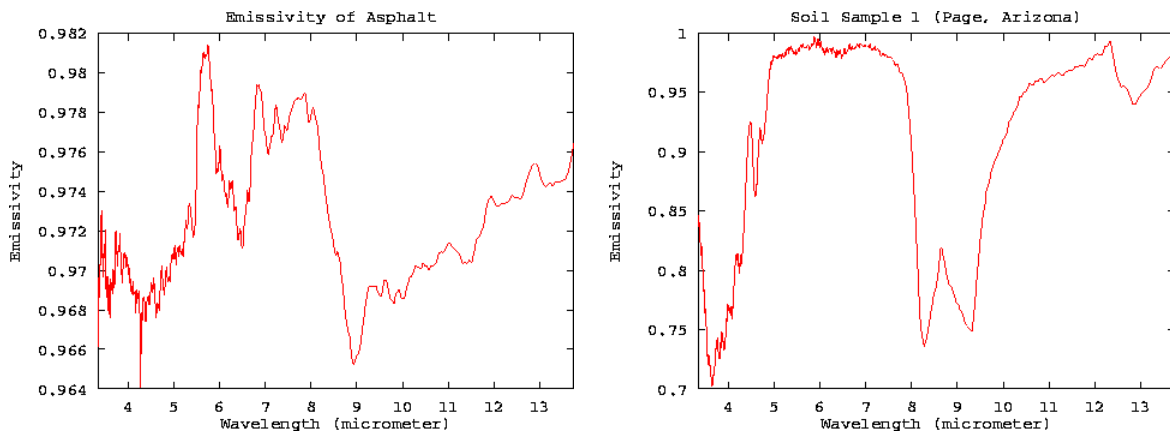
⁵ Men spreekt van een nadir meting wanneer de sensor recht naar het oppervlak beneden kijkt. Wanneer de sensor onder een bepaalde hoek naar het oppervlak kijkt, spreekt men van off-nadir opnames.

Figuur 35: Illustratie van het effect van de waarnemingshoek voor satelliet gebaseerde observaties van oppervlaktetemperatuur



Ook het afleiden van de emissiviteit, hierboven geïntroduceerd, wordt door deze heterogeniteit bemoeilijkt. Emissiviteit is immers een materiaal constante met significante verschillen tussen verschillende materiaaltypes en coatings én een sterke golflengte-afhankelijkheid. Onderstaande figuur geeft ter illustratie het verschil tussen twee emissiviteitspectra voor asfalt en een bodemstaal van zanderige bodem. Metalen hebben typisch een heel lage emissiviteit, zeker wanneer het gaat om gepolierde oppervlakken. Typische constructie materialen (beton, baksteen ...) hebben daarentegen een IR emissiviteit tussen de 0,80 en 0,95. Niettegenstaande het feit dat de emissiviteit van heel wat materialen relatief goed gekend⁶ is, is het een factor van grote onzekerheid in het afleiden van de oppervlaktetemperatuur uit TIR satelliet data. Een fout van een paar procenten in de emissiviteit kan al gauw een aantal graden verschil in temperatuur opleveren. Om de emissiviteit te bepalen van een heterogene stedelijke pixel moet men dus benaderingen toepassen.

Figuur 36: Vergelijking tussen twee gemeten emissiviteits spectra als functie van de golflengte, links voor asfalt, rechts voor een bodemstaal van zanderige bodem in Arizona



Bron: MODIS Emissivity library (<http://www.icesc.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>)

Het is m.a.w. duidelijk dat dergelijke fenomenen, waarvoor moeilijk te corrigeren valt, de interpretatie van de oppervlaktetemperatuur sterk kunnen bemoeilijken. In complexe stedelijke omgeving kan men zelfs stellen dat de oppervlaktetemperatuur in feite eerder een soort virtuele temperatuur is die een soort 'gemiddelde oppervlaktetemperatuur' aangeeft voor de onderliggende pixel. Slechts in het geval van uitgebreide homogene oppervlakken is de satelliet – gebaseerde oppervlaktetemperatuur daadwerkelijk direct te relateren aan een in-situ gemeten temperatuur van het oppervlak.

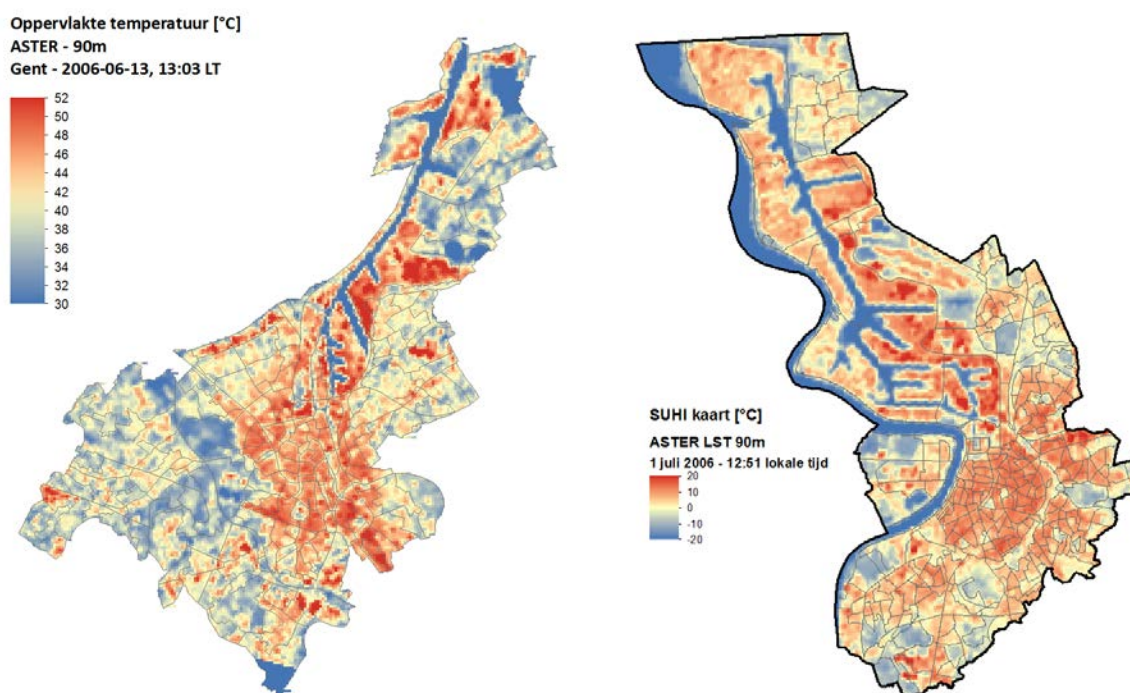
⁶ <http://www.icesc.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>, <http://speclib.jpl.nasa.gov/>

2.1.3 Gebruik van satelliet-gebaseerde oppervlaktetemperatuur voor stedelijk klimaat

Ondanks de hoger vermeldde moeilijkheden in interpretatie van satelliet-gebaseerde oppervlaktetemperatuur, wordt voor stedelijk klimaat toch gretig gebruik gemaakt van TIR satelliet data. De methode heeft immers hét grote voordeel dat ze ruimtelijk expliciet is en direct in staat een ganse stedelijke agglomeratie af te dekken. Gezien het hier ook gaat om een onafhankelijke 'meting' van de temperatuur aan het oppervlak zijn zulke datasets heel nuttig om te vergelijken met modelberekeningen, die weliswaar ook een ruimtelijke dekking kunnen geven, maar toch ook een onzekerheid inhouden. Studie van het SUHI en oppervlaktetemperatuur in het algemeen via remote sensing kan dus extra vertrouwen geven in modelberekeningen.

Onderstaande figuur geeft bijvoorbeeld de oppervlaktetemperatuur afgeleide van ASTER data (resolutie 90 m, zie verder) voor de stad Gent en Antwerpen. Op de beelden zijn duidelijk de grote parken (Citadelpark, stadspark) en de grote verharde oppervlakken in de havengebieden zichtbaar.

Figuur 37: Satelliet gebaseerde oppervlaktetemperatuur voor Gent (links) en Antwerpen (rechts)



Er werd telkens gebruik gemaakt van de data afkomstig van het ASTER instrument (zie onder). Het beeld voor Gent is genomen op 2006-06-13 om 13:03 lokale tijd en toont de afgeleide oppervlaktetemperatuur (LST). Het beeld voor Antwerpen is genomen op 2006-07-01 om 12:51 lokale tijd en toont ook de oppervlaktetemperatuur, maar dan verminderd met het gemiddelde van het beeld.

Bron: VITO, 2012 en 2013 (Hittekaart studies voor Gent en Antwerpen)

Dergelijke beelden kunnen gebruikt worden voor het in kaart brengen van **hot-spots** in het stedelijk weefsel en het relateren bv. aan het voorkomen van **stedelijk groen**. Hogere resolutie beelden (typisch afgeleid van vliegcampagnes) kunnen gebruikt worden voor het relateren van stedelijke morfologie en materialen gebruik binnen de stedelijke omgeving. Verder worden remote sensing beelden ook gebruikt voor het afleiden van informatie rond de **energiebalans**⁷ van het stedelijk weefsel (Parlow, 1999). Een derde toepassingsdomein van remote sensing beelden is het vinden van relaties tussen oppervlakte en atmosferische hitte-eilanden. Verschillende studies combineren satelliet beelden met in-situ metingen van luchttemperatuur om een ruimtelijk expliciet beeld te vormen van de stedelijke luchttemperatuur. Correlaties tussen oppervlakte en luchttemperatuur zijn het sterkst

⁷ De relatie tussen de hoeveelheid opgeslagen warmte in het stedelijk weefsel en de hoeveelheid netto-beschikbare stralingsenergie. Het verschil geeft de hoeveelheid voelbare energie die kan gebruikt worden om de lucht in stedelijk gebied op te warmen, of water te verdampen (latente warmte). Het correct weergeven van de stedelijke energie balans is cruciaal voor elk stedelijk klimaat model.

gedurende de nacht wanneer de atmosferische effecten, zoals menging, gereduceerd zijn (Dousset 1989). Overdag kunnen de verschillen tussen luchttemperatuur en oppervlaktetemperatuur hoog oplopen.

Algemeen kunnen we verder stellen dat satellietdata heel geschikt zijn voor het bestuderen van ruimtelijke patronen en de evolutie ervan over de tijd heen. Verdwijnen er hotspots in steden door het aanleggen van stedelijk groen? Of komen er hotspots bij? Satelliet beelden geven hiervoor een onafhankelijke waarneming. Voorbeelden van dergelijke periodieke analyses zijn de hittekaart-studies voor Gent (Maiheu et al, 2013) en Antwerpen (Lauwaet et al, 2013).

We merken voorts nog op dat het gebruik van satellietdata ons in staat kan stellen een screening te doen van steden waar we preferentieel een in-situ meetnet gaan uitbreiden. We zullen expliciet nagaan voor welke steden in Vlaanderen we een hoog, gemiddeld of een laag SUHI-effect vinden en op basis hiervan kunnen we in bepaalde steden preferentieel een in-situ meetpost plaatsen om een goede dekking te hebben t.o.v. de intensiteit van het effect.

De concrete toepasbaarheid van satellietdata hangt verder wat af van de exacte configuratie van het instrument. Met name, de ruimtelijke resolutie en de terugkeerperiode zijn van belang. In volgende paragraaf wordt hierop uitgebreid ingegaan.

2.2 Inventarisatie en toepasbaarheid bestaande thermisch-infrarode satelliet instrumenten

In dit onderdeel bespreken we enkele bestaande thermische satelliet sensoren en hun karakteristieken. Onderstaande Tabel 8 geeft een overzicht van de huidige TIR satelliet missies en enkele eigenschappen. We geven telkens de naam van de satelliet/sensor, de golflengte van de verschillende banden in het TIR-deel van het elektromagnetische spectrum waarin de gevoelig is, de tijdsresolutie, i.e. de terugkeerperiode van de satelliet, de ruimtelijke resolutie en de levensduur (lanceerdatum).

Tabel 8: Huidige satelliet missies met TIR sensoren (dd. 2011)

satelliet/sensor	TIR spectrale banden [μm]	tijdsresolutie	ruimtelijke resolutie (TIR)	levensduur
METEOSAT-MVIRI Geostationair op 36 000 km	Vis: 0.45-1 IR: 5.7-7.1 TIR: 10.5-12.5	15 min	VIS: 2,5 km IR: 5 km WV: 5 km	1977 - 2006
MSG-SEVIRI Geostationair op 36 000 km	0.56-0.71, 0.74- 0.88, 1.50-1.78, 3.48-4.36, 5.35- 7.15, 6.85-7.85, 8.30-9.1, 9.38-9.94, 9.80-11.8, 11-13, 12.40-14.40	15 min	HR Vis: 1 km andere kanalen: 3 km	2002 -
MetOp – IASI Heliosynchroon op 800-900 km	[cm^{-1}] 650-770, 790- 980, 1000-1070, 1080-1150, 1210- 1650, 2100-2150, 2150-2250, 2350- 2420, 2420-2700, 2700-2760	2x per dag aan de evenaar	1,1 km	2006 -
EOS Terra/Aqua - MODIS Heliosynchroon op 705 km	36 banden TIR banden: 31: 10.780-11.280 32: 11.770-12.270	2x per dag aan de evenaar	1 km (TIR)	1999 -
LANDSAT 5 - TM Heliosynchroon op 705 km	0.45-0.52 0.52-0.60 0.63-0.69 0.76-0.90 1.55-1.75 10.4-12.5 2.08-2.35	16 dagen	120 m	1984 - 2013
LANDSAT 7 – ETM+ Heliosynchroon	0.45-0.52 0.52-0.60	16 dagen	60 m	1999 -

op 705 km	0.63-0.69 0.76-0.90 1.55-1.75 10.4-12.5 2.08-2.35				
LANDSAT 8 OLI/TIRS	10.60 - 11.19 11.50 - 12.51	16 dagen, 8 dagen offset met LandSAT 7	100 m	2013 -	
EOS Terra - ASTER Heliosynchroon op 705 km	8.125-8.475 8.475- 8.825 8.925- 9.275 10.25-10.95 10.95- 11.65	16 dagen, bestelbaar	90 m	1999 -	
NOAA-AVHRR Heliosynchroon op 833-870 km	0.580-0.680 0.725-1 1.580-1.640 10.30- 11.30 11.50-12.50 16	2x per dag aan de evenaar	1 km	NOAA 11: 1988 - 2004 NOAA 18: 2005 -	
MetOp A/B – AVHRR/3 AIRS Heliosynchroon op 705 km	MWIR: 3.74-4.61 TIR: 6.2-8.22 TIR: 8.8-15.4 VIS: 0.4-1	2x per dag aan de evenaar	13,5 km MIR:	A: 2006 - B: 2012 - 2002-	
BIRD Heliosynchroon 572 km	MIR: 3.4-4.2 TIR: 8.5-9.3	dagelijks	370 m	2001-	
NPP VIIRS Heliosynchroon 824 km	M14 8.4 - 8.7 M15 10.26 - 11.26 M16 11.54 - 12.49	2x per dag aan de evenaar	750 m	2009 -	

Bron: Ferrero et al. (2011), geactualiseerd en gecorrigeerd door Bino Maiheu, VITO

De tabel geeft enkel relevante instrumenten aan voor Vlaanderen, geostationaire satellieten die bv. geen blik op Vlaanderen werpen (zoals bv. de Japanse MTSAT/Himawari of Chinese Feng Yung Geostationaire weersatellieten welke ook TIR kanalen hebben, werden niet in de lijst opgenomen). Ook satellieten die niet langer functioneel zijn (bv. GOES 9, 10, 11) zijn niet in de lijst opgenomen. Deze lijst is niet volledig maar bevat de meest relevante sensoren voor onze toepassing. Op de WMO OSCAR site (www.wmo-sat.info/oscar) is nog extra informatie opgenomen⁸.

Naast de lijst van actieve TIR sensoren zijn er op het moment van schrijven een aantal missies gepland. Voor zover we er zicht op hebben zijn de geplande TIR missies aangegeven in onderstaande tabel.

Tabel 9: Geplande satelliet missies met TIR sensoren (dd. 2011)

satelliet/sensor	TIR spectrale banden [µm]	tijdsresolutie	ruimtelijke resolutie (TIR)	levensduur
SENTINEL 3 - SLST Heliosynchroon 815 km	VIS: 0.555, 0.659, 0.865 SWIR: 1.38, 1.61, 2.25, 3 TIR: 3.74, 10.85, 12	0.9 – 1.8 dagen	VIS/SWIR: 500 m MWIR/TIR: 1 km	eind 2014 -
HyspIRI 626 km	8 banden tussen 3 en 12 µm	5 dagen	60 m	2021 -
MetOp-C				2018 -

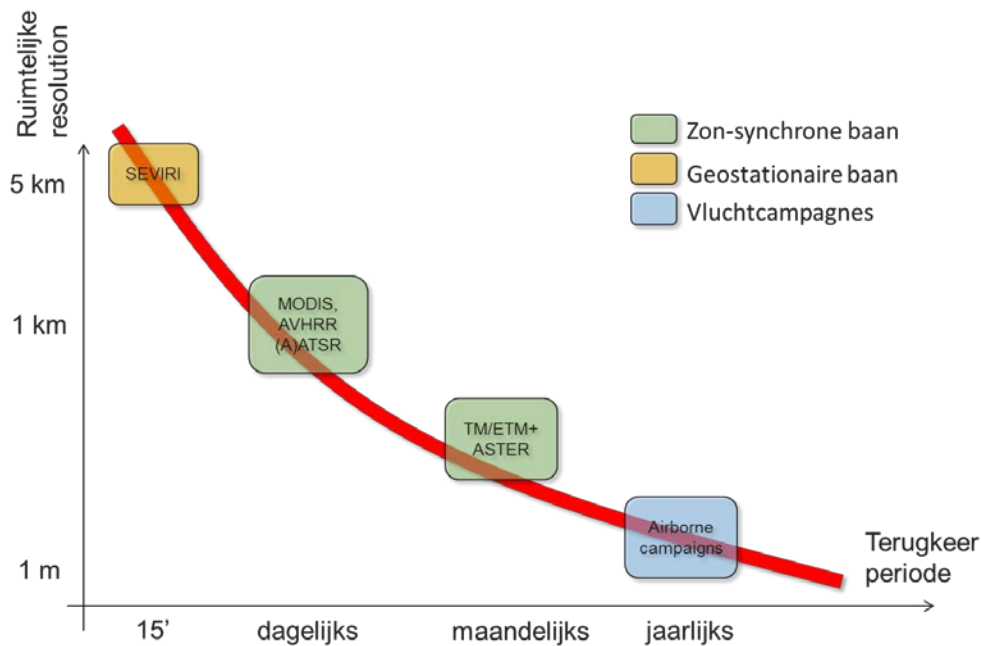
Bron: Ferrero et al. (2011), geactualiseerd en gecorrigeerd door Bino Maiheu, VITO

Uit de tabellen valt een duidelijk trade-off op tussen ruimtelijke resolutie en terugkeertijd. Sensoren/satellieten met een hoge ruimtelijke resolutie hebben slechts een terugkeertijd van enkele dagen/weken, terwijl sensoren met lage ruimtelijke resolutie een veel hogere terugkeerfrequentie hebben, in de orde van enkele keren per dag tot zelfs 15 minuten. Onderstaande grafiek geeft deze trade-off schematisch weer. Tot op heden bestaan er m.a.w. geen infrarode satellieten die een zeer

⁸ Onder meer een lijst van IR sounders voor temperatuurprofiel metingen: <http://www.wmo-sat.info/oscar/instrumenttypes/view/18>

hoge ruimtelijke resolutie (orde van enkele tientallen m) combineren met een korte terugkeerperiode (orde van enkele keren per dag).

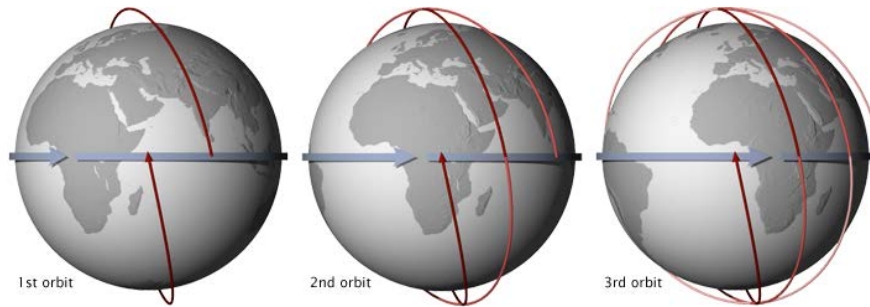
Figuur 38: Schematische weergave van de trade-off in ruimtelijke resolutie en terugkeerperiode



Op de figuur is ook aangegeven of het typisch gaat over geostationaire of heliosynchrone satellieten. Toegewijde vliegcampagnes zijn additioneel ook op de figuur aangegeven.

Veel heeft ook te maken met de baan configuratie van de satellieten. Sensoren aan boord van geostationaire satellieten hebben altijd hetzelfde stuk van de aarde in het vizier maar staan op veel grotere afstand (36 000 km) dan hun heliosynchrone tegenhangers die op lagere hoogte vliegen (typisch 500 - 1 000 km). Daar waar geostationaire satellieten telkens hetzelfde stuk van de aarde bekijken, en hun omloop dus synchroon is met de rotatie van de aarde, zullen heliosynchrone satellieten in een baan om de aarde vliegen die lichtjes geheld is t.o.v. de evenaar. Hun baan is zo aangepast dat ze telkens op dezelfde lokale zonnetijd over dezelfde plaats vliegen en de helling van de baan wordt in grote mate bepaald door de hoogte van de baan. Hierdoor wordt elke plaats bij verschillende opnames ongeveer op dezelfde manier verlicht door de zon (belichting en schaduw condities), wat belangrijk is voor de consistentie van de verschillende opnames. Dergelijke satellieten zullen dezelfde plek op de aarde dus per dag altijd 2x zien, éénmaal overdag en éénmaal 's nachts.

Figuur 39: Illustratie van heliosynchrone baan



De figuur toont 3 opeenvolgende banen. De meest recente baan is aangegeven met de rode pijl. Stel dat de lokale (zonne-)tijd 10:30 is wanneer de satelliet bv boven de evenaar komt zoals in de linkse figuur. Na één omwenteling van de satelliet is de aarde wat opgeschoven door de rotatie om haar as en komt de satelliet nu boven de evenaar een stuk naar het westen t.o.v. de aarde. Een heliosynchrone baan houdt in dat de lokale (zonne-)tijd bij kruising van de evenaar daar ook 10:30 is.

Bron: NASA (<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog/page2.php>)

Afhankelijk van het toepassingsdomein zijn uiteraard verschillende factoren belangrijk. Dit bespreken we verder onder §2.2.2.

2.2.1 Data verwerking en data beschikbaarheid

Het gebruik van satelliet data onderscheidt zich in zeer belangrijke mate van het gebruik van in-situ meetgegevens door de complexiteit van data retrieval, archivering en verwerking. Bij satelliet gegevens is er sprake van zeer uitgebreide verwerkingsketens om de ruwe satelliet sensor gegevens te verwerken tot wetenschappelijk bruikbare producten (zoals bv. oppervlaktetemperatuur). Typisch wordt de data ook aan de gebruikers ter beschikking gesteld in verschillende stadia van de verwerkingsketen. In meest ruwe vorm kan men werken met ruwe, ongecorrigeerde sensor gegevens, met kalibreerde sensor gegevens (men spreekt typisch van Level 1 of L1), ofwel met gekalibreerde en ge-georeferentierde sensorgegevens (men spreekt van L1b). Wanneer men in de verwerking nog een stapje verder gaat en uit die L1b data fysische parameters gaat afleiden, dan spreekt men over L2 data. Hier gaat het dan concreet om bijvoorbeeld inschattingen van de oppervlaktetemperatuur. Verdere aggregaties (vb. maand/jaargemiddelden etc.) worden dikwijls met L3 data aangeduid.

Daar het opzetten van een verwerkingsketen van satelliet data een zeer gespecialiseerd domein is, gebeurt dit typisch in gespecialiseerde beeldverwerkingscentra die over de nodige processing en vooral opslag capaciteit beschikken. Vooral dit laatste is voor satelliet data cruciaal gezien de datavolumes waarmee men werkt aanzienlijk zijn. In deze studie zullen we echter uitsluitend werken met L2 data. In de volgende secties zullen we voor de belangrijkste instrumenten aangegeven waar en onder welke vorm de data beschikbaar is. Dit overzicht geeft de belangrijkste databronnen weer, maar is in geen geval volledig.

2.2.1.1 Lage resolutie MSG-SEVIRI data

Lage resolutie oppervlaktetemperatuur data afkomstig van het MSG SEVIRI (Meteosat Second Generation – Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) instrument is beschikbaar via het 'Land Surface Analysis – Satellite Applications Facility', of LSA-SAF (<http://landsaf.meteo.pt>), waar 15' opnames met voorbewerkte oppervlaktetemperatuurbeelden gratis gedownload kunnen worden in HDF5⁹ formaat mits registratie op de website.

⁹ <http://www.hdfgroup.org/HDF5/>

2.2.1.2 LST data op 1 km (MODIS, AVHRR, ATSR)

Oppervlaktetemperatuurdata afkomstig van MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) en (A)ATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer) worden typisch op een ruimtelijk resolutie van 1 km beschikbaar gesteld. MODIS oppervlaktetemperatuurdata is relatief vlot beschikbaar via het Earth Observing System - Data and Information System van NASA, het Amerikaans ruimtevaartagentschap, meer bepaald via het Reverb tool (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>). Dit online tool bevat een zoek functie waarin een gebruiker kan zoek op basis van het geografisch interessegebied, een tijdsvenster en een product omschrijving. Voor MODIS oppervlaktetemperaturen zoeken we op product codes MOD11A1 en MYD11A1, welke de dagelijkse globale aggregaties zijn op een 1 km grid. De data wordt per opname ter beschikking gesteld in het HDF-EOS formaat¹⁰. De geselecteerde beelden worden klaargezet op een FTP server en de gebruiker wordt via email verwittigd wanneer hij/zij de data kan downloaden.

Het AVHRR instrument is aan boord van zowel de Europese MetOp satellieten als de Amerikaanse NOAA¹¹ satellieten. LST afkomstig van de Europese Metop AVHRR satellieten is beschikbaar via het centrum voor beeldverwerking van VITO (<http://www.metops10.vito.be/>). Voor de NOAA-AVHRR instrumenten kunnen L1b data gedownload worden in binair formaat via de USGS¹² EarthExplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) of via het NOAA Comprehensive Large Array-Data Stewardship System (CLASS), <http://www.nsof.class.noaa.gov/>. Het is belangrijk op te merken dat het hier telkens om L1b data gaat en niet om oppervlaktetemperaturen. Een mogelijke gebruiker van de data dient hiervoor dus zelf een verwerkingsketen op te stellen. In een aantal projecten is deze verwerking uiteraard reeds gebeurd en zo is bijvoorbeeld tijdens het ESA Urban Heat Islands project (<http://www.urbanheatland.info/>) een archief geproduceerd van onder meer AVHRR oppervlaktetemperatuur data voor 10 Europese steden en dat gedurende de periode 2000-2009.

(A)ATSR L2 oppervlaktetemperatuur producten zijn onder meer beschikbaar via de University of Leicester¹³ in NetCFD-4 formaat en dat voor het volledige data archief (2002-05-20 tot 2012-04-08), samen met inschattingen van onzekerheid. Het data archief is beschikbaar via FTP op <ftp://ats-ftp-ds.eo.esa.int> voor gebruikers die zich registreren als ESA data gebruiker.

Algemeen kan men stellen dat vanuit gebruikers perspectief het gebruik van de MODIS LST data op 1 km veruit de eenvoudigste en best toegankelijke datasets zijn. Onderstaande Figuur 40 geeft een idee van het te verwachten niveau van detail dat we krijgen op basis van de 1 km satelliet data op schaal van Vlaanderen. Momenteel is het MODIS instrument aanwezig op 2 satellieten, nl. EOS-Terra en EOS-Aqua, waardoor in totaal 4 opnames (of toch tenminste pogingen) zijn per dag.

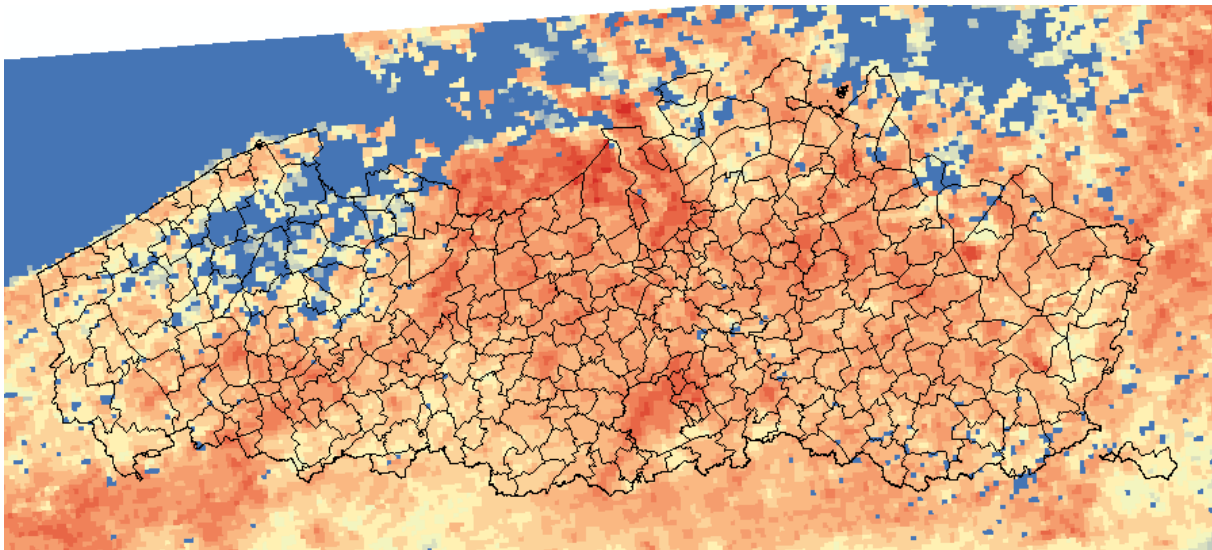
¹⁰ <http://hdfeos.org/>

¹¹ National Oceanic and Atmospheric Administration

¹² U.S. Geological Survey

¹³ <https://earth.esa.int/web/guest/data-access/browse-data-products/-/article/aatsr-level-2-lst-products-from-uol>

Figuur 40: Voorbeeld van een MODIS oppervlaktetemperatuurbeeld eind maart 2003



De figuur geeft het niveau van detail aan dat te verwachten is op basis van de 1 km data. Blauwe pixels geven ontbrekende waarden op (door bv. wolkenbedekking).

Bron: VITO

2.2.1.3 Hoge resolutie LST data

Voor hoge resolutie IR satelliet data (~100 m) zijn twee instrumenten van belang, Landsat enerzijds en ASTER anderzijds. ASTER data kan bekomen worden enkel tegen betaling van een bedrag van ongeveer 100 EUR/opname via het ASTER GDS DAR systeem¹⁴ van het Japannees ruimtevaart agentschap (<http://ims.aster.ersdac.jpacesystems.or.jp>) De iet of wat onhandige gebruikers interface bevat een zoekfunctie voor het opzoeken van ASTER beelden in de databank van gearchiveerde beelden. Door middel van quickviews kan een gebruiker een selectie maken van de beelden die men wenst aan te kopen. Optioneel kan men een postprocessing stap toevoegen, waardoor het mogelijk maakt om online de oppervlaktetemperaturen te laten berekenen volgens een welbepaald algoritme (zie verder). De 90 m resolutie ASTER data wordt ter beschikking gesteld in HDF formaat.

Voor Landsat data kan gebruik gemaakt worden van de USGS Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) of de USGS Global Visualization Viewer (GloVis, <http://glovis.usgs.gov/>), waar de recent gelanceerde Landsat 8 Operational Land Imager data ook reeds beschikbaar is. De Landsat data wordt ter beschikking gesteld in binair formaat. Hier gaat het echter wel slechts om ruwe sensor counts, zonder kalibratie, maar wel met geografische referentie. Er bestaan echter wel een aantal relatief makkelijk te implementeren routines om op basis van het thermisch kanaal een oppervlaktetemperatuur in te schatten. Zeker over natuurlijk terrein zijn ondanks het beperkte aantal TIR kanalen relatief goeie resultaten behaald voor de afleiding van LST op basis van Landsat data (Coll et al. 2012) en zijn er een aantal verschillende algoritmen beschikbaar zijn voor het afleiden van LST op basis van 1 enkel TIR kanaal (Barsi et al. 2003; Barsi 2005; Jimenez-Munoz et al. 2009).

Voorbeelden van een aantal hoge resolutie oppervlaktetemperatuur beelden van ASTER zijn reeds hoger gegeven in Figuur 37.

¹⁴ ASTER Ground Data System – Data Acquisition Request

2.2.2 Bespreking toepasbaarheid voor stedelijk klimaat en SUHI

Nu we een overzicht hebben van een aantal mogelijke databronnen kunnen we bekijken welke beelden best geschikt zijn voor toepassing binnen dit project. We dienen hierbij in het achterhoofd te houden dat we gebiedsdekkend willen werken voor gans Vlaanderen en over de mogelijkheid beschikken om lange en consistente tijdsreeksen te construeren. Er gelden 3 criteria:

1. Ruimtelijke resolutie
2. Temporele resolutie
3. Data beschikbaarheid

Gezien de lage ruimtelijke resolutie (~5-7 km) van de MSG SEVIRI beelden en de lage temporele resolutie (slechts 1 opname-poging per ~16 dagen, en in de praktijk slechts enkele bruikbare opnames per jaar) van de Landsat / ASTER instrumenten, komen we vlug uit bij de 1 km data van MODIS, AVHRR en AATSR – type satellieten, waarbij MODIS geldt als makkelijkste bron van data. De resolutie van 1 km is voldoende hoog om de grotere steden te capteren, hoewel we dienen te vermelden dat voor de kleinere steden dit misschien al wat aan de lage kant kan blijken.

Men zou een combinatie kunnen maken van 1 km data van verschillende instrumenten om een betere temporele bedekkingsgraad te bekomen¹⁵. Dit omhelst echter een significante inspanning op vlak van data verwerking, preprocessing en zelfs inter-sensor bias correctie om tot een consistente oppervlaktetemperatuur dataset te komen voor Vlaanderen. Deze oefening valt buiten het kader van deze opdracht, maar het verdient wel aanbeveling om naar de toekomst toe dergelijke dataset op te bouwen om de continuïteit van de indicatoren naar de toekomst te garanderen. De oorspronkelijke levensduur van de MODIS instrumenten is immers reeds enkele jaren verstreken en niemand weet goed wanneer die instrumenten zullen ophouden met functioneren. Zo is bijvoorbeeld op 8 April 2012 alle contact verloren met de Envisat satelliet die onder meer het AATSR instrument aan boord had, waardoor de tijdsreeks van AATSR beelden zich beperkt tot die dag. Wanneer dit gebeurt, is het uiteraard niet langer mogelijk om indicatoren af te leiden voor die bepaalde sensor. Door het verschil in opname tijdstip en door verschil in verwerkingsalgoritme en eventueel de golflengte van de verschillende TIR banden waarin de sensor gevoelig is, kunnen systematische verschillen optreden tussen de oppervlaktetemperaturen afgeleid van verschillende instrumenten. Om een consistente tijdsreeks op te bouwen zou hier m.a.w. voor gecorrigeerd moeten worden. Verder is het ook geweten dat bij de NOAA-AVHRR satellieten een probleem van baandrift is vastgesteld. Hierdoor is de heliosynchrone baan niet langer synchroon met de zon en schuift het tijdstip van overkomst geleidelijk op. Hierdoor gelden andere belichting/schaduw condities tussen de verschillende opnames en dient men correcties door te voeren in dien men de dataset wenst te gebruiken voor een lange termijn analyse (Jin and Treadon 2003; Julien et al. 2007; Sobrino et al. 2008).

Naar de onmiddellijke toekomst toe kunnen we effectief nog gebruik maken van MODIS data en zijn een aantal AVHRR sensoren operationeel, met de lancering van de Sentinel 3 satelliet en het SLST instrument kan een deel van de continuïteit naar de toekomst toe ook verder gegarandeerd worden.

We wijzen er hier verder ook op dat zowel de hoge als lage resolutie data ook duidelijk z'n nut heeft voor stedelijk klimaat en de studie van oppervlakte hitte-eilanden. Landsat en ASTER data is veelvuldig gebruikt in de context van hittekaart studies voor Gent (Maiheu et al, 2013) en Antwerpen (Lauwaet et al, 2013) en met hoge opname frequentie van MSG-SEVIRI (15') kunnen bijvoorbeeld thermische eigenschappen van het oppervlak worden afgeleid (De Ridder et al. 2012).

Ondanks de geschiktheid van MODIS data op vlak van de hoger vermeldde criteria is zo dat de 2 spectrale TIR banden van MODIS echter sub-optimaal zijn voor het waarnemen van stedelijke temperatuur. Voor MODIS data (en gelijkaardige instrumenten met 2 TIR kanalen, een kanaal in het rode deel van het spectrum en een kanaal in het nabij infra-rood, NIR¹⁶) wordt meestal een het zogenoemde split-window algoritme toegepast. Op basis van een vegetatie index die geconstrueerd wordt met het rode en NIR kanaal kunnen emissiviteiten geschat worden voor de TIR kanalen, die dan op hun beurt gebruikt worden voor de omrekening naar oppervlaktetemperatuur. Het gebruik van

¹⁵ Hoewel men altijd met het probleem van bewolking zal blijven zitten.

¹⁶ Near Infra Red (~0.73 – 1.1 µm)

dergelijke vegetatie index dekt uiteraard niet volledig de heterogeniteit van een stedelijk oppervlak. Recent onderzoek van de universiteit van Valencia, in het kader van de DESIREX 2008 campagne (<http://www.uv.es/desirex/index.htm>) maakte een afweging van verschillende methodes en algoritmes voor het inschatten van emissiviteit over stedelijk oppervlak (Oltra-Carrió et al. 2012). Waaruit bleek dat het zogeheten Temperature-Emissivity-Separation algoritme (TES) (Gillespie et al. 1999) de oppervlaktetemperatuur boven stedelijk gebied het best reproduceert. Voor dit algoritme is geen voorafgaande kennis van de emissiviteit nodig, die wordt intern door het algoritme berekend op basis van de radianties in 5 verschillende TIR kanalen. Op dit ogenblik is het enige instrument dat hierdoor binnen deze context bruikbaar is, de Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer¹⁷ (kortweg ASTER, <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>) aan boord van de Amerikaanse EOS-Terra satelliet, gelanceerd in 1999. ASTER beschikt effectief over 5 spectrale banden in het thermisch infrarode deel van het spectrum. Door de lage terugkeerperiode en het beperkte aantal bruikbare beelden, vb. een 10-tal goede beelden voor Gent of Antwerpen in de periode 2002-2013 (Maiheu et al, 2013; Lauwaet et al, 2013), echter is ASTER data minder geschikt voor deze studie.

2.3 Verkenning van mogelijke indicatoren voor het stedelijk hitte-eiland

Om verder indicatoren af te leiden voor Vlaanderen en de Vlaamse steden hebben we een hele waaier aan opties. In deze studie zullen we de nadruk leggen op indicatoren die rechtstreeks verband houden met de observaties van oppervlaktetemperatuur (LST). Er zijn uiteraard andere remote sensing databronnen beschikbaar die ons ook relevante informatie kunnen leveren t.a.v. het hitte eiland effect. We komen hier verder nog kort op terug.

2.3.1 LST – gebaseerde indicatoren

Verkennd onderzoek rond surface urban heat island indicatoren is onder meer in (Schwarz et al. 2011) beschreven, waar ook aan de hand van MODIS oppervlaktetemperaturen is gewerkt en een 11-tal indicatoren zijn onderzocht. Onderstaande tabel geeft een overzicht:

Figuur 41: Tabel met UHI indicatoren op basis van remote sensing data

Indicator	Units	Quantification in this study	Related references [sensor used in the original study; temporal resolution]
Difference urban – agriculture	K	Difference in mean LST between urban area and cropland	Jin et al.(2005) [MODIS; day and night, several days]
Difference core – rural	K	Difference in mean LST between urban (administrative area) and rural (buffer of 20 km ² around the city) areas	Imhoff et al.(2010) [MODIS; day and night; several days] Zhang et al.(2010) [MODIS; day and night, several days]
Difference urban – other	K	Difference in mean LST between urban area and all other areas	Doussot and Gourmelon(2003) [NOAA-AVHRR; day and night, several days] Gallo et al.(1993) [NOAA-AVHRR; day, several days] Roth et al.(1989) [NOAA-AVHRR; day and night, several days] Tomlinson et al.(2010) [MODIS; night, several days] Zhou et al.(2010) [MODIS, day and night, several years] Chen et al.(2006) [Landsat 5 + 7; several days]
Difference urban – water	K	Difference in mean LST between urban area and water surface	
Gaussian area	km ²	Area under a Gaussian surface fitted to LST, after the rural LST background has been subtracted	Hung et al.(2006) [MODIS; day and night, several days] Streutker(2002) [NOAA-AVHRR; day, several days], 2003 [NOAA-AVHRR; day and night, several days]
Gaussian magnitude	K	Maximum of a Gaussian surface fitted to LST, after the rural LST background has been subtracted	Hung et al.(2006) [MODIS; day and night, several days] Streutker(2002) [NOAA-AVHRR; day, several days], Streutker (2003) [NOAA-AVHRR; day and night, several days]
Hot island area	km ²	Area with LST higher than the mean plus one standard deviation	Zhang and Wang(2008) [Landsat 7; 1 image]
Magnitude	K	Difference between maximum and mean of LST	Rajasekar and Weng(2009) [MODIS; day and night, several days]
Micro-UHI	%	Percentage of area (without water surfaces) with LST higher than the warmest LST associated with tree canopies	Aniello et al.(1995) [Landsat 5; 1 image]
Standard deviation	K	Standard deviation of LST in the administrative area	
Gaussian magnitude empirical	K	Maximum difference between the temperatures in urban and fitted rural temperature surfaces	

LST: Land surface temperature. If not stated otherwise, all LST are measured within the administrative boundary of the respective city. For indicators related to the Gaussian bell, see Appendix B.

Bron en referenties waarnaar verwezen in de tabel zijn terug te vinden in Schwarz et al. (2011).

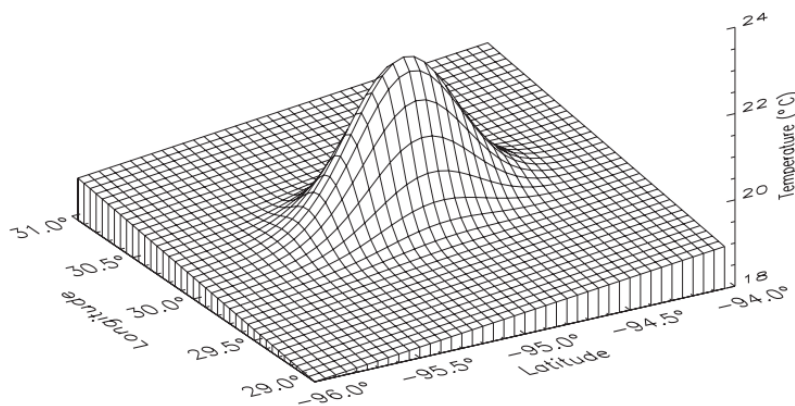
Een **eerste klasse** indicatoren beschrijven eenvoudig het verschil tussen de stedelijke en rurale oppervlaktetemperatuur (LST), waarbij al of niet gebruik gemaakt wordt van land cover data om bijvoorbeeld landbouw gebied (*Difference core – agricultural*) of puur ruraal gebied te selecteren. Door de zeer dichte bebouwingsgraad in Vlaanderen lijkt het ons sowieso aangewezen om hier ook een

¹⁷ <http://asterweb.jpl.nasa.gov>

landgebruiksdataset voor in rekening te brengen gezien we in Vlaanderen niet echt meer kunnen spreken van uitgestrekt ruraal gebied en we de achtergrond temperatuur dus moeten vinden tussen de verspreide woonkernen rond een stad. Een kleine variatie hierop beschrijft het verschil in oppervlaktetemperatuur tussen stad en grote wateroppervlakken (uiteraard enkel van toepassing voor die steden met een groot wateroppervlak in de buurt). Veelal wordt ook met het maximale verschil gewerkt, wat de 'urban heat island intensity' of sterkte van het stedelijk hitte-eiland genoemd wordt (UHII). In (Holderness et al. 2013) wordt een uitgebreide analyse van die UHII indicator voor London op basis van AVHRR beelden voor zomers tussen 1996 en 2006 gepresenteerd.

Een **tweede klasse** indicatoren uit (Schwarz et al. 2011) maken gebruik van een Gaussisch oppervlak dat gefit wordt aan de LST na aftrek van de rurale LST achtergrond. Dergelijke indicatoren zijn origineel bedacht door (Streutker 2002) in een studie van het urban heat island van Houston, Texas.

Figuur 42: Voorbeeld van Gaussisch oppervlak



Bron: Streutker (2003)

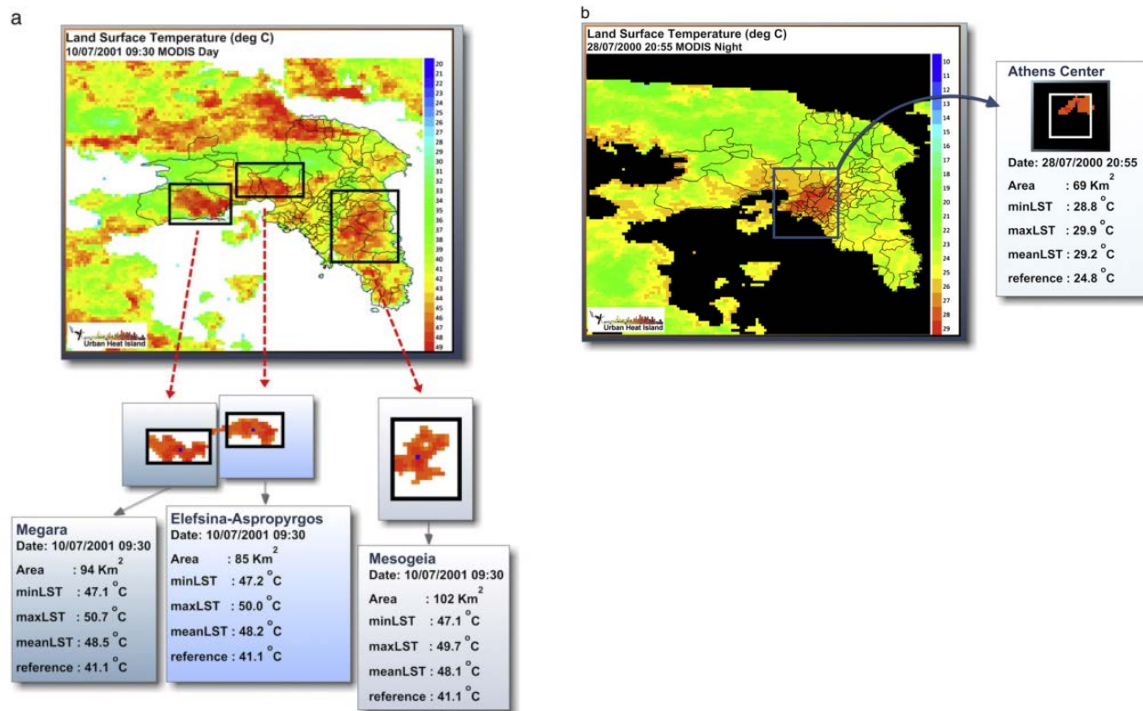
De achterliggende idee is het fitten van een 2D Gaussisch oppervlak aan de LST incrementen van een stad als functie van x,y coördinaten ($G(x,y)$). Op basis van die beschrijvende Gaussiaan wordt de totale SUHI oppervlakte ingeschat alsook de intensiteit, maar kunnen ook enkele meer structurele parameters zoals oriëntatie, centrale locatie en ruimtelijke gradiënten worden ingeschat. In (Streutker 2003) presenteerden de auteurs een analyse voor Houston, Texas, en vonden een toename van het SUHI tussen 170 en 650 km² tussen 1986 en 2000, afhankelijk van de methode van analyse. De toepassing van dit type indicatoren is uiteraard iets complexer gezien de fitprocedure voor het fitten van dergelijke functies kan aanleiding geven tot onstabiele resultaten en gezien de omgeving van de stad en de heterogeniteit van het terrein ook belangrijk zijn voor de stabiliteit van dergelijke Gaussische indicatoren (Schwarz et al. 2011). Hoewel een interessante piste om verder te exploreren, vallen dergelijke indicatoren jammer genoeg buiten het tijdsbestek van deze opdracht.

Tenslotte kunnen we op iets eenvoudigere manier ook informatie afleiden over de grootte van de oppervlakte hitte-eilanden. Dit is een **derde klasse** van indicator. In (Zhang and Wang 2008) wordt de zogeheten Hot Island Area (HIA) gedefinieerd als zijnde de totale oppervlakte met temperaturen boven de gemiddelde oppervlaktetemperatuur (\overline{LST}) plus 1 standaardafwijking (σ). Met die drempel ($\overline{LST} + 1\sigma$) kan uiteraard gespeeld worden, zo kan men ook eenvoudig percentiel waarden nemen. In de bovenstaande definitie wordt de HIA als relatieve grootte gedefinieerd, beeld per beeld, onafhankelijk van de absolute temperatuur. Door een vaste drempelwaarde te nemen, e.g. de totale oppervlakte met een LST boven een bepaalde vaste waarde wordt uiteraard de absolute temperatuur wel in rekening gebracht, maar is de afstelling en vooral interpretatie van die drempelwaarde dan weer een aandachtspunt. Daarnaast is tenslotte de ruwe gemiddelde oppervlaktetemperatuur in de stedelijke gebieden an sich ook een interessante parameter om te bekijken.

Gezien verder een wezenlijk verschil tussen de oppervlaktetemperatuur overdag en 's nachts is het aan te bevelen om die apart in beschouwing te nemen. De oppervlaktetemperatuur overdag geeft aan hoe sterk het stedelijk weefsel opwarmt, 'n nachts hoe traag het afkoelt. Dit verschil kan relatief letterlijk genomen worden. Zo zullen overdag bijvoorbeeld grote industriële gebouwen met typisch metalen of golfplaten daken (lage warmtecapaciteit) heel snel opwarmen waardoor die overdag heel

heet zullen lijken in een LST beeld, door een lage warmtecapaciteit zullen die oppervlakken dan op hun beurt weer heel snel afkoelen zodat die 's nachts misschien koeler lijken dan hun omgeving met bv. veel hogere warmte capaciteit (beton, asfalt etc.). Men kan dus stellen dat de thermische patronen in LST beelden overdag en 's nachts significant anders kunnen zijn. Een mooie illustratie hiervan is een patroon analyse van MODIS LST voor Athene in (Keramitsoglou et al. 2011):

Figuur 43: Verschil tussen een dag opname (MODIS 10/07/2001 om 09:30) voor Athene en een nachtopname (28/07/2000 om 20:55)



Bron: Keramitsoglou et al. (2011)

In de figuur wordt een MODIS dag beeld boven Athene vergeleken met een nacht beeld. In het dagbeeld zijn duidelijk 3 hotspots op te merken, terwijl voor het nachtbeeld enkel het centrum van Athene als hotspot overblijft. De twee hotspots ten noord westen van Athene worden effectief gekenmerkt door industrieterrein en open droog land met sporadische vegetatie. Deze vlakten hebben een lagere thermische inertie dan de stad zelf waardoor ze vlugger warmer worden overdag. Een interessante insteek in hoger vermeldde publicatie is het gebruik maken van object gebaseerde image analysis technieken¹⁸.

Bodemvocht speelt hierbij dus ook een heel belangrijke rol gezien de hoge warmtecapaciteit van water. Droge, zanderige bodems zullen m.a.w. een grotere amplitude van de dagcyclus kennen dan goed met water verzadigde bodemtypes en dit kan uiteraard als functie van de seizoenen en voorafgaande regenval variëren. Daar waar over land LST variatie van 20 °C geen uitzondering zijn (De Ridder et al. 2012), wordt boven de zee (SST of Sea Surface Temperature) een dag-amplitude van 5 °C als hoogst uitzonderlijk beschouwd (Kawai and Wada 2007). Misschien wat contra-intuïtief, maar als gevolg hiervan kan de intensiteit van het SUHI overdag afnemen naar het einde van de zomer toe bij steden die bv. omringd worden door naakte, dorre grond (Lu and Weng 2006).

Het dient gesteld dat zowel (Schwarz et al. 2011) als (Holderness et al. 2013) enkele kanttekeningen plaatsen bij de stabiliteit en interpreteerbaarheid van UHI indicatoren afgeleid van remote sensing LST beelden. Ten eerste wordt in (Holderness et al. 2013) aangegeven dat de uitmiddeling van LST beelden heel belangrijk is wanneer we willen vergelijken tussen verschillende zomers. Werken met aggregaties op dag basis is volgens de auteurs onbetrouwbaar om temperatuursveranderingen van

¹⁸ Recent keurde Belspo het UrbanEARS project goed binnen de STEREO III call, wat hier ook onderzoek gaat op doen (UGent, VITO).

jaar tot jaar te vergelijken gezien de meteorologie en de beperkte beschikbaarheid van bruikbare, wolkenvrije beelden te klein is. De auteurs suggereren een uitmiddeling op maandbasis zodat we per maand verschillende jaren met elkaar kunnen vergelijken, maar ook voor een aggregatie over het zomer seizoen (juni-augustus) blijven de oppervlaktetemperaturen consistent met weersobservaties. Verder vinden ze dat de sterkte van het oppervlakte stedelijk hitte-eiland effect (UHII) op zich een weinig zeggende indicator is om hittegolven en extreme jaren te kunnen identificeren. Dit kan opnieuw terug te brengen zijn een veranderde interactie tussen het oppervlak en de oppervlaktetemperatuur bijvoorbeeld t.g.v. een droge periode tijdens een extreem jaar (Lu and Weng 2006).

2.3.2 Relevante indicatoren, niet gebaseerd op oppervlaktetemperatuur

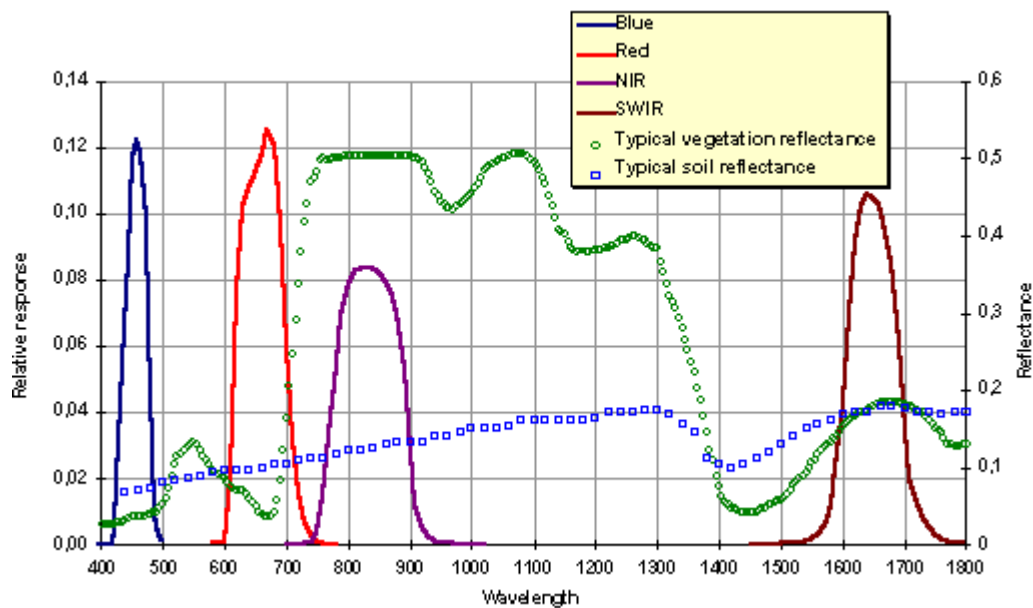
Tenslotte wensen we nog even kort terug te komen op andere mogelijke remote sensing gebaseerde indicatoren, niet gebaseerd op de afleiding van oppervlaktetemperatuur of LST. Het gaat hier om indicatoren die niet rechtstreeks de stedelijke oppervlaktetemperatuur weergeven, maar wel in sterke relatie staan tot die temperatuur. In dit project kunnen deze echter jammer genoeg niet in detail onderzocht worden wegens het beperkte tijds kader en de nogal uitgebreide data-preprocessing die vooraf gaat aan dergelijke analyses.

Het is geweten dat de oppervlaktetemperaturen heel sterk correleren met de **fractie ondoorlaatbaar oppervlak** (impervious surface area, ISA), zowel op basis van de Landsat hoge resolutie data (Lu and Weng 2006b; Yuan and Bauer 2007; Bauer et al. 2004) als voor MODIS 1 km data (Knight and Voth 2011). Voor een overzicht zie (Weng 2012) . Het afleiden van de totale ISA voor de Vlaamse steden, of Vlaanderen op z'n geheel zou dus m.a.w. ook heel relevante indicatoren kunnen opleveren voor het hitte eiland effect en de verstedelijking van Vlaanderen. Dergelijke indicatoren stellen gebruikers verder ook in staat om trends t.g.v. klimaatverandering te onderscheiden van trends t.g.v. verstedelijking. In opdracht van VMM werd in september 2013 een opdracht¹⁹ afgerond door GIM voor het opstellen van onder meer dergelijke verhardingskaarten.

Analoge redeneringen kunnen gemaakt worden voor het bekijken van vegetatie abundantie indicatoren zoals een **normalized difference vegetation index** (NDVI) welke de fractie vegetatie weergeeft in een bepaalde pixel. Specifiek voor de laatste bezit de remote sensing afdeling van VITO een rijke geschiedenis als service center voor de SPOT-VEGETATION en de nieuwe Proba-V satelliet. De NDVI is een relatief makkelijk afleidbare parameter die een goede maat geeft voor het aandeel vegetatie in een pixel. Het is zo dat planten zonnestraling met een golflengte tussen 0.4 en 0.7 μm gaan absorberen om aan fotosynthese te doen. Deze spectrale band wordt aangeduid met de term PAR-band of 'Photosynthetically Active Radiation'-band. Voor deze golflengtes ziet vegetatie er dus relatief donker uit. In het nabije infrarood (NIR, golflengtes tussen 0.7 en 1.1 μm) echter zullen planten de meeste straling gaan reflecteren, wat in feite op natuurlijke wijze zo geëvolueerd is. Indien planten ook de IR straling zouden absorberen, zouden ze oververhitten, cel schade oplopen en afsterven.

¹⁹ Voor die studie werden GIS gegevens zoals van het GRB, bedrijven, landbouwgebruikspcelen, infrastructuur bedrijven, en databank wegverhardingen gecombineerd met een hoogte model en remote sensing beelden (luchtfoto's). Contactpersoon bij VMM: Thomas Vansteenkiste. Voor GIM: Rob Vangeneugden.

Figuur 44: Typische spectrale reflectantie van vegetatie (groene cirkels) en gewone grond (blauwe cirkels)



In deze figuur zijn de banden van het SPOT-VEGETATION instrument weergegeven

Bron: VITO (www.spot-vegetation.com)

De NDVI wordt eenvoudig gedefinieerd als het relatieve verschil tussen het NIR en band in het PAR deel van het spectrum:

$$NDVI = \frac{NIR - PAR}{NIR + PAR}$$

En is dus een directe maat voor de abundantie van vegetatie in de onderliggende pixel. NDVI kan bv. gebruikt worden voor het monitoren van vegetatie in steden. We gaan er echter hier niet verder op in.

2.4 Toepassing voor Vlaamse steden

In dit onderdeel zullen we effectief nu een aantal LST-gebaseerde indicatoren verkennen voor Vlaanderen. Zoals hoger besproken werken we in deze analyse uitsluitend met MODIS data, afkomstig van de EOS Terra en EOS Aqua satellieten. We geven eerst kort de verwerkingsstappen aan die we gedaan hebben en bespreken de aannames voor wat we in de analyse als 'stad' en als 'ruraal' gebied definiëren. Vervolgens leiden we het verband af tussen de sterkte van het SUHI en een aantal karakteristieken van Vlaamse steden zoals bevolkingsdichtheid en fractie verharding van de administratieve zone. Tenslotte stellen we een aantal indicatoren op die expliciet gebruik maken van het ruimtelijk karakter van de satelliet data: de hot island area en de hot island population.

2.4.1 Verwerking LST beelden

Zoals hoger aangegeven beperkten we ons in deze analyse tot alle LST beelden van het MODIS instrument. We gebruiken hiervoor het online beschikbare MOD11A1 en MYD11A1 oppervlakte. MODIS oppervlaktetemperatuurdata zijn relatief vlot beschikbaar via het Earth Observing System - Data and Information System van NASA, het Amerikaans ruimtevaartagentschap, meer bepaald via het Reverb tool (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>). Dit online tool bevat een zoekfunctie waarin een gebruiker kan zoeken op basis van het geografisch interessegebied, een tijdsvenster en een productomschrijving. Voor MODIS oppervlaktetemperaturen zoeken we op product codes MOD11A1 en MYD11A1, welke de dagelijkse globale aggregaties zijn op een 1 km rooster. Om de data voor Vlaanderen te bekomen dient met een geografisch zoekvenster (latitude / longitude) gewerkt te worden dat minstens Vlaanderen bedekt. Eens de hdf-eos bestanden klaargezet zijn op de FTP

servers van NASA kan de gebruiker ze downloaden en archiveren op lokale storage. De totale dataset, gedownload voor de periode 2002 – 2013 bedraagt 52 Gb.

Hierna dienen de beelden geprojecteerd te worden op een gemeenschappelijk rooster boven Vlaanderen. Deze projectie gebeurt aan de hand van het MRTSwath tool (https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool_swath) en meer bepaald het *resample* commando dat deel uitmaakt van de toolkit. Daar deze tool niet alle projectiesystemen ondersteunt, konden we geen gebruik maken van de gekende Belgische Lambert 72 projectie. We maakten daarom gebruik van het Europese grid systeem (<http://spatialreference.org/ref/epsg/etrs89-etrs-laea/>) dat de INSPIRE-richtlijn volgt (<http://inspire.ec.europa.eu/>). Dit projectiesysteem wordt wel makkelijk ondersteund in de resample tool. Een voorbeeld parameter file (.prm) voor de resample tool is hieronder opgenomen met de correcte projectie parameters.

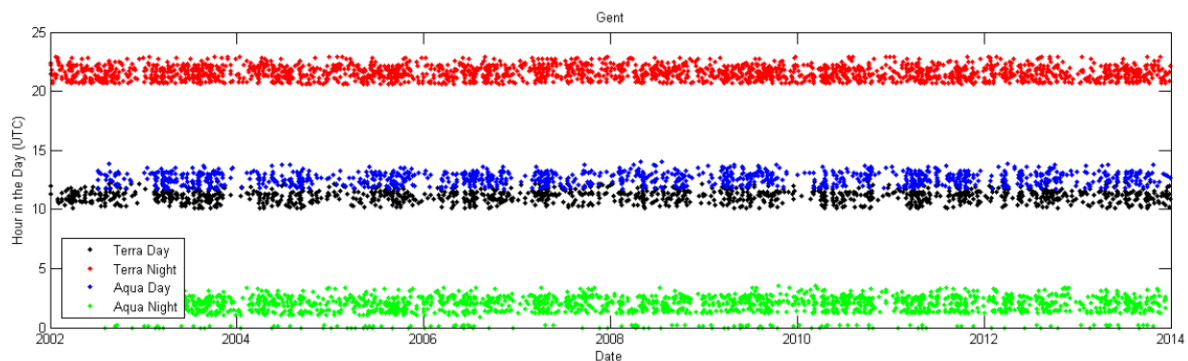
```

INPUT_FILENAME = MOD11A1.A2002002.h18v04.005.2007079055204.hdf
SPECTRAL_SUBSET = ( 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 )
SPATIAL_SUBSET_TYPE = OUTPUT_PROJ_COORDS
SPATIAL_SUBSET_UL_CORNER = ( 3777000.0 3180000.0 )
SPATIAL_SUBSET_LR_CORNER = ( 4080000.0 2920000.0 )
OUTPUT_FILENAME = /home/maiheub/test.hdf
RESAMPLING_TYPE = NEAREST_NEIGHBOR
OUTPUT_PROJECTION_TYPE = LA
OUTPUT_PROJECTION_PARAMETERS = (
6378137.0 0.0 0.0
0.0 10.0 52.0
4321000.0 3210000.0 0.0
0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 )
DATUM = NoDatum
OUTPUT_PIXEL_SIZE = 1000

```

Gezien MODIS zich aan boord van 2 heliosynchrone satellieten bevindt, hebben we tot 4 opnamemomenten per dag, telkens op ongeveer hetzelfde tijdstip.

Figuur 45: Overvliegtijden voor de MODIS instrumenten aan boord de Terra en Aqua satellieten boven Gent (UTC)



Bron: UTC

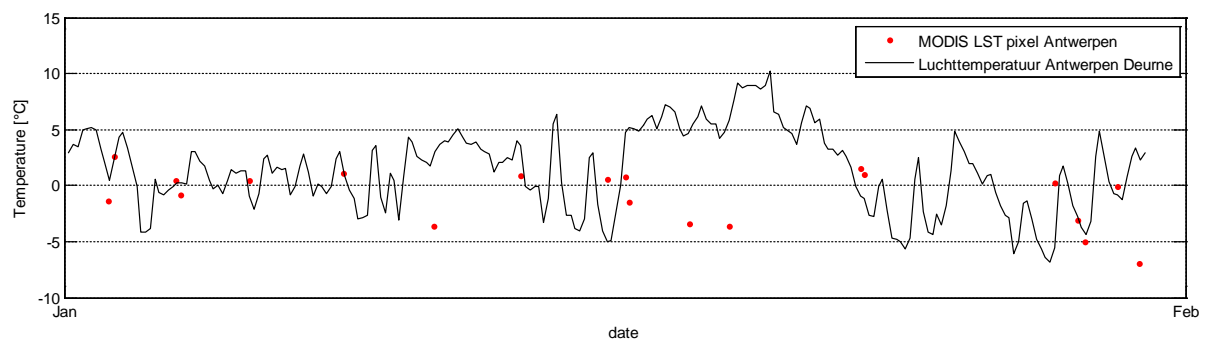
Gemiddeld gesproken vinden we (afgerond) voor het Terra platform 11:10 overdag en 21:30 's avonds, voor de Aqua satelliet: 12:40 en 02:00 's nachts (UT). Tijdens de zomer maanden betekent dit dat we een waarneming hebben rond 13:00 - 15:00 's middags en rond 04:00 's nachts, welke toch relatief goed overeenkomen met de dag minima en maxima, dus de gemiddelden zouden niet zo heel veel mogen afwijken. We zien ook dat de timing relatief stabiel blijft en er zich geen significante driften voordoen over de ganse periode 2002 - 2013. De standaardafwijking is telkens ongeveer een half uur (iets meer, zo'n 45', voor Aqua 's nachts).

Het is wel belangrijk in te zien dat door allerlei drift effecten op lange termijn de baan van de satelliet kan beginnen afwijken, waardoor het tijdstip wanneer de satelliet passeert over dezelfde locatie geleidelijk kan verschuiven. Dit is een belangrijke overweging om in acht te nemen wanneer men indicatoren wil afleiden die bruikbaar moeten zijn op langere termijn. Bij het NOAA-AVHRR platform is dit bijvoorbeeld een gekend fenomeen waarvoor dient gecorrigeerd te worden indien men de datasets

wenst te gebruiken voor lange termijn analyse (Jin and Treadon 2003; Julien et al. 2007; Sobrino et al. 2008).

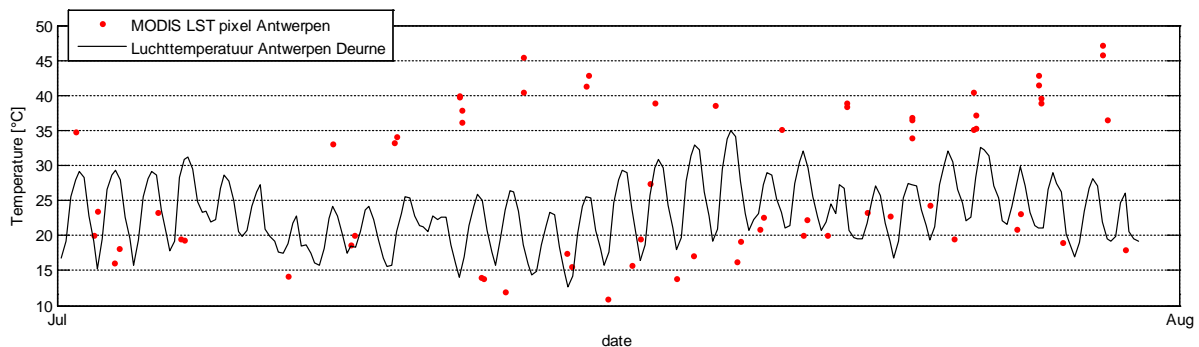
Het is verder evident dat tijdens bewolkte periodes geen opnames gemaakt kunnen worden van de oppervlaktetemperatuur. Waterdamp absorbeert immers in relatief hoge mate de infrarode straling waardoor het oppervlak vanaf de ruimte niet langer zichtbaar is in het infrarode deel van het spectrum. H₂O is omwille hiervan ook een erg belangrijk broeikasgas, naast CO₂, hoewel de rechtstreekse invloed van de mens op de hoeveelheid ervan in de atmosfeer verwaarloosbaar is. Om een idee te krijgen van die beschikbaarheid hebben we even ingezoomd op een winter en een zomermaand. In onderstaande figuren zien we de vergelijking voor januari 2006 en juli 2006.

Figuur 46: Uitvergroting van de vergelijking tussen MODIS LST waarden en luchttemperatuur gemeten te Antwerpen Deurne gedurende de maand januari 2006



Bron: VITO

Figuur 47: Uitvergroting van de vergelijking tussen MODIS LST waarden en luchttemperatuur gemeten te Antwerpen Deurne gedurende de maand juli 2006

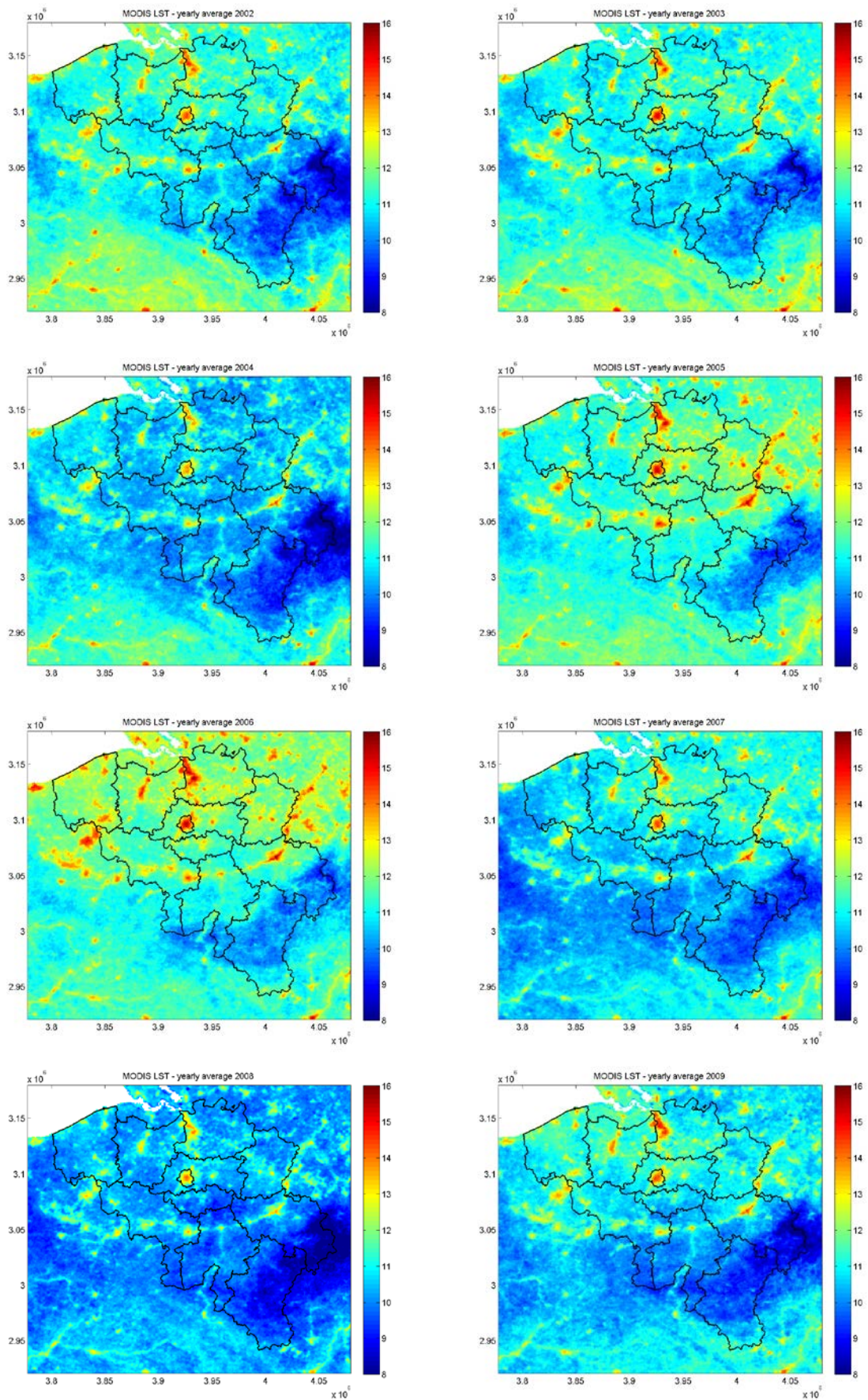


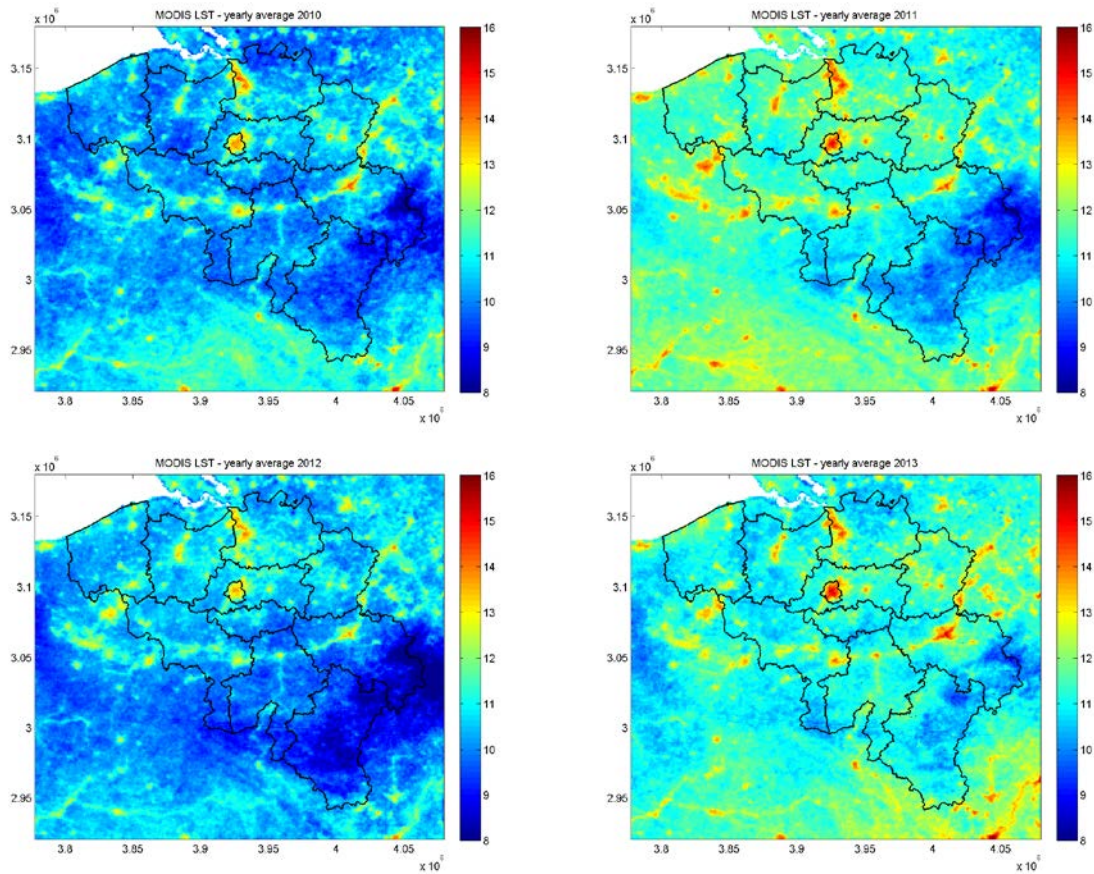
Bron: VITO

Gedurende de wintermaand zien we duidelijk minder opnames, maar ook tijdens de maand juli 2006 zien we duidelijk periodes zonder succesvolle opnames. Dit alles betekent dus m.a.w. dat alle resultaten die we op basis van deze oppervlaktetemperatuur beelden zullen afleiden, gebiased zullen zijn naar wolkenvrije dagen. We zullen hier later nog op terugkomen.

Voorafgaand aan de analyse zijn alle beelden verwerkt en geprojecteerd naar hetzelfde 1x1 km² rooster. We hebben enerzijds maandgemiddelden aangemaakt, en anderzijds jaargemiddelde kaarten, en dit voor de periode 2002 - 2013. Voor de aggregatie naar maandgemiddelden berekenen we per pixel het rekenkundig gemiddelde overheen de verschillende dag-opnames voor elke maand, uiteraard rekening houdend met ontbrekende waarden. We tonen ter illustratie de jaargemiddelde kaarten hieronder in Figuur 48.

Figuur 48: Afbeeldingen van de jaargemiddelde MODIS LST voor België



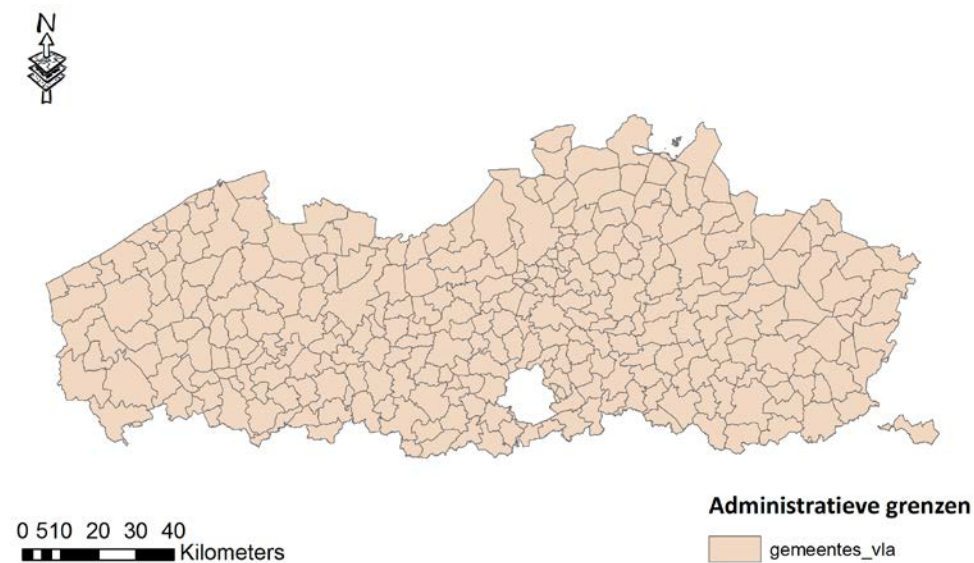


Bron: VITO

2.4.2 Ruimtelijke maskers voor stad en platteland

Voor het aflijnen van de steden en het rurale gebied rond een stad dienen we een definitie naar voor te schuiven. Hiervoor zullen we gebruik maken van een combinatie van landgebruik en de administratieve grenzen zoals aangegeven door onderstaande figuur.

Figuur 49: Administratieve grenzen van de Vlaamse steden en gemeenten



Daarnaast zullen we ruraal en verstedelijkt gebied definiëren op basis van de EEA CORINE²⁰ landcover dataset. Er bestaan verschillende manieren om de 'stedelijke omgeving' te definiëren, en de resultaten kunnen zeer sterk afhankelijk hiervan zijn. Om een voorbeeld te geven: het Antwerpse havengebied wordt gekenmerkt door zeer veel verhardingen en daar kunnen de oppervlaktetemperaturen hoog oplopen, zie ook Lauwaet et al, (2013). Er wonen effectief echter in verhouding weinig mensen. De vraag is m.a.w. of we deze zone meenemen of niet. Men kan zich vervolgens ook laten leiden door de administratieve grenzen van de stad, of gebruik maken van landgebruiksdatasets en een zoekalgoritme om stedelijke pixels te identificeren. Deze methode werd bijvoorbeeld in (Zhou et al. 2013) toegepast. Ook om het rurale gebied per stad te definiëren kunnen verschillende methodieken toegepast worden, ofwel een eenvoudige buffer van bijvoorbeeld 10 km vanaf de stadsrand, onafhankelijk van de grootte van de stad. Ofwel kan bv. een gebied gedefinieerd worden rond de stad waarvan de oppervlakte een aantal keer de oppervlakte van de stad is, zie ook (Zhou et al. 2013).

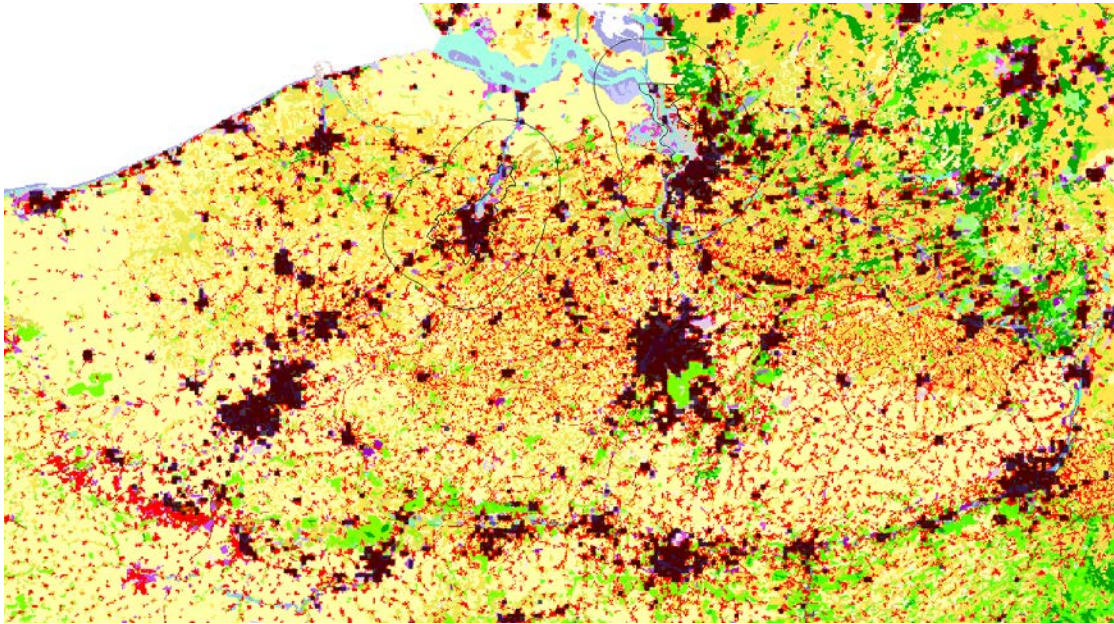
Door de verstedelijkingsgraad van Vlaanderen is het moeilijk om te werken met buffers rond een stad die bv. 2 of 3 keer zo groot zijn omdat dan de bufferafstand afhangt van de grootte van de stad/gemeente. Dit zou inhouden dat de rurale zoekzone voor kleinere gemeenten slechts een paar 100 m betreft en we dus slechts een band van één 1 km pixel rond elke polygon met de administratieve grenzen trekken. We kiezen er dus voor om de rurale zoekzone rond elke stad of gemeente te kiezen als een buffer van 10 km rond de administratieve grenzen van die stad/gemeente. Uiteraard zullen er binnen de rurale zoekzone van de kleinere steden ook verstedelijkte kernen aanwezig zijn die niet tot de administratieve grenzen van de stad/gemeente zelf behoren. Daarom spreken we van een zoekzone en zullen we binnen deze zoekzone de rurale temperatuur definiëren in functie van een landcover masker.

Doordat de CORINE dataset, die we voor dit masker zullen gebruiken, op relatief gezien hoge resolutie is (100 m), zullen meerdere CORINE pixels binnen een 1x1 km² pixel liggen.

- Als definitie voor **landelijk gebied** nemen we alle pixels waarvoor de totale fractie artificiële bedekking (CORINE klassen 111 t.e.m. 142) kleiner is dan 10 % van het oppervlak van de pixel en er géén wateroppervlakken aanwezig zijn (i.e. de bedekkingsgraad met CORINE klassen voor wateroppervlakken moeten gelijk aan 0 zijn).
- Voor stedelijk **gebied** nemen we alle pixels waarvoor de som van de CORINE fracties voor continue en discontinu stedelijk gebied (111, 112); industrieel gebied (121); '*road and rail networks + associated land*' (122); '*Green urban areas*' (141) en '*Sport & leisure facilities*' (142) hoger is dan 70 % voor de desbetreffende pixel. Dit zijn alle artificiële oppervlakken behalve havengebied, airports en '*mine, dump en construction sites*'. De resulterende maskers zijn hieronder afgebeeld voor Vlaanderen met een uitvergroting van het ruraal masker in Antwerpen en Gent (*Figuur 52*).

²⁰ <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster-3>

Figuur 50: Resultierend masker voor stedelijk gebied afgebeeld op het CORINE grid



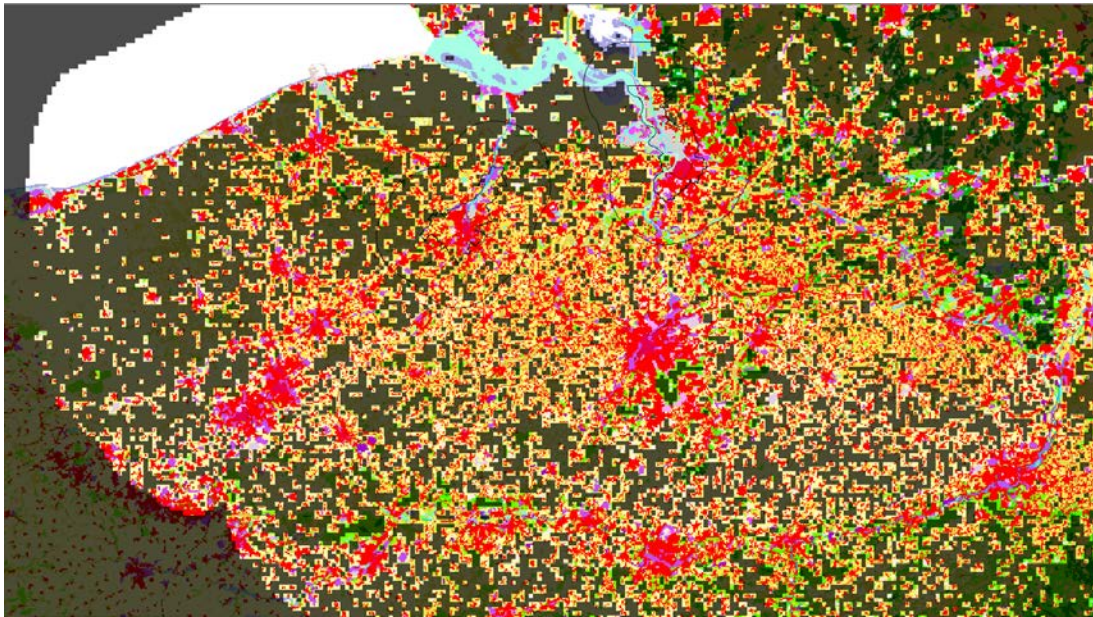
Pixels die als 'stedelijk' gelabeld worden zijn aangegeven met een half transparante zwarte kleur.

Bron: European Environment Agency

Gezien water een totaal andere dynamiek heeft voor wat betreft oppervlaktetemperatuur kan dit een vertekend beeld geven voor wat betreft het SUHI effect, afhankelijk van het moment in het jaar. Daarom werd besloten om die wateroppervlakken weg te laten uit het rurale masker. Op zich geldt dit enkel voor grote wateroppervlakken (die zichtbaar zijn in de CORINE dataset, bv. het drinkwater bekken ten noordwesten van Gent), kleine binnenstedelijke waterlopen zitten sowieso in het LST signaal vervat.

Onze definitie zal verder ook het havengebied voor bijvoorbeeld Gent en Antwerpen niet tot de stad rekenen en we dus enkel het bewoonde gebied nemen. Ook zien we dat voor beide steden het rurale gebied zich voornamelijk in de polders ten noorden van de steden bevindt. Door het minder stringent maken van de voorwaarden voor een rurale pixel zouden we iets meer pixels ten zuiden kunnen meenemen, maar door de dichte bebouwing in Vlaanderen en de resolutie van $1 \times 1 \text{ km}^2$ is het niet eenvoudig en onduidelijk waar de grens te trekken.

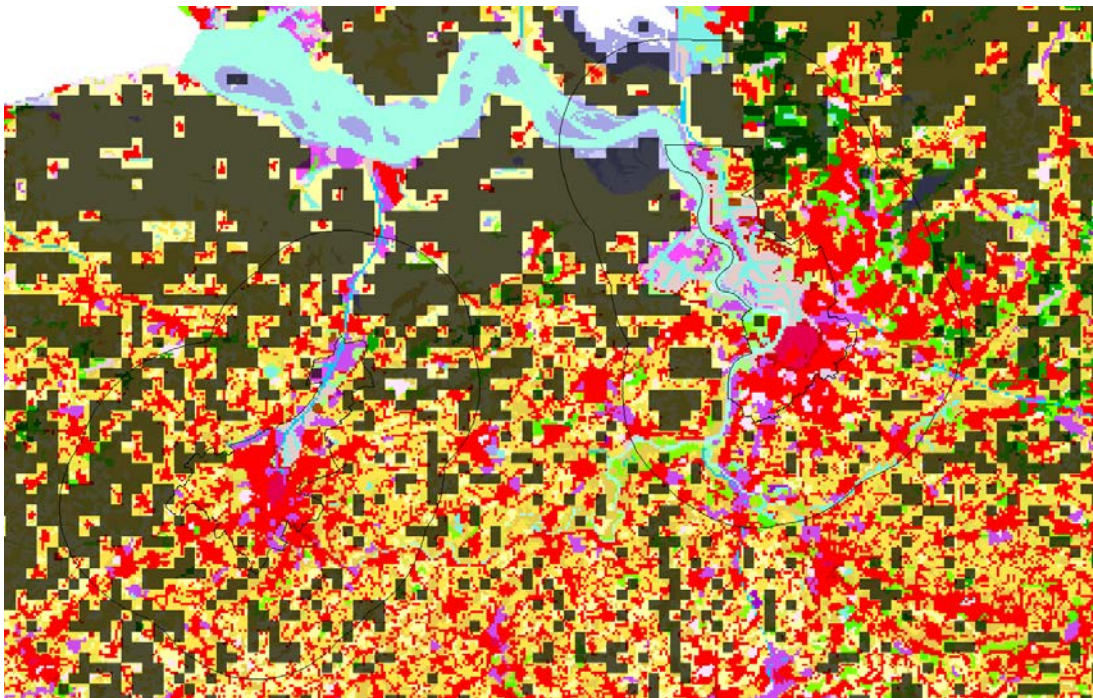
Figuur 51: Resultierend masker voor ruraal gebied, afgebeeld op het CORINE grid



Pixels die als 'ruraal' gelabeld worden zijn aangegeven met een half transparante zwarte kleur

Bron: European Environment Agency

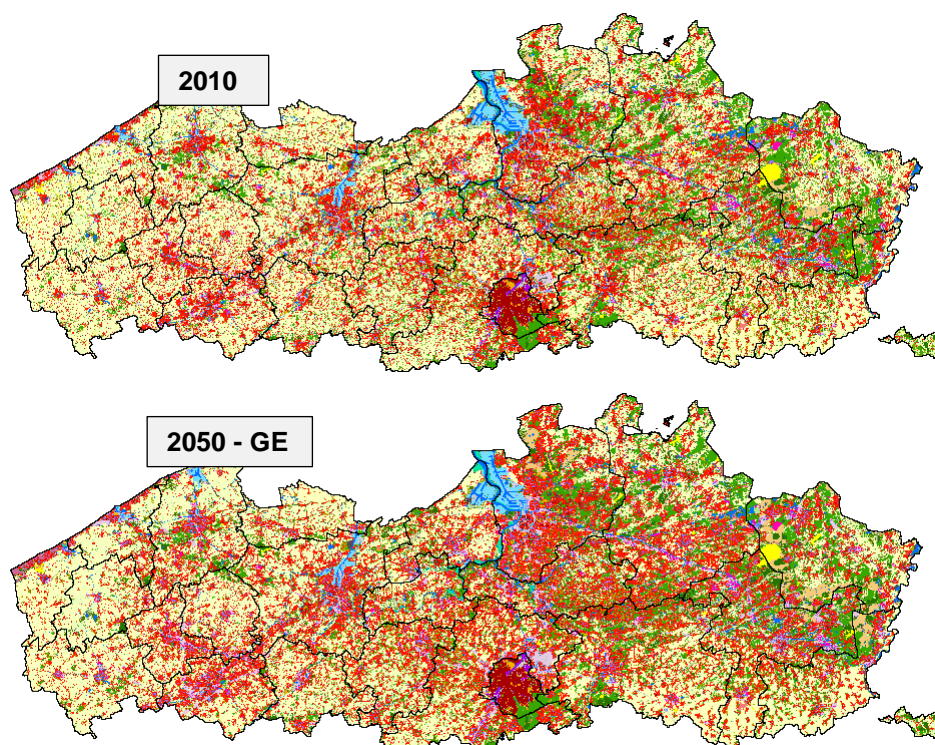
Figuur 52: Uitvergroting ruraal masker uit Figuur 51 voor Antwerpen en Gent



Bron: European Environment Agency

Een zeer belangrijke opmerking die we hierbij dienen te maken is het feit dat landgebruik (en ook bevolkingsdichtheid, zie verder) geen statisch gegeven is. Stedelijke ontwikkeling zorgt ervoor dat we in de loop der jaren meer terrein als stedelijk dienen te bestempelen ten koste van ruraal gebied. In Engelen et al, 2011 wordt een inschatting gedaan van de verandering in ruimtegebruik onder een aantal scenario's. Onderstaande *Figuur 53* illustreert dit.

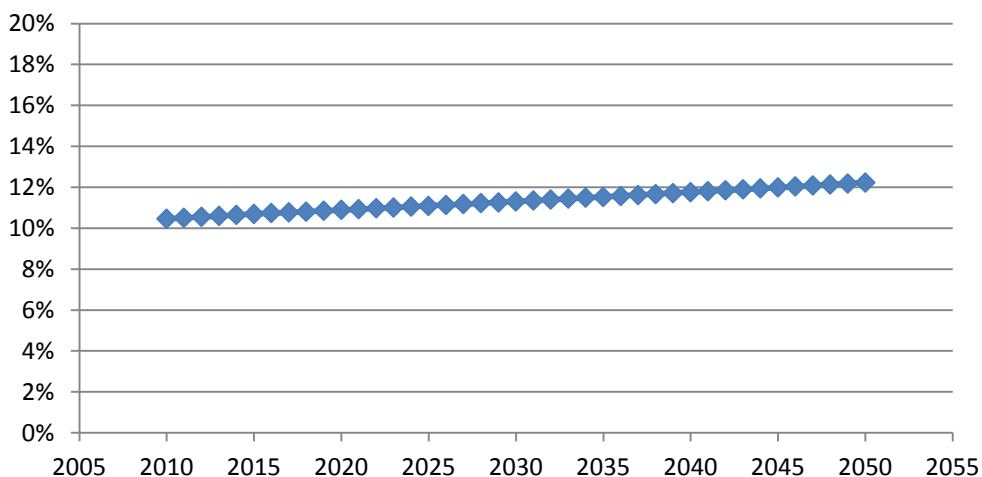
Figuur 53: Vergelijking in landgebruik simulaties a.d.h.v. het RuimteModel Vlaanderen, bovenaan de referentie (2010), onderaan de prognose voor 2050 in het 'Global Economy' scenario



We merken duidelijk een toegenomen verstedelijking (rode kleur).

Bron: Engelen et al. (2011)

Figuur 54: Totale fractie verhard gebied in Vlaanderen, gebaseerd op een inschatting met het RuimteModel



Bron: VITO

Figuur 54 geeft ter illustratie een inschatting²¹ van de toename van het percentage verhard gebied in Vlaanderen tussen 2010 en 2050 onder een 'business as usual' scenario. We zien een toename met 20 % in 50 jaar tijd, van ongeveer 10 % verhard terrein in Vlaanderen naar iets meer dan 12 %.

²¹ Voor deze eenvoudige inschatting werd het aandeel verhard gebied als constant beschouwd in elke landgebruiksklasse. De berekening van het aandeel verhard in elke klasse werd gedaan volgens de aanpak beschreven in het MIRA O&O rapport 'Verfijning ruimtemodel', MIRA/2011/08, mei 2011. (Tabel 19 in dat document).

Uiteraard kan deze evolutie niet genegeerd worden bij het opstellen van landgebruiksmaskers. Hieronder lijsten we mogelijke databronnen op voor het in kaart brengen van dynamisch landgebruik:

- De CORINE datasets, die om de paar jaar wordt bijgewerkt. Beschikbare versies zijn momenteel CORINE 1990, 2000 en 2006. Momenteel wordt de versie voor het jaar 2012 voorbereid.
- RuimteModel Vlaanderen:
 - Hierbij zijn prognoses tot 2050 beschikbaar, gebruikt voor het bestuderen van het Vlaamse ruimtegebruik in 4 wereldbeelden. Het RuimteModel werd hier met een relatief gedetailleerde classificatie geconfigureerd (Engelen et al, 2011). Met deze gedetailleerde classificatie is echter geen systematische doorrekening van historische periodes mogelijk wegens gebrek aan historische landgebruiksinformatie in Vlaanderen op het gewenste niveau van detail.
 - In het Belspo MULTIMODE²² project werd door VITO het RuimteModel geconfigureerd voor België aan de hand van het CORINE classificatie schema. De relaties tussen de verschillende landgebruiksklassen werden gekalibreerd op basis van de verschillen tussen CORINE 2006 en 2000. Nadien werd een dynamische doorrekening gedaan van het landgebruik voor de periode 2000 – 2060.

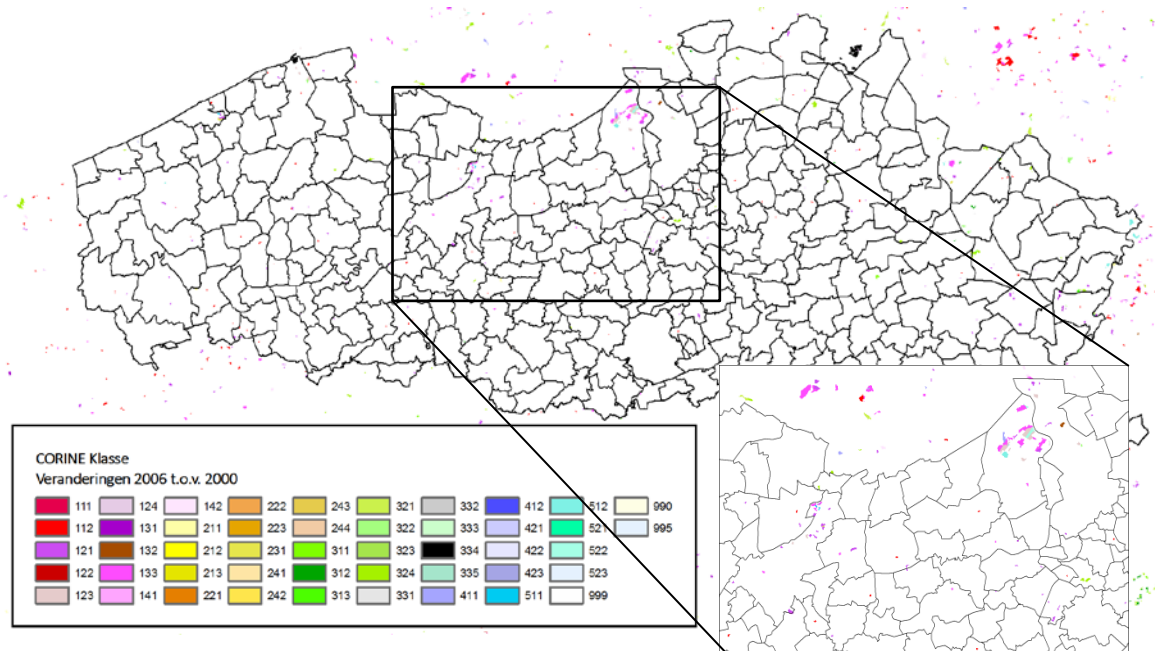
De resultaten van het MULTIMODE project zouden dus kunnen gebruikt worden voor het in rekening brengen van jaarlijks veranderend landgebruik²³. Het is echter zo dat de beslisregels waarmee het RuimteModel bepaalt of een roostercel al of niet zal verstedelijkt worden, deels gebaseerd zijn op statistiek. Het is dus niet noodzakelijk zo dat als een cel in het RuimteModel wordt verstedelijkt, dat dat in werkelijkheid dan effectief ook zo gaat zijn.

Belangrijker in deze is echter de vraag of de verschillen tussen het landgebruik voor de beschouwde periode (2002 en 2013) significant genoeg zijn om veel verschil te maken in de definitie van onze landgebruiksmaskers. Hiervoor kunnen we bv. gaan kijken naar de verschillen tussen de CORINE 2006 en de CORINE 2000 datasets. Deze zijn beschikbaar online via het dataportaal van de EEA en hieronder afgebeeld.

²² MULTIMODE, Multiscalar & Multiagent Modelling Framework for Assessing Sustainable Futures in a Globalised Environment, BELSPO project SD/TA/01A, <http://www.belspo.be/belspo/fedra/proj.asp?l=de&COD=SD/TA/01A>, 2006 - 2009

²³ Hoewel het zo is dat de jaarlijkse resultaten niet gearchiveerd zijn tijdens dat project.

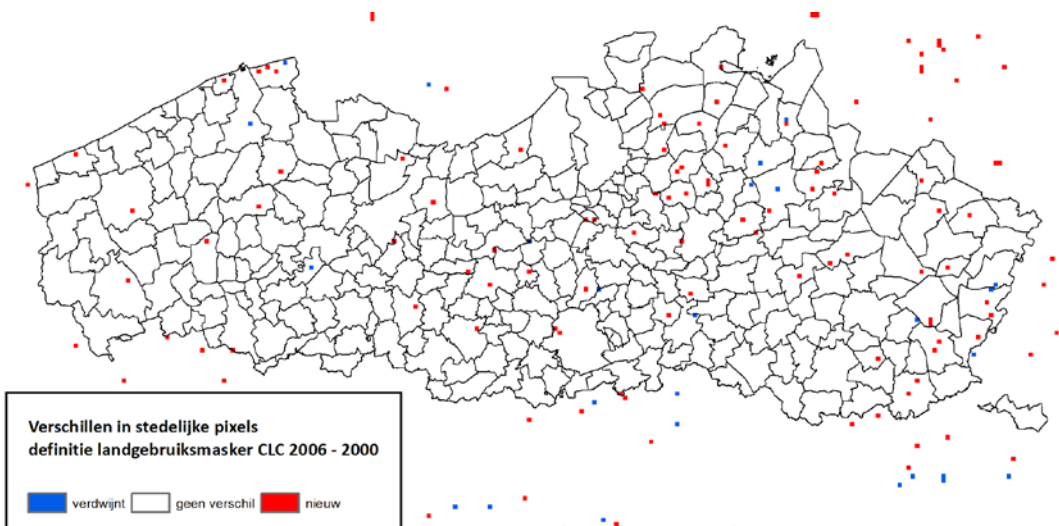
Figuur 55: Wijzigingen in de CORINE 2006 dataset t.o.v. de versie 2000, met detail voor Gent en Antwerpen



Bron: eigen (VITO) verwerking van data van de European Environment Agency

We merken in bovenstaande voornamelijk wijzigingen in stukken van het havengebied die een andere invulling krijgen. De veranderingen in de continue stedelijke gebieden blijft op deze tijdschaal en op de resolutie van 100m beperkter. Dit geldt uiteraard niet meer wanneer we naar langere periodes kijken (vb. 2050). Al bij al blijven de wijzigingen heel beperkt in deze periode (CLC2006 t.o.v. 2000), het is dus de vraag of dergelijke wijzigingen veel verschil zullen maken in de definitie van de landgebruiksmaskers. We merken hierbij ook op dat de definitie van de landgebruiksmaskers sowieso op een drempelwaarde gebaseerd zijn en er dus significante wijzigingen dienen op te treden vooraleer we een bijkomende pixel van 1x1 km² als 'stedelijk' zullen bestempelen.

Figuur 56: Verschillen in het stedelijke landgebruiksmasker voor CORINE 2006 t.o.v. CORINE 2000



Rode pixels geven aan welke 1x1 km² roosterzellen we in CORINE 2006 bijkomend zouden vlaggen als zijnde stedelijk, blauwe geven aan welke roosterzellen we niet langer als stedelijk zouden beschouwen.

Bron: eigen (VITO) verwerking van data van de European Environment Agency

Bovenstaande figuur geeft de verschillen tussen CORINE 2000 en 2006 weer in het stedelijk landgebruiksmasker dat we hoger in deze paragraaf definieerden. We merken dat in de grote steden

Gent en Antwerpen er voor deze periode geen echte verschillen optreden en dat voor de meeste andere steden en gemeenten de verschillen zich beperken tot slechts 0, 1 of 2 pixels. Over de beschouwde periode van 10 jaar zal dit dus vermoedelijk geen aanleiding geven tot significante verschillen in de indicatoren. Het dient wel gesteld echter dat wanneer men langere periodes bekijkt (zoals in het derde deel van dit rapport) men uiteraard wel rekening dient te houden met een veranderend landgebruik.

In de volgende stukken zullen we verder ook gebruik maken van datasets die de fractie verharding weergegeven en de bevolkingsdichtheid. Voor beiden gelden gelijkaardige opmerkingen. Voor wat betreft de bevolkingsdichtheid bestaan²⁴ gegevens op jaarbasis sinds 2004, maar echter wel op arrondissementniveau. Om de gegevens op een rooster van 1x1 km² te krijgen (nodig voor deze analyse) zouden we de bevolkingsgegevens dienen te spreiden met een landgebruikskaart. Dit is effectief zo gebeurd in het MULTIMODE project. Het in detail bekijken hiervan zou een interessante studie zijn, maar valt buiten de scope van dit project.

Op zich kan men ook het meenemen van een veranderend landgebruik in de indicatoren aanwenden om een onderscheid te maken tussen veranderingen in de oppervlaktetemperatuur ten gevolge van stedelijke ontwikkeling en klimaatverandering. Dit in detail bekijken zou ons echter ook hier veel te ver leiden en het is maar de vraag in hoeverre een dergelijk signaal niet verdwijnt in de andere onzekerheden die met deze analyse gemoeid zijn.

2.4.3 Analyse van de LST waarden

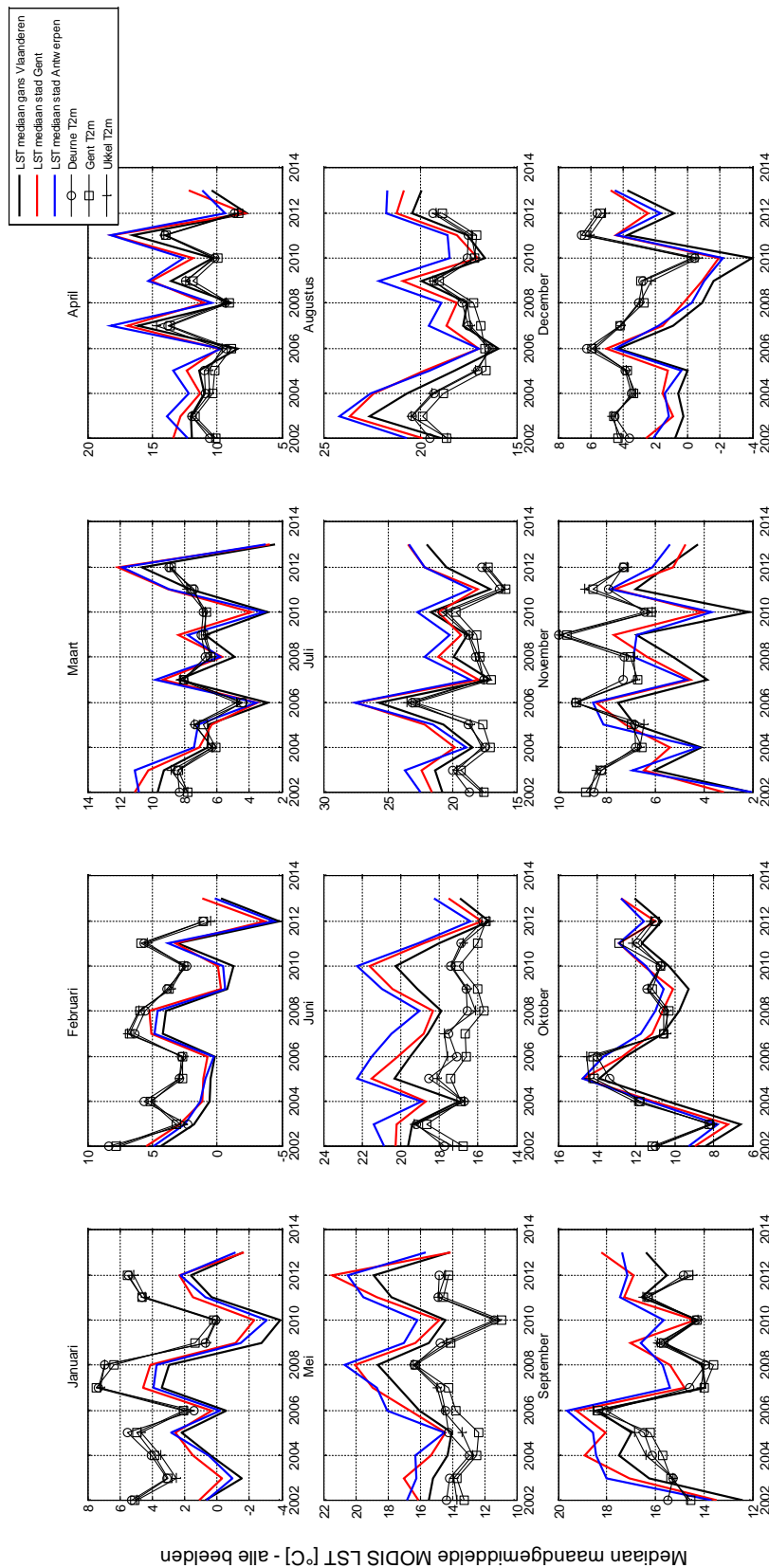
We bekijken allereerst de maand/zomergemiddelde oppervlaktetemperatuur beelden en gaan een vergelijking aan met de luchttemperaturen. Deze analyse beperkt zich tot Gent en Antwerpen. Zonder onderscheid te maken tussen dag en nachtbeelden bekijken we eerst even de mediaan oppervlaktetemperaturen voor deze twee steden (en gans Vlaanderen) per maand. Hier bij nemen we het volledige masker van de administratieve zone in rekening. Het resultaat is hieronder in Figuur 57 afgebeeld.

Er zijn een aantal zaken die opvallen. Op zich volgen de LST temperaturen relatief goed de gemeten lucht temperaturen (T_{2m}). We gebruiken hiervoor de metingen van de luchthaven van Deurne. Zo komt bijvoorbeeld juli 2006 als zeer warme maand duidelijk in zowel de LST als T_{2m} data naar voren, terwijl december 2010 dan weer zowel lage oppervlakte als luchttemperaturen op tekende. We zien verder ook duidelijk een lagere LST in de wintermaanden t.o.v. de luchttemperatuur en een hogere LST in de zomer. Dit laatste is enigszins verassend gezien dit er bijvoorbeeld voor Januari zou op duiden dat er continu een temperatuur inversie zou zijn. De verklaring kan echter ook te vinden zijn in de intrinsieke beperkingen van het werken met satelliet data: bewolking.

De LST opnames hangen samen met wolkeloze momenten. In de winter gaan deze typisch gepaard met heel koude nachten met sterke afkoeling aan de grond, in de zomer is die zelfde afkoeling er, maar door de hogere zonnestand een veel sterkere opwarming overdag. Wanneer we effectief de bewolgingsgraad (uitgedrukt in tienden: 0: wolkenvrij, 10: volledig bewolkt) erbij halen en de gemiddelde (of we maken een boxplot) luchttemperatuur uitzetten over de verschillende klassen van bewolking, dan merken we in de wintermaanden november – januari een duidelijk lagere luchttemperatuur bij wolkenvrije dagen. In de zomer is de tendens eerder omgekeerd en merken we een lagere temperatuur bij hogere bewolgingsgraad, hoewel misschien iets minder uitgesproken bij lagere bewolgingsgraden. Gezien satelliet beelden enkel bij lage bewolgingsgraad kunnen genomen worden, kunnen we dus besluiten dat er in de winter maanden een koude bias zal zijn in de LST beelden t.o.v. het werkelijke maandgemiddelde en in de zomermaanden een warme bias (zij het iets minder uitgesproken). Dit illustreert alvast mooi hoe de beperkte sampling in de tijd het beeld verstoort en het opstellen van stabiele indicatoren bemoeilijkt.

²⁴ Zie website van de federale directie voor statistiek, <http://statbel.fgov.be/nl/statistiek/webinterface/>

Figuur 57: LST medianen voor het stedelijke masker voor Gent, Antwerpen en gans Vlaanderen per maand versus jaar

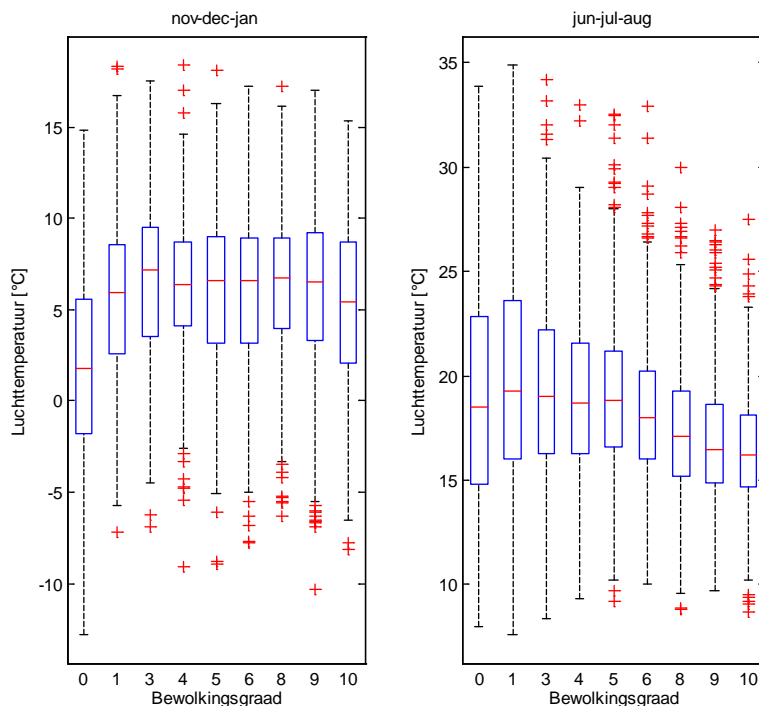


Mediaan maandgemiddelde MODIS LST [°C] - alle beelden

De zwarte symbolen die erbij geplot zijn geven de gemeten 2m luchttemperaturen voor Deurne, Gent en Ukkel.

Bron: <http://meteo.infospace.ru/main.htm>

Figuur 58: Analyse waarbij boxplots genomen zijn van de 2m luchttemperatuur data te Deurne (periode 2002 - 2012) en uitgezet als functie van de bewolgingsgraad (in tienden, waarbij 0 wolkenvrij is en 10 volledig bewolkt)



Links zien we de analyse voor de wintermaanden en rechts de zomermaanden.

Bron: <http://meteo.infospace.ru/main.htm>

Naast de bias geïntroduceerd door de wolkenbedekking kan het goed zijn dat ook een bias wordt geïntroduceerd door de karakteristieken van de heliosynchrone baan van de satellieten, waardoor die altijd op ongeveer dezelfde lokale gemiddelde zonnetijd²⁵ over dezelfde plek vliegen. Dit maakt dat we altijd ongeveer de 4 dezelfde momenten van de dag samplen met de MODIS instrumenten. De tijdsresolutie van de lange termijn meteo data (elke 6 uur voor 2004 en daarna elke 3 uur) die we voor dit project ter beschikking hadden bemoeilijkt enigszins echter de verdere analyse.

Niettemin zien we dat de maandgemiddelde LST er toch in slaagt om een aantal 'extreme' maanden eruit te halen.

2.4.4 SUHI effect voor Vlaamse steden als functie van de bevolkingsdichtheid

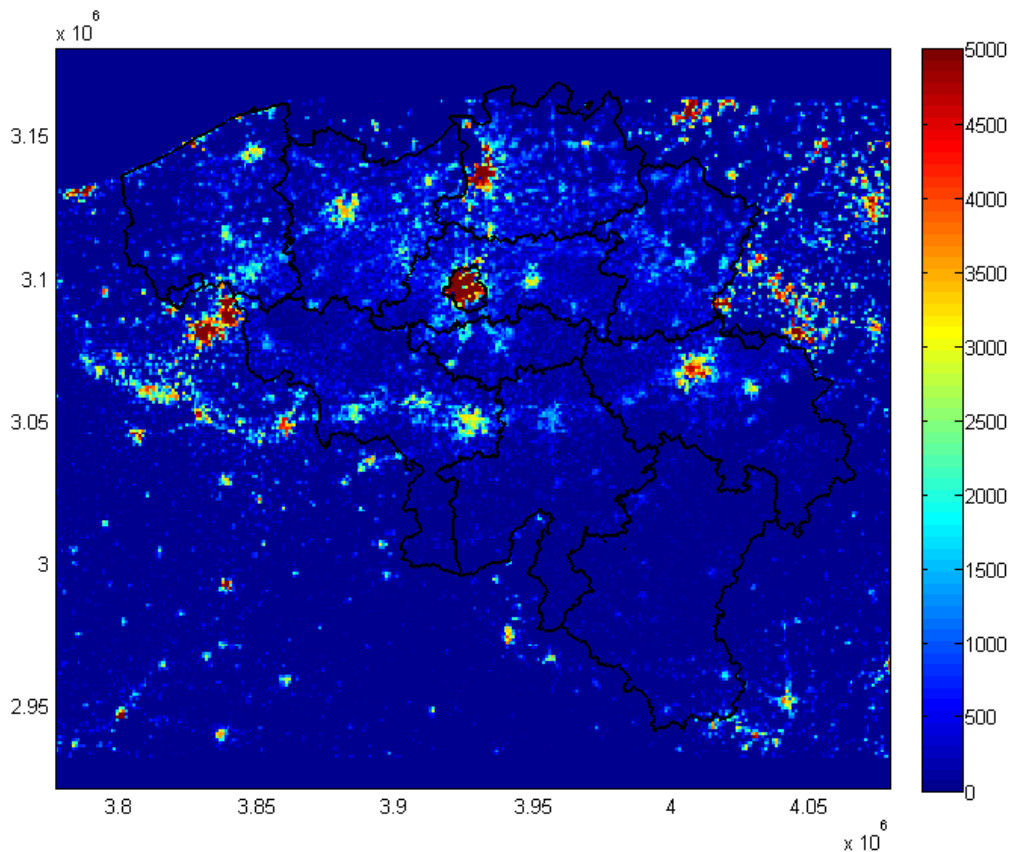
Een tweede analyse die we presenteren in dit rapport is het SUHI effect, of het oppervlaktetemperatuur verschil tussen stad en platteland, voor een aantal geselecteerde steden in Vlaanderen. We zijn nagegaan wat de relatie is tussen de bevolkingsdichtheid in de stad en het SUHI effect gedurende de zomermaanden (april - september). We berekenden voor elk jaar de gemiddelde oppervlaktetemperatuur (LST) over het zomer seizoen op basis van de MODIS data en bepaalden het verschil tussen het stedelijk en ruraal landgebruiksmasker voor de steden : Antwerpen, Gent, Hasselt, Aalst, Aarschot, Brugger, Diest, Geel, Genk, Ieper, Kortrijk, Leuven, Lier, Mechelen, Roeselare, Sint-Niklaas, Sint-Truiden, Tienen en Turnhout, en dit voor zowel de dagbeelden en de nachtbeelden, waarbij we telkens de Terra en Aqua data samennemen.

De bevolkingsdichtheid werd telkens bepaald op de totale stedelijk agglomeratie, zoals afgeïjnd door de administratieve grenzen van Figuur 49. Hiervoor maakten we gebruik van de EEA

²⁵ Zie: <http://nl.wikipedia.org/wiki/Zonnetijd>

bevolkingsdichtheid dataset²⁶, gedisaggregeerd met de CORINE landgebruiksdataset. Deze kaart werd geaggregeerd naar het MODIS 1x1 km² rooster en is hieronder afgebeeld. De kaart is gebaseerd op (Gallego 2010) gebruik makende van de 2000/2001 census.

Figuur 59: EEA bevolkingsdichtheidskaart voor België, verrasterd naar het MODIS 1x1 km² rooster



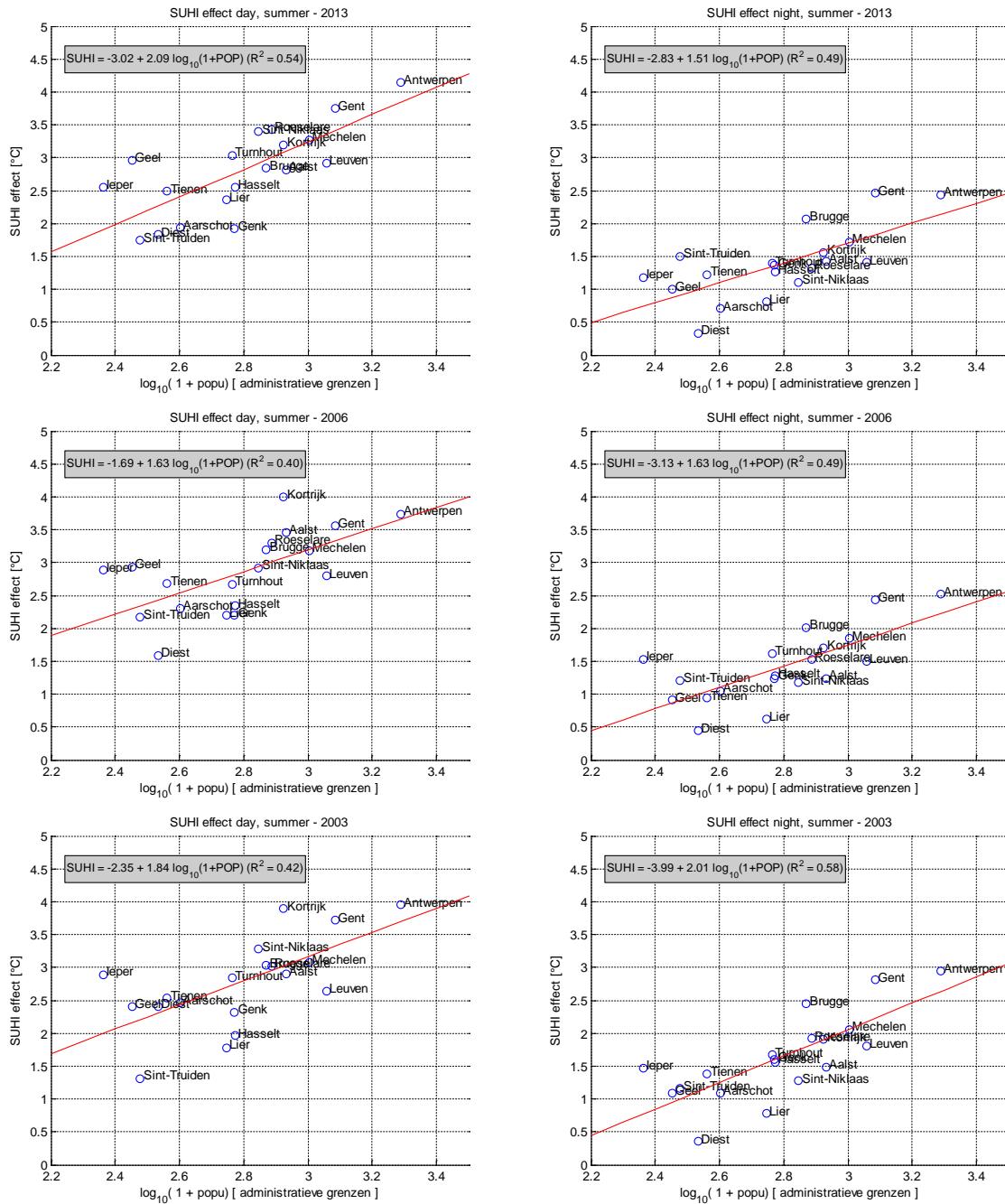
De waarden geven het aantal inwoners in de 1x1 km² roosterzellen

De methodiek voor het afleiden van deze kaart is in Gallego (2010) beschreven op basis van de 2000/2001 census in de lidstaten.

Bron: Gallego (2010)

²⁶ <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/population-density-disaggregated-with-corine-land-cover-2000-2>

Figuur 60: Relatie tussen het logaritme van de bevolkingsdichtheid (in # / km²) en de sterkte van het SUHI effect, bovenaan voor 2013, in het midden voor 2006 en onderaan voor 2003



De linker kolom geeft het SUHI effect overdag, rechts zien we de berekening voor de MODIS nachtbeelden (telkens Terra & Aqua).

Bron: VITO

Uit de analyses in bovenstaande Figuur 60 volgt dat er een duidelijk logaritmisches verband is tussen de bevolkingsdichtheid en de sterkte van het SUHI effect. We zien een duidelijk sterker effect overdag (tot ~4 °C gemiddeld over de zomer voor Antwerpen), t.o.v. 2,5 °C - 3 °C 's nachts. Onderstaande tabel geeft de gevonden relaties met de logaritme van de bevolkingsdichtheid weer. We merken dat we gemiddeld zo'n 50 - 55 % van de ruimtelijke variabiliteit van de SUHI sterkte verklaren met de bevolkingsdichtheid en dat dat percentage van verklaarde variantie relatief stabiel is over de jaren heen.

Tabel 10. Relatie tussen de sterkte van het SUHI, berekend op de gemiddelde MODIS LST gedurende de zomerperiode (april - september), en de \log_{10} van de bevolkingsdichtheid (P) van het stedelijk gebied

jaar	SUHI effect overdag (april - september)	R^2	SUHI effect 's nachts (april - september)	R^2
2002	$-2.24 + 1.79 \log_{10}(1+P)$	0.47	$-3.41 + 1.75 \log_{10}(1+P)$	0.58
2003	$-2.35 + 1.84 \log_{10}(1+P)$	0.42	$-3.99 + 2.01 \log_{10}(1+P)$	0.58
2004	$-2.19 + 1.78 \log_{10}(1+P)$	0.50	$-3.54 + 1.79 \log_{10}(1+P)$	0.57
2005	$-3.34 + 2.27 \log_{10}(1+P)$	0.65	$-2.84 + 1.56 \log_{10}(1+P)$	0.57
2006	$-1.69 + 1.63 \log_{10}(1+P)$	0.40	$-3.13 + 1.63 \log_{10}(1+P)$	0.49
2007	$-1.34 + 1.45 \log_{10}(1+P)$	0.42	$-2.59 + 1.41 \log_{10}(1+P)$	0.45
2008	$-2.97 + 2.12 \log_{10}(1+P)$	0.48	$-3.33 + 1.68 \log_{10}(1+P)$	0.58
2009	$-1.31 + 1.50 \log_{10}(1+P)$	0.31	$-3.01 + 1.62 \log_{10}(1+P)$	0.59
2010	$-1.95 + 1.67 \log_{10}(1+P)$	0.56	$-3.29 + 1.72 \log_{10}(1+P)$	0.52
2011	$-1.98 + 1.70 \log_{10}(1+P)$	0.53	$-2.55 + 1.44 \log_{10}(1+P)$	0.49
2012	$-3.60 + 2.37 \log_{10}(1+P)$	0.52	$-2.71 + 1.43 \log_{10}(1+P)$	0.52
2013	$-3.02 + 2.09 \log_{10}(1+P)$	0.54	$-2.83 + 1.51 \log_{10}(1+P)$	0.49
gemiddelde R^2:		0.48		0.54

In de kolom na de gevonden relatie is telkens ook de verklaarde variantie aangegeven (R^2).

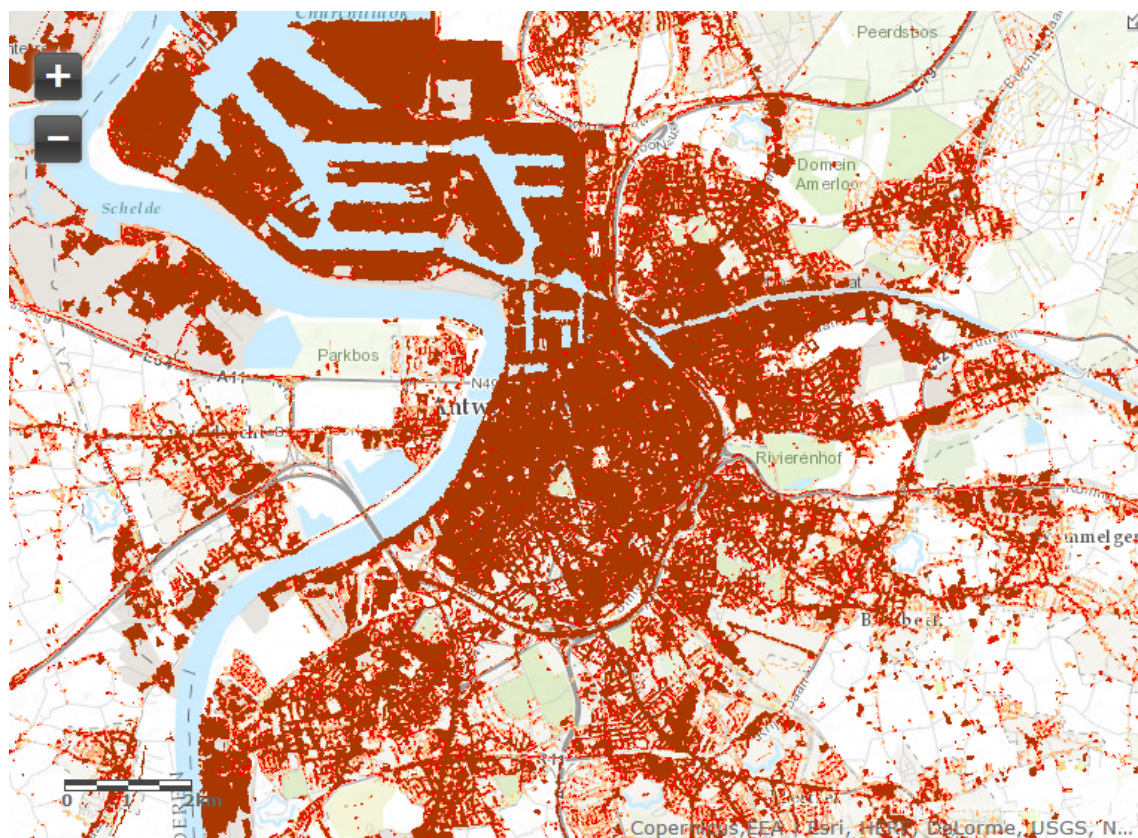
Op basis hiervan kunnen eenvoudige inschattingen gemaakt worden van de sterkte van het SUHI effect als functie van de bevolkingsdichtheid van een stad of gemeente. In onderstaande paragraaf gaan we een gelijkaardige relatie na, maar ditmaal als functie van de verhardingsgraad van een stad.

2.4.5 SUHI effect voor Vlaamse steden als functie van de verhardingsgraad

In bovenstaande paragraaf gingen we de relatie weer tussen de sterkte van het SUHI effect, berekend op zomer-gemiddelde LST kaarten (apart voor dag en nachtbeelden). We hebben deze analyse overgedaan, maar ditmaal voor de verhardingsgraad. Op de website van de EEA vinden we een dataset²⁷ met de verhardingsgraad op een resolutie van 20 m voor gans Europa. Onderstaande Figuur 61 geeft een detail voor Antwerpen ter illustratie van deze dataset. Op analoge manier werd deze dataset geaggregeerd naar het 1x1 km² rooster.

²⁷ <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/explore-interactive-maps/european-soil-sealing-v2>

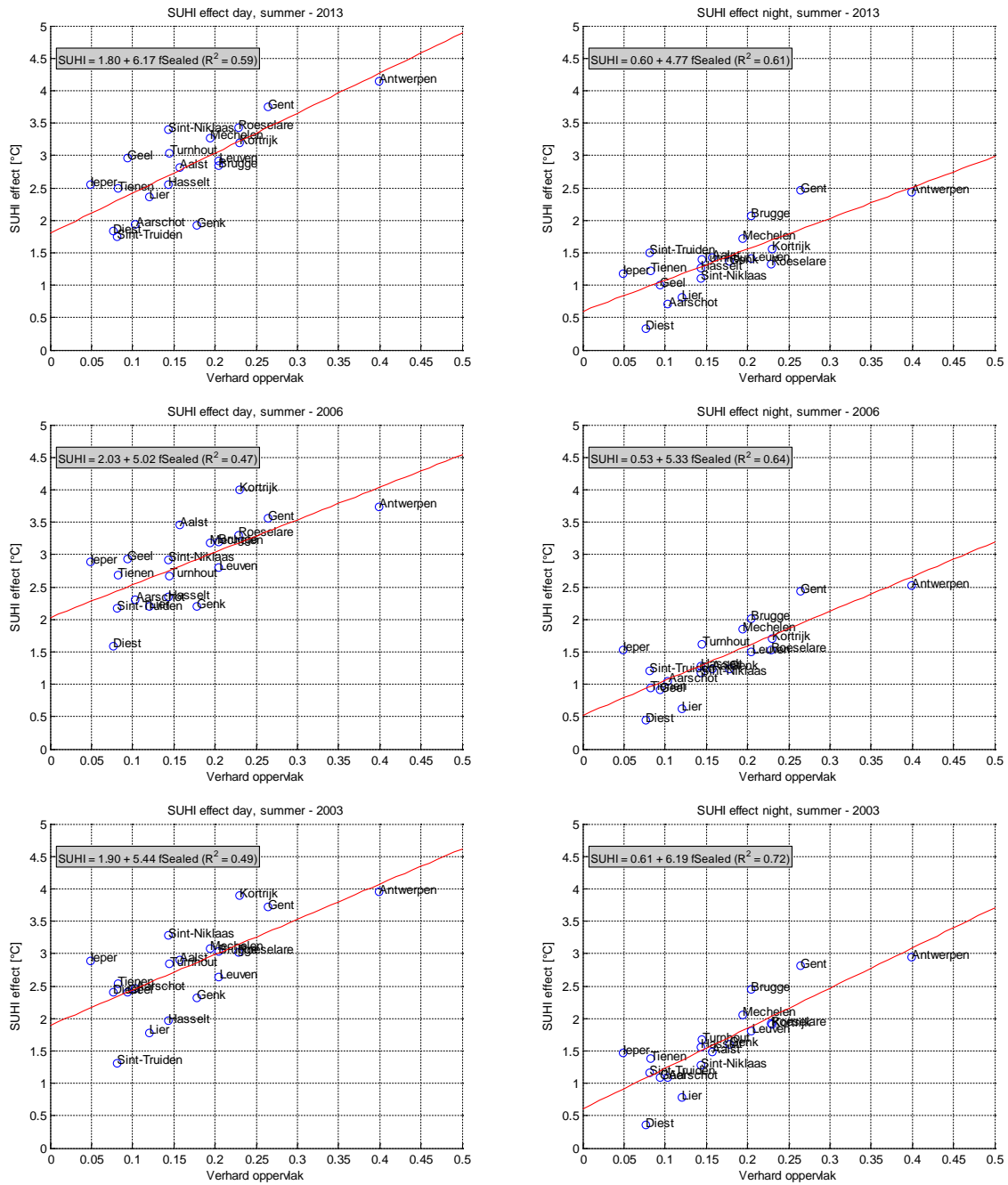
Figuur 61: Detail voor Antwerpen van de EEA dataset met de verhardingsgraad op 20 m voor gans Europa



De kleur geeft de graad van verharding weer, waarbij een rode pixel volledig verhard is. De dataset is gebaseerd op data voor het jaar 2006.

Bron: European Environment Agency

Figuur 62: Relatie tussen de verhardingsgraad van een stad en de sterkte van het SUHI effect, bovenaan voor 2013, in het midden voor 2006 en onderaan voor 2003



De linker kolom geeft het SUHI effect overdag, rechts zien we de berekening voor de MODIS nachtbeelden (telkens Terra & Aqua).

Bron: VITO

Tabel 11: Relatie tussen de verhardingsgraad en de sterkte van het SUHI effect

jaar	SUHI effect overdag (april - september)	R ²	SUHI effect 's nachts (april - september)	R ²
2002	1.79 + 5.86 fSeal	0.62	0.57 + 5.37 fSeal	0.67
2003	1.90 + 5.44 fSeal	0.49	0.61 + 6.19 fSeal	0.72
2004	1.91 + 5.27 fSeal	0.51	0.52 + 5.61 fSeal	0.71
2005	1.87 + 6.86 fSeal	0.74	0.79 + 4.58 fSeal	0.69
2006	2.03 + 5.02 fSeal	0.47	0.53 + 5.33 fSeal	0.64
2007	1.98 + 4.55 fSeal	0.49	0.56 + 4.72 fSeal	0.60
2008	1.86 + 6.64 fSeal	0.56	0.49 + 5.24 fSeal	0.71
2009	2.01 + 5.19 fSeal	0.46	0.66 + 5.07 fSeal	0.71
2010	1.88 + 4.89 fSeal	0.60	0.60 + 5.53 fSeal	0.68
2011	1.91 + 5.27 fSeal	0.61	0.62 + 4.81 fSeal	0.62
2012	1.83 + 7.30 fSeal	0.56	0.60 + 4.13 fSeal	0.60
2013	1.80 + 6.17 fSeal	0.59	0.60 + 4.77 fSeal	0.61
gemiddelde R²:		0.56		0.66

Zie ook Figuur 62

We zien dat de verhardingsgraad duidelijk een betere verklarende variabele is voor de sterkte van het SUHI effect in Vlaanderen. Overdag verklaren we gemiddeld ongeveer 56 % van de variabiliteit tussen de steden, 's nachts zelfs gemiddeld 66 %. Dit betekent dus dat de graad van verharding in belangrijke mate het verschil in de sterkte van het SUHI effect verklaart tussen de verschillende steden in Vlaanderen. We dienen hier wel de kanttekening bij dienen te maken dat een deel van deze verbetering in de correlatie voornamelijk zal te wijten zijn aan Antwerpen, wat een significant hogere verhardingsgraad heeft dan de andere Vlaamse steden.

2.4.6 Rangschikking van Vlaamse steden i.f.v. SUHI effect

Op basis van de zomergemiddelde LST kaarten kunnen we de beschouwde steden rangschikken volgens de sterkte van het SUHI effect. Op basis van de **zomer**-gemiddelde (april - september) LST kaarten en de hoger besproken landgebruiksmaskers hebben we per jaar een cijfer 1 toegekend aan de stad met het sterkste SUHI effect en een cijfer 19 (aantal beschouwde steden) aan de stad met het laagste SUHI. Daarna namen we de som van die rangordes overheen de jaren om op die manier een rangschikking van de steden over de jaren heen te bekomen. Deze resultaten zijn opgenomen hieronder in Tabel 12 en Tabel 13 voor de dagbeelden, resp. de nachtbeelden.

Tabel 12: Rangschikking van de steden i.f.v. de sterkte van het SUHI effect, afgeleid op basis van de zomergemiddelde oppervlaktetemperatuur kaarten overdag

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	som	rang
Antwerpen	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	14	1
Gent	2	3	1	2	3	4	3	3	2	2	2	2	29	2
Hasselt	15	17	10	14	14	18	13	17	11	12	17	12	170	14
Aalst	14	8	9	6	4	9	6	8	5	6	6	11	92	7
Aarschot	16	13	17	16	15	8	15	13	16	17	14	16	176	15
Brugge	7	6	3	9	6	12	8	10	8	13	9	10	101	8
Diest	19	14	19	19	19	19	18	19	19	19	19	18	221	19
Geel	11	15	14	10	8	13	14	7	14	10	13	8	137	13
Genk	13	16	18	12	17	15	17	15	13	16	18	17	187	16
Ieper	8	9	13	15	10	11	11	9	10	14	12	13	135	11
Kortrijk	3	2	5	5	1	2	2	2	4	5	3	6	40	3
Leuven	9	11	12	7	11	6	9	14	9	9	10	9	116	9
Lier	17	18	15	17	16	16	19	18	18	18	16	15	203	18
Mechelen	6	5	4	8	7	10	7	5	6	7	7	5	77	6
Roeselare	4	7	6	3	5	3	4	4	7	3	5	3	54	4
Sint-Niklaas	5	4	7	4	9	5	5	6	3	4	4	4	60	5
Sint-Truiden	18	19	16	18	18	17	12	16	17	15	15	19	200	17
Tienen	10	12	8	13	12	14	10	12	12	11	8	14	136	12
Turnhout	12	10	11	11	13	7	16	11	15	8	11	7	132	10

Het cijfer 1 geeft het sterkste SUHI effect, het cijfer 19 het zwakste. De som-kolom telt gewoon de rangorde voor de steden overheen de jaren op, de rang in de laatste kolom geeft de rangschikking op basis van deze sommatie.

Tabel 13: Rangschikking van de steden i.f.v. de sterkte van het SUHI effect, afgeleid op basis van de zomergemiddelde oppervlaktetemperatuur kaarten 's nachts

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	som	rang
Antwerpen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	15	1
Gent	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	21	2
Hasselt	10	10	11	12	10	12	9	11	11	9	13	12	130	10
Aalst	7	11	12	11	12	15	12	10	13	15	8	7	133	11
Aarschot	16	16	16	13	15	13	17	13	16	16	16	18	185	16
Brugge	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	36	3
Diest	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	228	19
Geel	17	17	15	17	17	17	13	17	17	17	17	16	197	17
Genk	12	9	8	9	11	8	10	9	10	10	11	10	117	9
Ieper	11	12	10	16	7	11	15	16	12	11	9	14	144	12
Kortrijk	6	6	6	5	5	10	6	5	6	5	5	5	70	5
Leuven	9	7	9	7	9	7	5	8	8	7	10	8	94	8
Lier	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	17	215	18
Mechelen	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	48	4
Roeselare	5	5	5	8	8	6	7	7	5	6	6	11	79	6
Sint-Niklaas	14	14	13	10	14	16	14	12	15	14	12	15	163	15
Sint-Truiden	13	15	17	15	13	14	16	15	9	12	15	6	160	13
Tienen	15	13	14	14	16	9	11	14	14	13	14	13	160	14
Turnhout	8	8	7	6	6	5	8	6	7	8	7	9	85	7

Het cijfer 1 geeft het sterkste SUHI effect, het cijfer 19 het zwakste. De som-kolom telt gewoon de rangorde voor de steden overheen de jaren op, de rang in de laatste kolom geeft de rangschikking op basis van deze sommatie.

Tabel 14: Expliciete rangschikking van de steden volgens de sterkte van het SUHI effect in de zomer (april - september) overheen de jaren 2002 - 2013

rang	overdag	's nachts
1	Antwerpen (14)	Antwerpen (15)
2	Gent (29)	Gent (21)
3	Kortrijk (40)	Brugge (36)
4	Roeselare (54)	Mechelen (48)
5	<u>Sint-Niklaas (60)</u>	Kortrijk (70)
6	Mechelen (77)	Roeselare (79)
7	Aalst (92)	Turnhout (85)
8	Brugge (101)	Leuven (94)
9	Leuven (116)	<u>Genk (117)</u>
10	Turnhout (132)	Hasselt (130)
11	leper (135)	Aalst (133)
12	Tienen (136)	leper (144)
13	Geel (137)	Sint-Truiden (160)
14	Hasselt (170)	Tienen (160)
15	Aarschot (176)	<u>Sint-Niklaas (163)</u>
16	<u>Genk (187)</u>	Aarschot (185)
17	Sint-Truiden (200)	Geel (197)
18	Lier (203)	Lier (215)
19	Diest (221)	Diest (228)

Het cijfer geeft de som van hoger staande tabel aan en de kleurcode onderscheidt 3 groepen steden. Steden met een relatief hoog SUHI (rood), de middenmoot (oranje) en steden met een relatief laag SUHI (groen). De onderlijnde steden springer er uit door het verschil in de rangschikking tussen de situatie overdag en 's nachts.

Op basis van de rangschikking overdag en 's nachts van *Tabel 14* kunnen we relatief gezien 3 groepen steden onderscheiden.

- steden met een **relatief-gezien hoog SUHI**: Antwerpen, Gent, Kortrijk, Mechelen, Roeselare, Brugge;
- steden met een **gemiddeld SUHI**: Sint-Niklaas, Aalst, Leuven, Turnhout, leper, Tienen, Geel, Hasselt en Genk;
- steden met een **relatief-gezien lager SUHI**: Aarschot, Sint-Truiden, Lier, Diest.

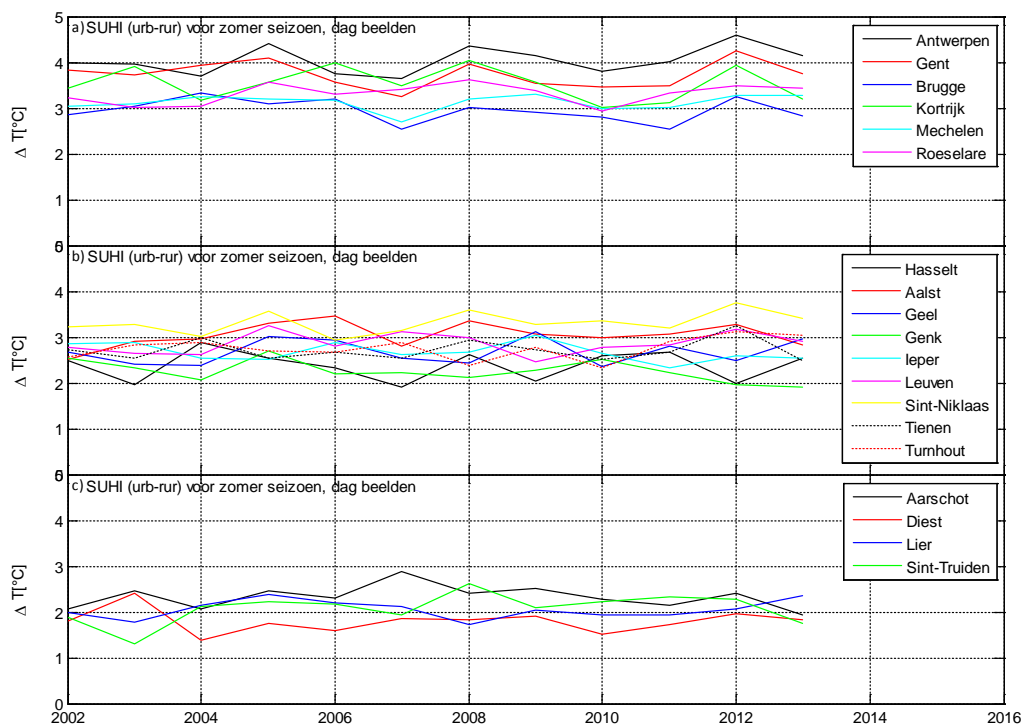
Uiteraard is deze opdeling in zekere mate arbitrair. Opvallend is dat Sint-Niklaas en Genk overdag/'s nachts beduidend verschillend zijn in de rangorde. Dit lijkt ook zo consistent te zijn over de jaren heen. Sint-Niklaas kent overdag een relatief hoog SUHI, terwijl er 's nachts een relatief laag SUHI optreedt, voor Genk is de situatie omgekeerd, hoewel misschien iets minder uitgesproken dan Sint-Niklaas. Het sterke SUHI effect van Sint-Niklaas kan overdag te wijten zijn aan de grote industriezone die zich rondom het afritten complex van de E17 en de N16 gewestweg bevindt, maar een goede verklaring hiervoor is er momenteel niet.

Op basis van deze rangschikking van steden kunnen we zien dat de selectie van aanbevolen steden in deel 1 van dit rapport over in-situ metingen (Antwerpen, Gent, Brugge, Hasselt en Lier, naast Brussel) zowel steden met een hoog (Antwerpen, Gent, Brugge), een gemiddeld (Hasselt) en een laag (Lier) SUHI vertonen. Daardoor kunnen we stellen dat we met de voorgestelde selectie van steden alvast een relatief goede spreiding hebben t.o.v. het effect dat we willen bestuderen. Ook hier kunnen we stellen dat dit een duidelijke meerwaarde is van het gebruik van remote sensing data. Satellietdata helpen ons na te gaan waar preferentieel in-situ metingen worden gedaan.

2.4.7 SUHI sterkte als functie van de tijd

In voorafgaande paragrafen stelden we enkele ruimtelijke analyses voor, waarin we voor verschillende steden de sterkte van het SUHI effect bekijken als functie van de karakteristieken van die stad. In dit stuk zullen we de sterkte van het oppervlakte hitte eiland bekijken als functie van de tijd om zodoende tot een jaarlijkse indicator te komen. We bekijken allereerst het SUHI effect berekend op de zomergemiddelde LST kaarten voor elk jaar, en dit doen we apart voor dag/nacht én voor de verschillende steden (gegroepeerd volgens de rangschikking van Tabel 14).

Figuur 63: SUHI effect berekend op de zomergemiddelde LST kaarten voor elk jaar, voor de dagbeelden

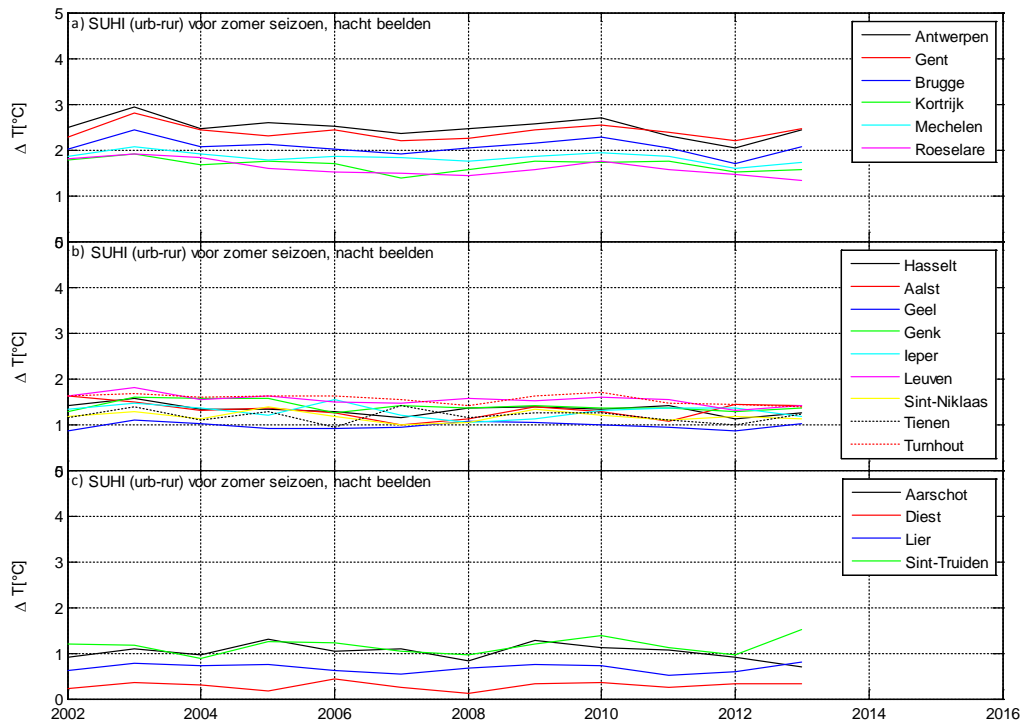


De steden met een relatief hoog SUHI staan bovenaan, in het midden de middenmoot en onderaan de steden met een relatief laag SUHI.

Bron: VITO

Op zich zien we in de SUHI waarden relatief weinig informatie naar extreme jaren toe. Zowel de zomer van 2003 als 2006 komen niet echt naar voren als zijnde extreem. Dit geeft dus aan dat het eenvoudige oppervlaktetemperatuur verschil tussen stad en platteland niet volstaat als indicator, een conclusie in de lijn van de analyse voor luchttemperatuur. Ook een analyse op maandbasis geeft niet onmiddellijk blijk van veel informatie naar extreme jaren toe. Dit is afgebeeld in Figuur 65.

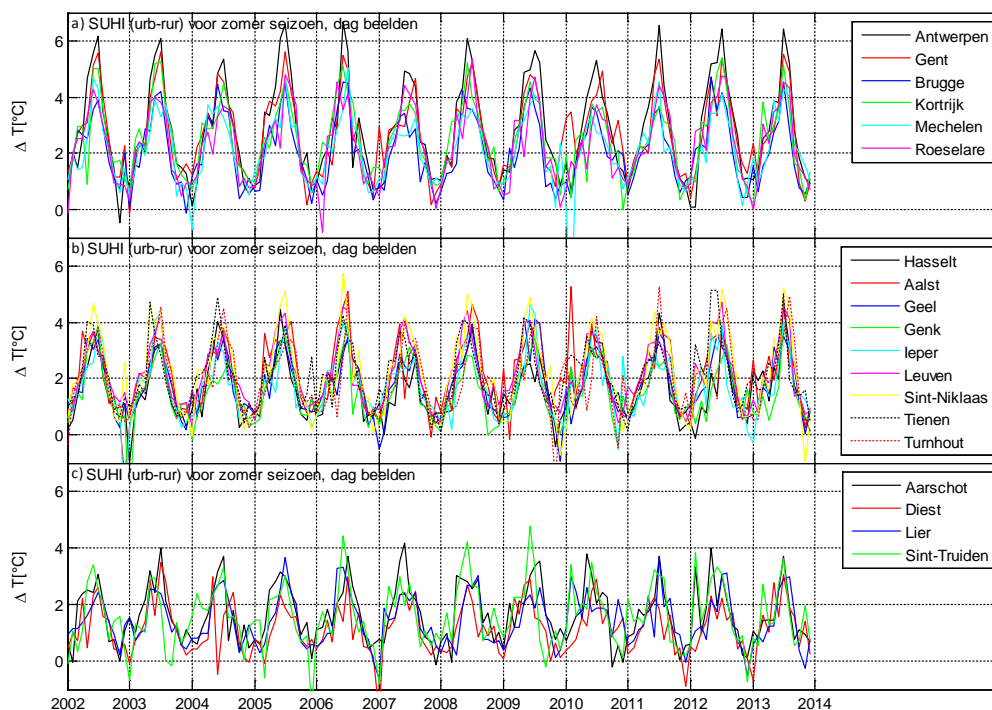
Figuur 64: SUHI effect berekend op de zomergemiddelde LST kaarten voor elk jaar, voor de nachtbeelden



De steden met een relatief hoog SUHI staan bovenaan, in het midden de middenmoot en onderaan de steden met een relatief laag SUHI.

Bron: VITO

Figuur 65: Gelijkaardige analyse als in Figuur 63, maar ditmaal op maandbasis



Hier zijn maandaggregaties van **dagbeelden** gebruikt.

Bron: VITO

We merken echter wel duidelijk een seizoens-effect op, waarbij het SUHI z'n maximum heeft tijdens de zomer maanden. Voor Gent en Antwerpen bedraagt dit gemiddelde gesproken zo'n 5-6 °C overdag tijdens de zomer, 's nachts een 3-tal graden, wat consistent is met het gemeten luchttemperatuur UHI (Lauwaet et al, 2013).

2.4.8 Oppervlakte of 'hotspot' indicatoren, 'HIA'

Een derde mogelijke indicator is het berekenen van een zogeheten '**hot island area**'. Deze indicator is potentieel heel interessant door het expliciete gebruik van het ruimtelijk karakter van remote sensing beelden en laat zich ook eenvoudig uitleggen. De HIA geeft de totale oppervlakte waarvoor de oppervlaktetemperatuur boven een bepaalde drempelwaarde ligt. In feite is deze indicator het ruimtelijk analogon van de temporele indicator voor luchttemperatuur, waarbij een soort totaal boven een bepaalde drempelwaarde genomen wordt als functie van de tijd²⁸. Er stellen zich evenwel een aantal vragen:

- Welke **drempelwaarde** moet genomen worden? De link tussen LST en gezondheidseffecten is immers veel minder direct dan bijvoorbeeld voor luchttemperatuur.
- Op basis waarvan moet de HIA berekend worden? **Individuele beelden, maandgemiddelde LST of jaar / seizoen gemiddelden?**
- Moet onderscheid gemaakt worden tussen **dag/nachtbeelden**? Aggregeren we die allemaal samen of is het beter te werken met een vast tijdstip (gebruik makend van het heliosynchrone karakter van de satellieten).
- Voor welke region of interest berekenen we de indicator? Vlaanderen of de aparte steden?

Voor wat betreft het tweede punt stellen we voor om met maandgemiddelden te werken, dan weten we uit voorafgaande analyses dat de bedekking voor Vlaanderen nagenoeg compleet is voor alle

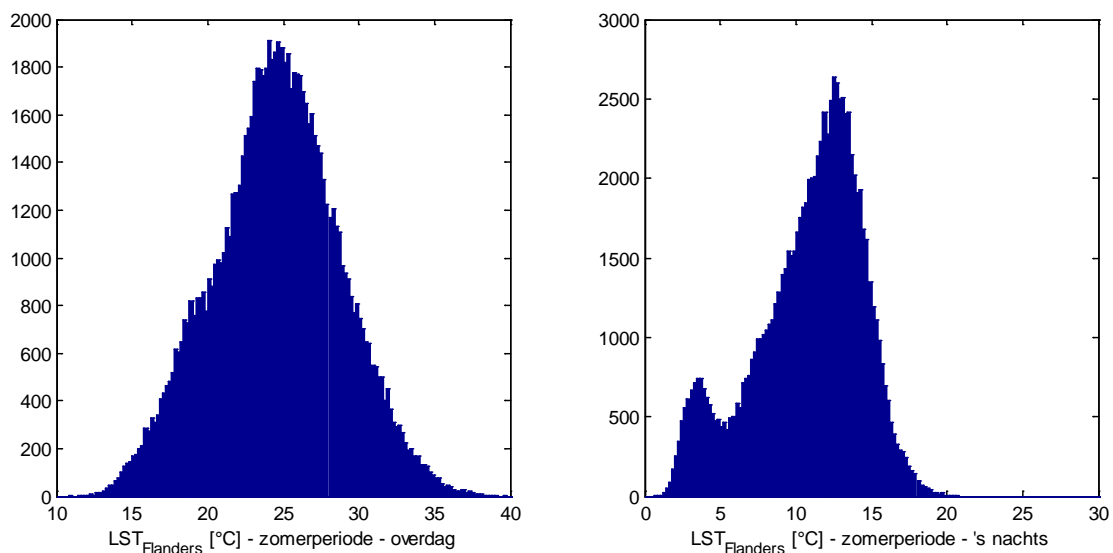
²⁸ Of gewerkt met het verschil tussen T_{max} en T_{min} en een bepaalde drempel.

maanden²⁹. Door op basis van individuele beelden te werken wordt de indicator zeer afhankelijk van de bewolgingsgraad. Met andere woorden het aantal pixels in een individueel beeld met een LST waarde boven een bepaalde drempel wordt sterk beïnvloed door de bewolking in dat individueel beeld, wat niet wenselijk is voor een stabiele indicator. We stellen voor om op basis van maand gemiddelde LST beelden voor een zomer periode te werken, april – september.

Door de verschillende dynamiek in LST lijkt het ons ook wenselijk om de dag en nachtbeelden apart te gaan behandelen. Een mooi voorbeeld hiervan is de Antwerpse haven met grote waterpartijen die koeler blijft overdag, maar warmer dan de omgeving 's nachts. Dus om die dynamiek te kunnen vatten lijkt het ons best om de dag/nachtbeelden apart te behandelen.

Voor wat betreft de drempelwaarden zullen we werken op basis van de maandgemiddelden voor een stedelijke oppervlaktetemperatuur voor gans Vlaanderen. We bepalen dus enkel percentiel waarden voor de zomer (april - september) **maandgemiddelde** LST beelden overheen de periode 2002 – 2013 en nemen die waarden als referentie drempelwaarden voor dag en nacht. We selecteren de stedelijke pixels op basis van het CORINE masker (zie § 2.4.2.) voor het volledige Vlaamse grondgebied om zo een representatieve waarde te hebben voor alle steden (zie Figuur 50). De histogrammen van deze data zijn afgebeeld hieronder in Figuur 66.

Figuur 66: Histogram van de oppervlakte stedelijke temperaturen in Vlaanderen voor de zomerperiodes van 2002 tot en met 2013



Bron: VITO

²⁹ Er wordt echter wel aangeraden in verder onderzoek na te gaan wat de bias is die door bewolgingsgraad wordt geïntroduceerd.

Tabel 15: Percentielwaarden van de stedelijke oppervlaktetemperatuur in Vlaanderen voor de periode 2002 - 2013

	P50	P70	P80	P90	P95	P98	P99
overdag	24.7	26.8	28.1	30.0	31.5	33.2	34.3
's nachts	11.5	13.0	13.8	14.9	15.7	16.7	17.4

De temperaturen werden telkens bepaald op basis van de MODIS Terra en Aqua 1 km datasets, resp. voor 's nachts en overdag. We tonen het 50^e, 70^e, 80^e, 90^e, 95^e, 98^e en 99^e percentielwaarden van de verdeling. De stedelijke pixels die hiervoor in rekening gebracht zijn werden bepaald op basis van het CORINE landgebruiksmasker voor het volledig Vlaams grondgebied.

We bepalen m.a.w. dus ook slechts 2 drempelwaarden (eentje voor overdag, eentje voor 's nachts) voor **alle** steden, op die manier kunnen we ook de steden onderling beter vergelijken. Voor de eenvoud zullen we ook **geen drempel waarden per maand apart** bepalen gezien dit de zaak compliceert en misschien te veel gewicht geeft aan bv. abnormale temperaturen voor april die niet noodzakelijk een hittegolf vertegenwoordigen. Dit ligt in de lijn van de overwegingen die we ook voor luchttemperaturen gemaakt hebben.

Aan de hand van deze drempelwaarden kunnen we een **HIA** of **Hot Island Area** indicator definiëren als zijnde:

De **fractie** van de **totale oppervlakte** van het beschouwde gebied (gans Vlaanderen of de stedelijke agglomeratie) waarvoor de **maandgemiddelde oppervlaktetemperatuur** hoger is dan de drempelwaarde.

Dit kan zowel voor de dagbeelden, voor de nacht-beelden of voor beide samen, i.e. de fractie oppervlakte waarvoor de maandgemiddelde oppervlaktetemperatuur overdag hoger is dan de dag-drempelwaarde én waarvoor de maandgemiddelde oppervlaktetemperatuur 's nachts hoger is dan de nacht-drempelwaarde. Merk ook op dat we hier deze indicator bepalen op maandgemiddelde beelden over de periode april tot september, dus voor de normalisatie met oppervlakte (aangezien we deze indicator als relatief beschouwen) dienen we dus 6 keer de oppervlakte van het beschouwde gebied te nemen (we nemen immers 6 maanden in rekening).

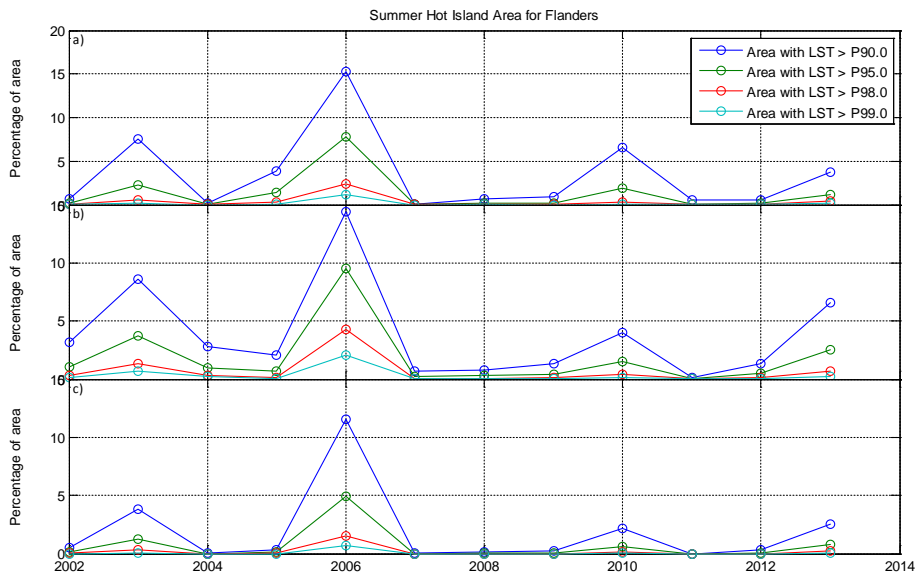
Als alternatief kunnen we deze indicator ook uitdrukken aan de hand van de bevolking in plaats van de oppervlakte, om zo eerder naar blootstelling van de bevolking aan verhoogde temperaturen te werken. We zullen deze indicator de **Hot Island Population** heten, afgekort **HIP**. We definiëren die volledig analoog met de HIA als volgt:

De **fractie** van de **totale bevolking** in het beschouwde gebied (gans Vlaanderen of de stedelijke agglomeratie) waarvoor de **maandgemiddelde oppervlaktetemperatuur** hoger is dan de drempelwaarde.

Om deze indicator te berekenen is er dus uiteraard ook een bevolkingskaart nodig. Hiervoor gebruikten we opnieuw de EEA kaart, reeds vermeld in *Figuur 59*. Hoewel deze indicator dus meer informatie bevat, is er een extra bron van informatie nodig t.o.v. puur de oppervlaktetemperatuurbeelden. De bevolkingskaart is verder ook een gegeven dat over de jaren heen kan veranderen. Hiermee moet dus rekening gehouden worden wanneer we de indicator beschouwen op langere termijn.

Afhankelijk van de keuze van de percentiel waarden die we maken, krijgen we dus een meer of minder gevoelige indicator. Onderstaande figuren illustreren dit voor de HIA en de HIP op schaal van gans Vlaanderen.

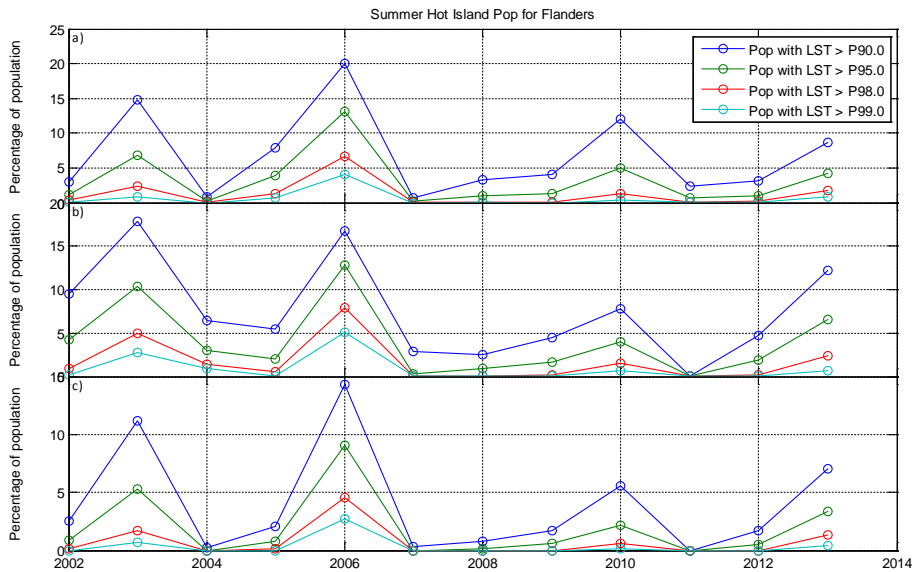
Figuur 67: Berekende zomer - HIA voor gans Vlaanderen voor de periode 2002 - 2013



Bovenaan (a) enkel gebaseerd op dagbeelden (en de dag drempelwaarden van Tabel 15), in het midden enkel voor de nachtbeelden, en onderaan (c) waarbij we enkel de oppervlakte nemen waarvoor de LST zowel overdag als 's nachts boven de drempelwaarde zit.

Bron: VITO

Figuur 68: Berekende zomer - HIP voor gans Vlaanderen voor de periode 2002 - 2013



Bovenaan (a) enkel gebaseerd op dagbeelden (en de dag drempelwaarden van Tabel 15), in het midden enkel voor de nachtbeelden, en onderaan (c) waarbij we enkel de oppervlakte nemen waarvoor de LST zowel overdag als 's nachts boven de drempelwaarde zit.

Bron: VITO

We merken op zich dat de 'extreme' jaren 2003 en 2006 er relatief goed uitkomen, in zowel de HIA als de HIP indicatoren. We merken wel dat dit vooral voor de P90 en P95 het geval is, en iets minder voor de P98 en P99. Het is echter wel zo dat een waarde van 10 - 15 % HIP voor de hete zomers 2003 en 2006 misschien wat laag 'lijkt' voor een dergelijke zomer. Er kon eventueel overwogen worden om de drempelwaarden in functie hiervan aan te passen. Hoewel de drempel waarden voor luchttemperatuur hier in feite niets mee te maken hebben en de onderliggende waarschijnlijkheidsverdelingen anders zijn, is gevraagd om de geselecteerde percentielwaarden consistent te houden over de verschillende indicatoren. We zullen dus verder werken met de P95. Om de analogie met de indicator voor

luchttemperatuur nog verder door te trekken zullen we ook opteren voor het gebruik van de indicator berekend op zowel de dagbeelden en de nacht-beelden, waardoor we **finaal onze geconstrueerde HIA (HIP) indicator** kunnen definiëren als:

Hot Island Area (HIA)

De **fractie** van de **totale oppervlakte** van het beschouwde gebied (gans Vlaanderen of de stedelijke agglomeratie) waarvoor de **maandgemiddelde oppervlaktetemperatuur**, berekend a.d.h.v. het MODIS 1 km LST product MOD11A1/MYD11A1, voor de periode april tot en met september **overdag hoger is dan 31,5 °C** en 's nachts hoger dan 15,7 °C.

Het is belangrijk hier expliciet bij te vermelden dat het gaat om de oppervlaktetemperaturen berekend met de MODIS data gezien zowel het retrieval algoritme als het tijdstip van passage van de satelliet uiteraard belangrijk zijn om een eventuele bias in de indicator te vermijden. We spreken van *totale* oppervlakte omdat we hier uiteraard per maandgemiddelde de oppervlakte boven drempel bijtellen.

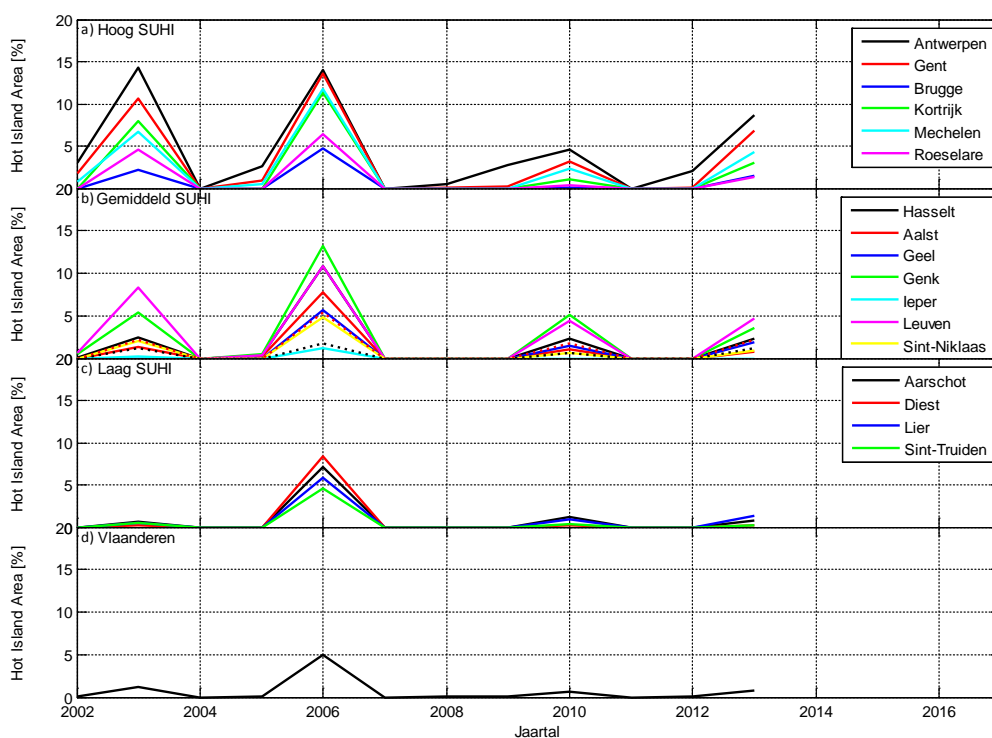
Analoog voor de HIP:

Hot Island Population (HIP)

De **fractie** van de **totale bevolking** in het beschouwde gebied (gans Vlaanderen of de stedelijke agglomeratie) waarvoor de **maandgemiddelde oppervlaktetemperatuur**, berekend a.d.h.v. het MODIS 1 km LST product van zowel Aqua als Terra MOD11A1/MYD11A1, voor de periode april tot en met september **overdag hoger is dan 31,5 °C** en 's nachts hoger dan 15,7 °C.

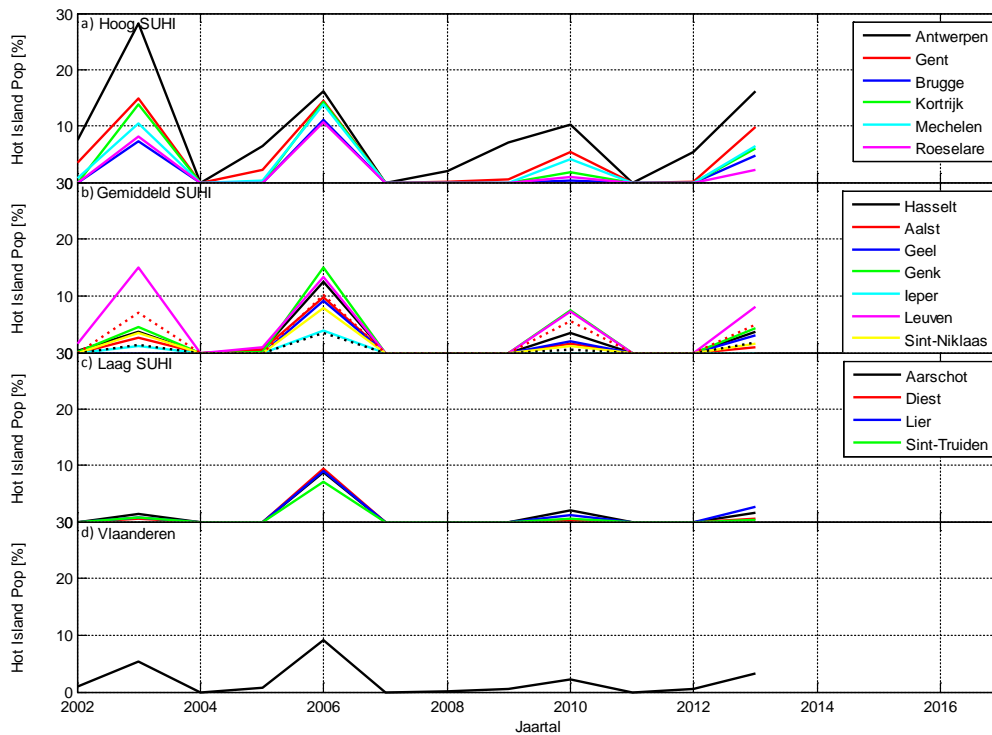
We geven hieronder tenslotte nog enkele plots van deze indicatoren berekend voor een aantal stedelijke agglomeraties apart. We gebruiken terug dezelfde opdeling in steden met een hoog SUHI, een middelmatig SUHI en een laag SUHI.

Figuur 69: Analyse van de finaal geconstrueerde HIA indicator voor de jaren 2002 - 2013 voor een aantal Vlaamse steden opgedeeld volgens de 3 SUHI klassen van steden uit Tabel 14 (hoog, gemiddeld en laag SUHI) en onderaan de indicator voor gans Vlaanderen



Bron: VITO

Figuur 70: Analyse van de finaal geconstrueerde HIP indicator voor de jaren 2002 - 2013 voor een aantal Vlaamse steden opgedeeld volgens de 3 SUHI klassen van steden uit Tabel 14 (hoog, gemiddeld en laag SUHI) en onderaan de indicator voor gans Vlaanderen



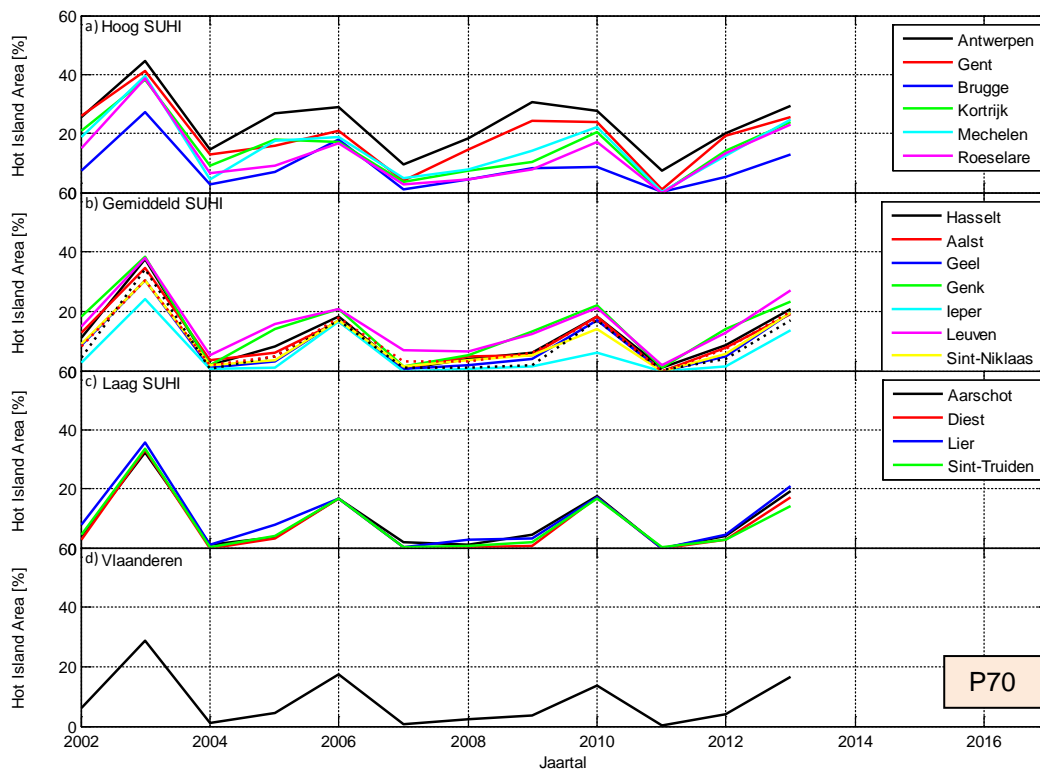
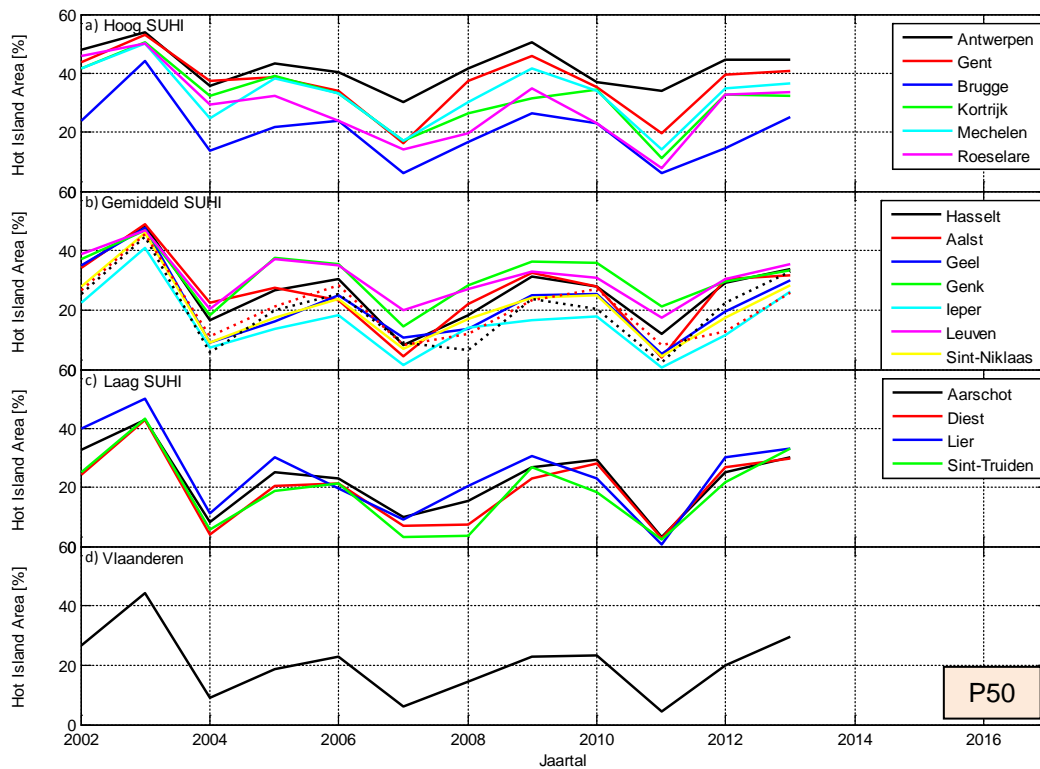
Bron: VITO

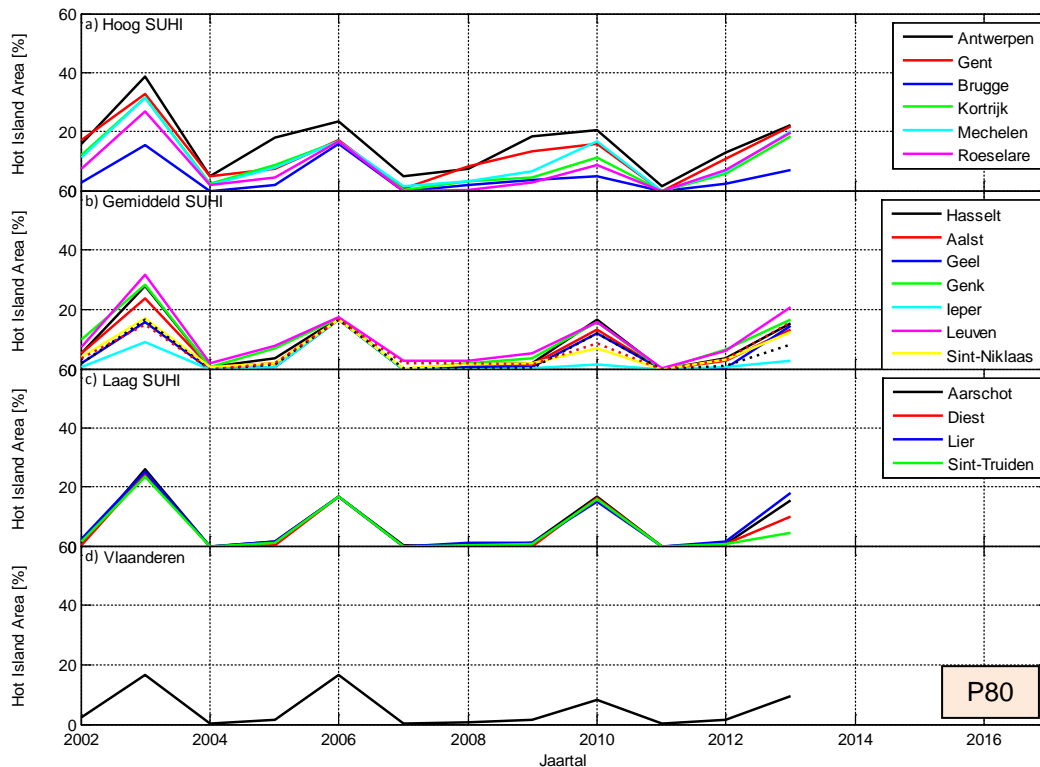
In beide figuren merken we duidelijk de uitschieters in de zomers van 2003 en 2006. Beide zomers werden gekenmerkt door een intense hittegolf gedurende 14 dagen in 2003 en 2 hittegolven in 2006 gedurende 5 en 21 dagen respectievelijk. Ook in 2010 volgden 2 hittegolven resp. eind juni en de eerste helft van juli elkaar op en in 2013 was vooral de maand juli uitzonderlijk warm. Deze jaren worden duidelijk gereflecteerd in de indicatoren hierboven. De grootte van de verschillen tussen de verschillende jaren is iets moeilijker te interpreteren gezien de voorgeschiedenis van belang kan zijn. Zaken zoals de droogte van de bodem (die aanleiding geeft tot hogere oppervlaktetemperaturen) spelen hierbij een rol. Dit zou verder in detail moeten bestudeerd worden.

Op zich lijken de percentages voor de HIA en of HIP indicatoren nog mee te vallen, we zien bv. een 15 % HIA of HIP voor de grote steden tijdens de warme zomer van 2006. Op zich is dit een onrechtstreeks gevolg van de keuze van de drempelwaarden en dus de percentiel waarden die gehanteerd worden om de drempelwaarden te bepalen. Voor een aantal kleinere steden is de indicator ook veelal 0, en voor grotere steden komen slechts voor bepaalde jaren waarden significant van 0 tevoorschijn. Om iets meer dynamiek in de figuren en de indicator te steken kunnen we uiteraard opteren voor een lagere percentielwaarde, waarmee we dan wel afwijken van de vooropgestelde conformiteit in percentielwaarden tussen de indicator voor luchttemperatuur en die voor oppervlaktetemperatuur.

Een analyse met aangepaste percentielwaarden, we bekeken P50, P70 en P80 resp., is hieronder gepresenteerd:

Figuur 71: Analyse van de hot island indicator (HIA) voor de steden, waarbij werd afgeweken van de vooropgestelde P95 percentielwaarde en P50, P70 en P80 getest werden om de drempelwaarden te bepalen voor de dag- en nachtmaandgemiddelden. Bovenaan een analoge figuur als Figuur 69, maar dan voor P50, in het midden voor P70 en onderaan voor P80





We merken dat er in de grafiek voor de P70 en P80 drempelwaarden iets meer dynamiek zit, maar dat toch de extreme zomers er nog altijd relatief goed uitkomen. Misschien is ergens de P75 als gulden middenweg (niet getoond) een te overwegen optie voor de drempelwaarden; dit dient echter besproken te worden gezien hier ook een niet onbelangrijke insteek is welke boodschap men wil geven. Is 80 % van Antwerpen een 'hot island' bij heet weer, of is dat slechts '20 %'?

Het periodiek herhalen van deze oefening en het afleiden van de HIP en vooral de HIA indicatoren in de toekomst kan inzicht geven in hoezeer de steden zich ontwikkelen. Uit de analyses hierboven is gebleken dat de fractie verhard oppervlak sterk bepalend is voor de intensiteit van het SUHI effect. Wanneer steden zich in de toekomst gaan uitbreiden dan kunnen we systematische verschillen opmerken in het totaal gebied waarvoor de oppervlaktetemperatuur boven de drempelwaarden van *Tabel 15* uit komt. Merk hierbij op dat we geen landgebruiksinformatie nodig hebben voor het afleiden van de HIA wanneer we dezelfde drempelwaarden hanteren. Voor de omrekening naar blootstelling (HIA) dient dan wel rekening gehouden te worden met een eventueel veranderende spreiding van de bevolking. Analyse van deze indicatoren in de toekomst kan inzicht geven in de manier waarop steden zich uitbreiden: met veel nieuwe groenzones (wat dus een minder sterke verhoging geeft van de HIA), of met veel verhard gebied (en een sterkere toename van de oppervlaktetemperatuur tot gevolg). Het is echter de vraag of we dit signaal zullen kunnen onderscheiden van het signaal van klimaatverandering en de onzekerheid geïntroduceerd doordat we ongetwijfeld een uitvoerige bias correctie zullen moeten doen bij het gebruik van TIR data van nieuwe toekomstige satellieten. Ons lijkt het misschien zinvoller de studie rond de intensiteit van het SUHI effect voor verschillende steden in Vlaanderen periodiek te herhalen (zie bespreking hieronder), eerder dan het periodiek bijwerken van de HIA en HIP indicatoren.

2.5 Slotbespreking indicatoren gebaseerd op satelliet data

Tot slot dienen we nog enkele zaken heel duidelijk in de verf te zetten bij het gebruik van deze indicatoren gebaseerd op remote sensing data.

- Binnen deze studie is het niet mogelijk om hierop in veel detail te gaan maar het is aan te raden een veel uitgebreidere bias analyse door te voeren om mogelijke effecten van andere

bedekkingsgraad tussen verschillende pixels weg te werken, bij het uitmiddelen van de individuele beelden naar maandgemiddelden kunnen bepaalde zones een bias krijgen doordat er slechts een handvol opnames beschikbaar zijn. Over het algemeen kunnen we stellen dat er meer onderzoek nodig is om stabiele hitte-indicatoren af te leiden van remote sensing.

- De continuïteit van de remote sensing data vormt een probleem. Momenteel is de MODIS data de meest gebruikte en meest kwalitatieve bron van LST data op 1 km, met 4 opname momenten per dag en een lange historische tijdsreeks. De instrumenten dateren echter al van het begin van vorig decennium en naderen dus het einde van hun levensduur. Voor het AVHRR instrument is er een opvolging, maar voor de historische tijdsreeksen zijn er gekende problemen van baan-drift die roet in het eten gooien bij deze analyse.
 - Ook dienen bij gebruik van meerdere instrumenten in deze analyse de gehanteerde drempelwaarden herbekeken te worden gezien die momenteel geënt zijn op het MODIS MOD11A1/MY11A1 product met z'n specifiek LST algoritme enerzijds, en z'n specifieke overvlieg tijden anderzijds. Bij andere instrumenten/satellieten zullen die anders zijn en zullen we dus een ander moment van de dag (en een andere oppervlaktetemperatuur) samplen.
 - En er is tenslotte duidelijk een bias in de temperatuur t.o.v. bewolgingsgraad, wat de interpretatie van de resultaten en de indicatoren moeilijk maakt. Hiervoor corrigeren zou ons in deze studie veel te ver leiden.
- Bij SUHI indicatoren is het sowieso ook lastig om bv. te vergelijken met historische meetreeksen van de luchttemperatuur gezien die er in stedelijk gebied niet zijn, m.a.w. hoe vergelijkt het SUHI met het gemeten CLUHI? Analyse zou wel kunnen gebeuren voor 2013. Alternatief zou een dergelijke analyse ook kunnen gebeuren op basis van modelberekeningen van luchttemperatuur.
 - De link van LST met gezondheid & bevolking is niet zo duidelijk, wat de interpretatie van een indicator als de Hot Island Area of Hot Island Population niet ten goede komt. Op zich is het zo dat veel van de 'hotspots' in de oppervlaktetemperatuur beelden te wijten zijn aan grote industriële complexen met vb. golfplaten daken, die overdag heel sterk opwarmen, maar 's nachts bv. evenzeer snel afkoelen.

Vanuit deze insteken is het dus aan te raden enige voorzichtigheid te hanteren bij publicatie van satelliet gebaseerde hitte-indicatoren. Hieronder geven we voorts nog een lijst van enkele mogelijke verbeteringen waar kan over na gedacht worden:

- Het in rekening brengen van meerdere instrumenten voor het afleiden van de oppervlaktetemperatuur. Zo zijn er momenteel nog een aantal satellietsensoren in omloop met thermisch infrarode sensoren waarmee de oppervlaktetemperatuur bepaald kan worden. Het meenemen van meerdere sensoren bij het opstellen van een indicator zou ervoor zorgen dat de dataset robuuster wordt t.o.v. wijzigingen in of het wegvallen van individuele sensoren. Het is echter wel zo dat het consistent verwerken van data van meerdere instrumenten een tijdrovende en dure aangelegenheid is, gezien niet voor elk instrument kant en klare oppervlaktetemperatuurproducten beschikbaar zijn.
- Het verhogen van de ruimtelijke resolutie van de oppervlaktetemperatuurdata waarmee de indicatoren worden afgeleid. Het is zo dat de oppervlaktetemperatuurdata op 1 km ruimtelijke resolutie voor kleinere steden/gemeenten misschien relatief grof is. Het verhogen van de ruimtelijke resolutie door middel van bv. NDVI-data afgeleid van de MODIS-sensor zou ons in staat stellen de indicator te baseren op een rooster met een resolutie van een 300-tal m i.p.v. 1 km.
- Het bestuderen van de bias geïntroduceerd door de intrinsieke beperking dat satellietdata enkel beschikbaar zijn bij wolkenvrije condities.
- Het bestuderen van de relatie tussen oppervlaktetemperatuur en gezondheidseffecten, energieconsumptie etc., om het ruimtelijk expliciete aspect van satellietdata aan meer relevantere impacts te kunnen koppelen dan enkel het in kaart brengen of het afleiden van de grootte van het oppervlakte hitte eiland, zoals momenteel met de indicatoren gebeurt.
- Het bijwerken van de kaart met bevolkingsaantallen voor de HIP-indicator. De gebruikte kaart met de bevolkingsaantallen baseert zich op de 2001 volkstellingen, waarvan de gegevens bij Eurostat beschikbaar zijn en waarmee men aan de hand van de CORINE landgebruiksdataset bevolkingsaantallen in een 100 m x 100 m rooster inschatte voor gans Europa. Die disaggregatie

kan op schaal van Vlaanderen veel nauwkeuriger worden uitgevoerd en eventueel frequenter worden bijgewerkt (vb. resultaten van het MULTIMODE project). Het dient wel gesteld dat voor de HIA-indicator de stedelijke landgebruiksmaskers enkel gebruikt worden voor het afleiden van de drempelwaarden, en het veranderende landgebruik in die zin dus insignificant is voor het berekenen van de indicator. De waarde van de HIA-indicator zelf reflecteert al het veranderende landgebruik.

Zoals we reeds aangaven in vorige paragraaf lijkt het ons zeker zinvol om periodiek de intensiteit van het SUHI-effect voor de Vlaamse steden te bekijken en op te lijsten voor welke steden we het grootste temperatuurverschil tussen de stad en het platteland vinden. Uit de analyse in § 2.4.4 en volgende merken we wel dat de intensiteiten over een periode van 10 jaar relatief constant blijven (*Figuur 63*), met wat willekeurige variatie. Dus om systematische veranderingen op te merken dienen we lange tijdsperiodes te bekijken waarbij we opnieuw zullen moeten rekening houden met bias correcties t.g.v. het gebruik van andere sensoren/overvliegtijdstippen. Uit de regressie-analyses kunnen voorts ook inschattingen gemaakt worden van de SUHI-sterkte voor kleinere steden/gemeenten, die niet in de analyse hier zijn opgenomen.

Het opstellen van de HIA-indicatoren kan zeker een meerwaarde zijn voor het identificeren van hotspots in relatie tot de bevolking (blootstelling). De opmerkingen aangaande gevoeligheid voor dergelijke effecten t.o.v. klimaatverandering & de variabiliteit in de data in het algemeen bespreken we aan het einde van vorige paragraaf.

Sowieso is het kaartmateriaal uit dit onderdeel van grote waarde voor het inzichtelijk maken van de oppervlaktetemperaturen en het aantonen via onafhankelijke, ruimtelijke expliciete data dat steden een verhoogde temperatuur kennen dan het platteland. Deze kaarten kunnen dienen als grafisch materiaal als input voor webpagina's etc. Vooral de SUHI-kaarten 's nachts komen qua grootteorde relatief goed overeen met de grootteorde van de gemiddelde sterkte van het CLUHI-effect en kunnen dus ter ondersteuning hiervan gebruikt worden.

Deel 3 Indicator gebaseerd op stedelijke klimaatmodellering (SKM)

3.1 Inleiding

In deel 1 werden de metingen van het stedelijk warmte-eiland en hittestress in Vlaanderen voorgesteld. Deze metingen zijn beperkt zowel in ruimte als in tijd. Zo zijn slechts enkele puntmetingen in en rond steden in Antwerpen en Gent beschikbaar, en dit slechts vanaf 2012. In dit deel zullen we nu via regionale stedelijke klimaatmodellering (SKM) stedelijke hitte-eilanden en hittestress in kaart brengen voor heel Vlaanderen. Voorts zullen we onderzoeken hoe de hittestress in Vlaamse steden zal toenemen in de toekomst vanwege enerzijds stedelijke uitbreiding en anderzijds klimaatverandering. Hierbij zullen we kijken naar een langere periode dan tot nu toe kon gemeten worden met de stedelijke klimaatobservaties, met name voor een periode van 10 jaar. Zo'n lange periode is van belang omdat (stedelijke) hittestress tijdens de zomer sterk varieert van jaar tot jaar, wat inherent is aan de veranderlijkheid van atmosferische omstandigheden. Daarom moet de frequentie en intensiteit van weersfenomenen, waaronder dus ook hittegolven en de daaruit volgende hittestress, bekeken worden over langere 'klimatologische' tijdschalen van 10 jaar of meer. Hiervoor zal bijvoorbeeld de gemiddelde uitkomst van de stedelijke hittestressindicator (zoals gedefinieerd in sectie 1.3) gaan convergeren. Zo'n klimatologische periode is dan ook de tijdschaal waarop moet gekeken worden bij onze onderzoeksvraag in welke mate de hittestress in de toekomst zal toenemen.

In sectie 3.2 wordt de methodologie van stedelijke klimaatmodellering (SKM) uiteengezet. In sectie 3.3 gaan we SKM evalueren op basis van de metingen uit deel 1. Hierbij zullen we focussen op de modelperformantie in termen van het reproduceren van zowel de absolute temperatuur als het stedelijk hitte-eiland in sectie 3.3.1. Er wordt ook nagegaan of de stedelijke hittestress indicator hierop kan toegepast worden in paragraaf 3.3.2. In paragraaf 3.3.3 zal de SKM dataset vergeleken worden met de beschikbare gegridde observatiedataset E-OBS beschikbaar op Europese schaal (Haylock et al., 2008). Vervolgens zal in paragraaf 3.3.4 worden gezocht naar een ideale combinatie tussen enerzijds SKM en anderzijds E-OBS om de hittestressindicator uit in-situ metingen correct te kunnen reproduceren. In sectie 3.4 zullen we de stedelijke hittestress indicator gaan toepassen op gecorrigeerde SKM over Vlaanderen voor het heden en de toekomst. Hierbij behandelen we eerst de retrospectieve dataset verkregen uit SKM voor de periode van 2000 tot 2010 in paragraaf 3.4.1. Vervolgens onderzoeken we in sectie 3.4.2. in welke mate de toekomstige stedelijke uitbreiding de hittestress voor steden als Antwerpen de hittestress beïnvloedt. Voorts bekijken we in paragraaf 3.4.3 hoe de globale klimaatverandering de hittestress in Vlaanderen zal beïnvloeden in de toekomst. Dit effect zullen we ook vergelijken met het effect van stedelijke uitbreiding. Tot slot maken we een aantal concluderende opmerkingen in sectie 3.5.3.

3.2 Methodologie voor stedelijke klimaatmodellering

3.2.1 Het stedelijk klimaatmodel (SKM)

In deze studie zal worden gebruik gemaakt van een Europees regionaal klimaatmodel COSMO-CLM (Rockel et al., 2008). Het is in staat om op zeer fijne schaal de temperatuur, druk, vochtigheid, wolken en neerslag te gaan simuleren. Hierbij heeft de oppervlaktemodule TERRA-ML (Grasselt et al., 2008) een aantal aanpassingen ondergaan om de aanwezigheid van steden in rekening te brengen, wat resulteerde in de stedelijke oppervlaktemodule TERRA-URB (Wouters et al 2015a, 2015b). Deze module houdt rekening met het stedelijk weefsel, wat gekarakteriseerd wordt door een vermindering in vegetatie t.o.v. van de directe natuurlijke omgeving en door de aanwezigheid gebouwen en straten (hierna genoemd 'versteningsgraad'). Hierbij wordt voor iedere gridcel de oppervlakte-energiebalans van enerzijds versteende oppervlakken - bestaande uit straten en gebouwen - en anderzijds deze van de natuurlijke oppervlakken met plantenbegroeiing apart berekend. De versteende oppervlakken krijgen een aantal specifieke toepasselijke eigenschappen toegewezen m.b.t. de zonnestraling en infraroodstraling, warmtecapaciteit en warmtegeleiding, oppervlakteruwheid, wateropslag en efficiëntie van warmte-uitwisseling tussen het oppervlak en de atmosfeer. Deze eigenschappen staan in contrast met deze voor natuurlijke oppervlakken, die overigens bestaan uit water-doordringbare oppervlakken met plantenbegroeiing. Om de heterogeniteit van het stedelijk weefsel in rekening te brengen, wordt gebruik gemaakt van een 'tile'-benadering. Hierbij wordt rekening gehouden met zowel de versteende fractie als natuurlijke fractie van iedere gridcel. De respons in termen van uitwisseling van energie en waterdamp tussen het landoppervlak en de atmosfeer wordt voor beide fracties gewogen volgens hun oppervlaktepercentage. Hiernaast wordt ook de hitte-emissie naar de atmosfeer vanwege menselijke

activiteiten in rekening gebracht, dit niet te verwarren (maar veelal wel gepaard gaande) met CO₂-emissie. Deze activiteiten omvatten verbranding en elektriciteitsverbruik voor het verwarmen van gebouwen, verkeer, alsook huishoudelijke, economische, industriële en landbouwactiviteiten. Zoals aangetoond in Wouters et al. (2015b) geeft dit een niet onbelangrijke invloed op de temperatuur tijdens de nacht en dus de minimum temperaturen. Dit is vooral het geval in de winter, maar in lichte mate ook tijdens hittegolven in de zomer. Zodoende kan de stedelijke impact vanwege de versterking en de hitte-emissie op het lokale klimaat en de daaruit volgende stedelijke hitte-eilanden op hoge resolutie worden gesimuleerd. Hierdoor verkrijgen we een volwaardig Stedelijk KlimaatModel (SKM). We hanteren de standaard (domein)configuratie voor COSMO-CLM over België op 2,8 km uit het CLIMAQs project met COSMO-CLM (Brisson et al., 2014a, b). Daarbovenop houden we voor het SKM rekening met de stedelijke parameters zoals beschreven in paragraaf 3.2.2.

Gezien de heterogeniteit van het stedelijk weefsel is het verkrijgen van een luchttemperatuur uit in-situ metingen representatief voor het betreffende stedelijk gebied geen sinecure. Het voordeel van SKM is dat er nu slechts één twee-meter temperatuur is die representatief is voor de versteende oppervlakken van een bepaalde gridcel die een bepaald stadsdeel bestrijkt. Het nadeel van SKM is echter dat mogelijke temperatuurfluctuaties rond de gebouwen niet kunnen gerepresenteerd worden in SKM, waarvoor eigenlijk een veel hogere resolutie nodig is. Zo zullen bijvoorbeeld de hogere temperaturen aan de zonnzijde van gebouwen en de lagere temperaturen aan de schaduwzijde niet worden voorgesteld in het SKM. Een bijkomend merkbaar voordeel t.o.v. in-situ metingen is dat we de temperatuur voor uitgestrekte gebieden zoals Vlaanderen in zijn geheel kunnen gaan bekijken. Met SKM kunnen we op eenvoudige manier de gebieden gaan classificeren volgens de versterkingsgraad, waarvoor men afzonderlijk een aantal temperatuurstatistieken kan berekenen. Voorts is een SKM in staat om voor langere klimatologische periodes de temperaturen te gaan berekenen. Er moet wel opgemerkt worden dat in-situ metingen noodzakelijk zijn om de kwaliteit van het SKM te evalueren en te verbeteren. Een SKM wordt vervolgens aangewend voor het doorrekenen van scenario's voor stedelijke uitbreiding en mondiale klimaatverandering. Zo kunnen een aantal tendensen van temperatuur en hittestress voor de toekomst bekeken worden in steden en op het platteland.

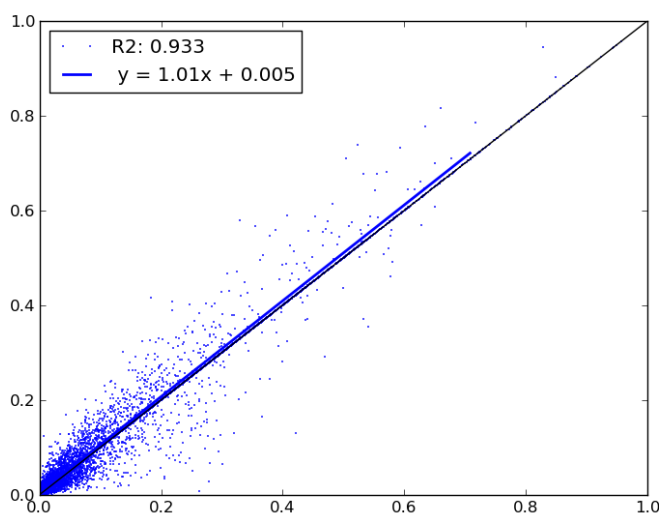
3.2.2 Input parameters

In deze paragraaf gaan we de model input parameters beschrijven voor heden en toekomstige landkarakteristieken die van belang zijn voor SKM. In Wouters et al. (2015b) werd reeds aangetoond dat de versterkingsgraad een belangrijke parameter is. Dat laatste is het percentage aan oppervlakte dat verhard is vanwege de aanwezigheid van straten en gebouwen. Zoals reeds beschreven in de algemene inleiding van dit rapport zal de versterking immers de stralingsenergie van de zon heel efficiënt opslaan tijdens de dag, hetgeen een cruciaal mechanisme is bij het ontstaan van stedelijke hitte-eilanden. Voorts zal zoals reeds aangehaald in de vorige paragraaf de hitte-emissie leiden tot een niet onbelangrijke verhoging in nachtelijke temperatuur. Het is dan belangrijk om voor zowel de versterkingsgraad als de hitte-emissie degelijke datasets voorhanden te hebben voor het heden en de toekomst. Deze worden hieronder in meer detail beschreven.

3.2.2.1 Gemodelleerde dataset voor verstening voor nu en de toekomst

Voor de berekening van de versteningsgraad wordt gebruik gemaakt van VITO's geavanceerd RuimteModel (Engelen et al., 2011b). Startende van het landgebruik volgens CORINE LC dataset voor België uit het recente verleden (jaar 2000) worden landgebruiksscenario's geconstrueerd voor de toekomst (tot jaar 2060) op een heel fijne ruimtelijke schaal (resolutie van minder dan 300m). Het model stelt een aantal maatschappelijke randvoorwaarden (m.b.t. toekomstig beleid, economie, bevolkingsgroei etc.) op verschillende ruimtelijke niveaus en baseert zich op het gedrag van patroonveranderingen in landgebruik uit het verleden. Voor deze studie wordt een 'business-as-usual'-scenario aangenomen (Acosta-Michlik et al., 2011).

Figuur 72: Het verband tussen de versteningsgraad (= verstening/oppervlakte-eenheid) geaggregeerd voor België op het SKM grid op 2,8 km horizontale resolutie, volgens de observatiedataset van de EEA (Maucha et al. 2010) op de X-as, en deze afgeleid uit VITO's landgebruikmodel (Engelen et al., 2011) op de Y-as



De blauwe punten stellen de Y-waarden van het landgebruik van 2000 voor. De blauwe lijn werd bekomen via lineaire regressie tussen de twee datasets. Als referentie wordt het één-éénverband als een zwarte lijn aangegeven. In de legende wordt respectievelijk de pearson correlatiecoëfficiënt en de vergelijking van de rechte bekomen uit de lineaire regressie weergegeven. (datapunten vanuit Vlaanderen, 2000).

Bron: KU Leuven (2014)

De datasets voor landgebruik voor het recente verleden (jaar 2000) volgens CORINE Land-Cover en deze volgens de 'RuimteModel'-projectie voor de toekomst (jaar 2060) zullen aangewend worden om voor deze tijds-kaders de verstening (dus de aanwezigheid van verharde oppervlakken zoals gebouwen en wegen) te gaan bepalen. Op basis van de landgebruikskartaat wordt eerst een 'verstedelijingsgraad' gegenereerd, wat niet mag worden verward met de 'versteningsgraad'. Hierbij wordt de verstedelijingsgraad berekend op basis het voorkomen van stedelijk of industrieel landgebruik binnen een straal van 1,5 km voor iedere 300 m gridcel. Deze kaart wordt vervolgens opgedeeld in 10 categorieën naargelang de verstedelijking, nl. 0-10 %, 10-20 %, 20-30 %, etc. Vervolgens wordt voor de 'actuele' toestand (jaar 2000) de combinatie berekend van ieder type landgebruik en de 10 verstedelijingscategorieën. Dit resulteert in een kaart met 233 combinaties (in theorie dus 240 combinaties mogelijk, maar sommige komen niet voor). Voor iedere combinatie werd een overlay gemaakt met een Europese versteningskaart op hoge resolutie (Maucha et al., 2010) die beschikbaar werd gesteld door het Europees Milieuagentschap (EEA), zie <http://www.eea.europa.eu/articles/urban-soil-sealing-in-europe>). Voor iedere combinatie werd berekend wat de *gemiddelde versteningsgraad* is volgens de kaart van het EEA. Omgekeerd wordt nu vertrekkende van de data uit het landgebruikmodel deze *gemiddelde versteningsgraad* toegekend aan iedere combinatie voor de gesimuleerde kaarten uit 2060. Bij dat laatste wordt de volgende werkwijze gehanteerd, nl. (1) de gesimuleerde verstedelijingsgraad in 2060 wordt opgedeeld in 10 categorieën, (2) combinaties van gesimuleerd landgebruik in 2060 en verstedelijingsgraad worden berekend, (3) aan deze combinaties worden dezelfde versteningswaarden als berekend voor 2000 toegekend. Deze procedure wordt toegepast voor zowel een landgebruikskartaat van het heden (2000)

als voor de toekomst (2060). Zoals verwacht komt de versterking op basis van de landgebruikskaart voor 2000 heel goed overeen met de versterking op basis van de oorspronkelijke EEA dataset, zie Figuur 71. De stadsuitbreiding volgens het business-as-usual scenario wordt vooral gekarakteriseerd door een toenemende versterking in de randstedelijke en natuurlijke gebieden, terwijl de versterking in de stadscentra als Brussel, Antwerpen, Gent en Brugge vrijwel constant blijft. De gemodelleerde versterkingskaarten voor 2000 en 2060 worden aangewend als input voor het SKM.

3.2.2.2 Hitte-emissie voor het heden en de toekomst

Hitte-emissie wordt berekend op basis van het jaarlijks primair energieverbruik in België uit niet-hernieuwbare energiebronnen voor het jaar 2000, en deze wordt ruimtelijk gespreid volgens de bevolkingsdichtheid (Flanner, 2009). Vertrekkende van dit jaargemiddelde wordt hierop zowel een dagcyclus als seizoenscyclus aangenomen, waarbij de laatste afhangt van de breedtegraad. De hitte-emissie wordt door het SKM gezien als een extra warmtebron aan het oppervlak, en wordt afgegeven aan de bovenliggende atmosfeer.

Voor het toekomstig scenario voor hitte-emissie in 2060 wordt een 'high-economic-growth' scenario aangenomen met een toename van 0.8 % per jaar voor Europa (de toename wereldwijd is hierbij ongeveer 2 % per jaar). Deze toename is gebaseerd op gegevens uit het verslag 'International Energy Outlook' (DOE/EIA-0484 2008) opgemaakt door de Energy Information Administration van de Verenigde Staten. Hierbij wordt echter geen rekening gehouden met regionale verschillen in toename, bijvoorbeeld als gevolg van hun specifieke socio-economische veranderingen. Zo blijkt specifiek voor Vlaanderen dat het energieverbruik over de sectoren heen vrijwel constant is gebleven sinds 2000 (zie www.milieurapport.be/nl/feitencijfers/sectoren/energiesector/energiegebruik-in-vlaanderen/energiegebruik-per-sector/).

Voorts worden de weers- en klimaatafhankelijkheid (cfr. de opwarming van de Aarde) van hitte-emissie momenteel nog niet in rekening gebracht in de huidige modelberekeningen en projecties. Bijvoorbeeld kunnen koelingsinstallaties tijdens hittegolven verbruikspieken vertonen die de zomerse hittestress op dat moment kunnen doen toenemen (zie bv. de Munck et al., 2013). Verder zal de ruimtelijke spreiding van de totale energieverbruiken in een land of gewest volgens bevolkingsdichtheid ongetwijfeld leiden tot scheeftrekkingen. Zo wordt energiegebruik in energie-intensieve industrietakken (chemie, ijzer & staal, raffinage, energieproductie, datacenters ...) opengesmeerd over gans België terwijl dat dikwijls geconcentreerd zit in specifieke zones (bv. haven Antwerpen). Zoals reeds vermeld in paragraaf 3.2.1 heeft de hitte-emissie momenteel slechts een klein effect op stedelijke hitte-eilanden in de zomer, en domineert hierbij vooral het hitte-opslageffect van straten en gebouwen. Dit doet vermoeden dat het effect van de veranderingen in hitte-emissie in de toekomst ondergeschikt zijn aan deze door veranderingen in landgebruik. Niettemin moet men in toekomstige studies de onzekerheid op (veranderingen in) hitte-emissies aangepakt worden voor accuratere projecties van stedelijke hittestress. Hiervoor is echter nog bijkomend onderzoek nodig.

3.2.3 Indicatoren gebaseerd op SKM

Omdat de stedelijke klimaatmodellering langere periodes en grotere gebieden bestrijkt dan in-situ metingen, is het mogelijk om een aantal bijkomende modelgebaseerde hittestress indicatoren te definiëren. De berekening van de stedelijke hitte-indicator gebaseerd op SKM verloopt op een analoge manier als deze gebaseerd op in-situ metingen, waarbij zowel de duur als het gewicht van een hittegolf in rekening wordt gebracht. Hierbij vertrekken de SKM indicatoren van de volgende drie stappen:

- (i) Op basis van de 15-minuutswaarden van gemodelleerde luchttemperatuur worden dagelijkse minimum (T_{min}) en maximum (T_{max}) temperaturen berekend voor iedere gridcel van het domein in Vlaanderen. Dit gebeurt apart voor de temperatuur boven versterkende en natuurlijke oppervlaktefractie van iedere gridcel van het horizontaal grid van 2,8 km resolutie. De periode gaat van 1 april om 00:00 tot 30 september om 23:45. De tijd wordt uitgedrukt in UTC+2, wat overeenkomt met de lokale tijd in België gedurende de zomerperiode.
- (ii) Vervolgens wordt bepaald welke dagen deel uitmaken van een hittegolf. Hierbij gaan we analoog te werk als de indicator gebaseerd op in-situ metingen.

(iii) Analoog als voor de in-situ metingen worden voor alle hittegolfdagen de overschrijdingen van de minimum en maximum temperaturen boven de drempelwaarden van respectievelijk 18,2 °C en 29,6 °C opgeteld in de 'hittegolf graaddagen':

$$HGD = \sum_i \left[(T_{\min,i} - 18.2 \text{ °C})^+ + (T_{\max,i} - 29.6 \text{ °C})^+ \right] h_i,$$

waarbij de som loopt over alle dagen i van de periode 1 april tot 30 september van het beschouwde jaar. De '+' symbolen die als superscript gebruikt worden wijzen erop dat enkel positieve argumenten (van hetgeen tussen ronde haakjes staat) in rekening worden gebracht; negatieve argumenten dragen niet bij tot de som. Dit wordt apart berekend voor het versteende en het natuurlijke oppervlaktefractie.

In wat hierna volgt maken we onderscheid tussen een 'in-situ'-indicator, een 'ruimtelijke' indicator, een 'omgevings'-indicator en een 'klimatologische' indicator:

1. De **'in-situ'-indicator** berekent enerzijds het aantal gemodelleerde hittegolf graaddagen (HGD) voor de versteende oppervlakken van een gridcel die zich bevindt in het centrum een stad, en anderzijds deze voor de natuurlijke oppervlakken van een gridcel in een ruraal gebied in de omgeving van die stad. Dit benadert de stedelijke hittestress indicator gebaseerd op in-situ metingen, bijvoorbeeld die voor Antwerpen: de modelgebaseerde HGD komen hierbij respectievelijk overeen met deze zoals gemeten boven een gebouw in de stad, en met deze gemeten voor een grasveld buiten de stad. Net zoals voor de indicator gebaseerd op de in-situ metingen worden op jaarbasis de HGD voor elke locatie voorgesteld op één grafiek. Zo komt de bijkomende hittestress vanwege het hitte-eiland tot uiting. De in-situ indicator wordt gebruikt om enerzijds het SKM model te gaan evalueren met in-situ metingen in termen van stedelijke hittestress, alsook om de indicator voor het verleden te gaan reconstrueren alsof hij gemeten zou worden door de in-situ metingen. Hierbij worden de gridcellen voor enerzijds de stad en anderzijds het natuurlijk gebied gekozen zodat zij overeen komen met de locatie van de in-situ metingen.
2. Om de gemiddelde ruimtelijke variatie van de hittestress over uitgestrekte gebieden zoals Vlaanderen te kunnen visualiseren, definiëren we de **'ruimtelijke'-indicator**. Hierbij wordt voor iedere gridcel van het modeldomein de HGD berekend voor zowel de versteende oppervlakken en de natuurlijke oppervlakken in het SKM. Vervolgens wordt een gewogen gemiddelde van de HGD berekend volgens de versteende en natuurlijke fractie voor elk van de gridcellen. Voor de ruimtelijke visualisatie gaat men voor iedere gridcel het 10-jarig gemiddelde nemen. Dit doet men voor zowel een tienjaarlijkse simulatie uit het recente verleden, als voor de scenario's voor de toekomst m.b.t. stedelijke uitbreiding en mondiale klimaatverandering.
3. De temperatuur en hittestress hangt sterk af van in welke soort omgeving men zich bevindt. Daarvoor zullen we een **'omgevings'-indicator** definiëren die de SKM gridcellen over het Vlaams grondgebied opdeelt volgens de huidige versteningsgraad van de omgevende 100 km². Hierbij beschouwen we drie omgevingscategorieën, nl. stedelijke (verstening groter of gelijk aan 50 %) licht-stedelijke (verstening tussen 25 % en 50 %) en natuurlijke gebieden (verstening lager dan 25 %). Voorts berekent men voor elk van de gridcellen de 'ruimtelijke' indicator voor ieder jaar apart. Vervolgens wordt voor elk van de categorieën de gemiddelde HGD over gridcellen heen berekend. Deze getallen worden voor elk van de categorieën (elk een andere kleur) samen in een grafiek gezet voor elk van de jaren (positie op de X-as). Zodoende komt de invloed van versteningsgraad op de hittestress tot uiting.
4. De **'klimatologische' indicator** heeft als doel om voor langere periodes voor het heden en voor toekomstige scenario's de klimatologisch gemiddelde hittestress voor Vlaanderen te gaan beschouwen, alsook de variatie over de jaren heen. Hiervoor berekenen we eerst voor ieder jaar de 'omgevings'-indicator van hierboven, dus met dezelfde indeling van het Vlaams grondgebied volgens de versteningsgraad. Vervolgens berekenen we hieruit voor elk van de omgevingscategorieën apart de gemiddelde HGD over de jaren heen, alsook hun 16^e en 84^e percentielen. Dat laatste komt bij een normaalverdeling overeen met één standaarddeviatie. De gemiddelde (als bolletjes) en percentielen (als onder -en bovenlagen) worden op een

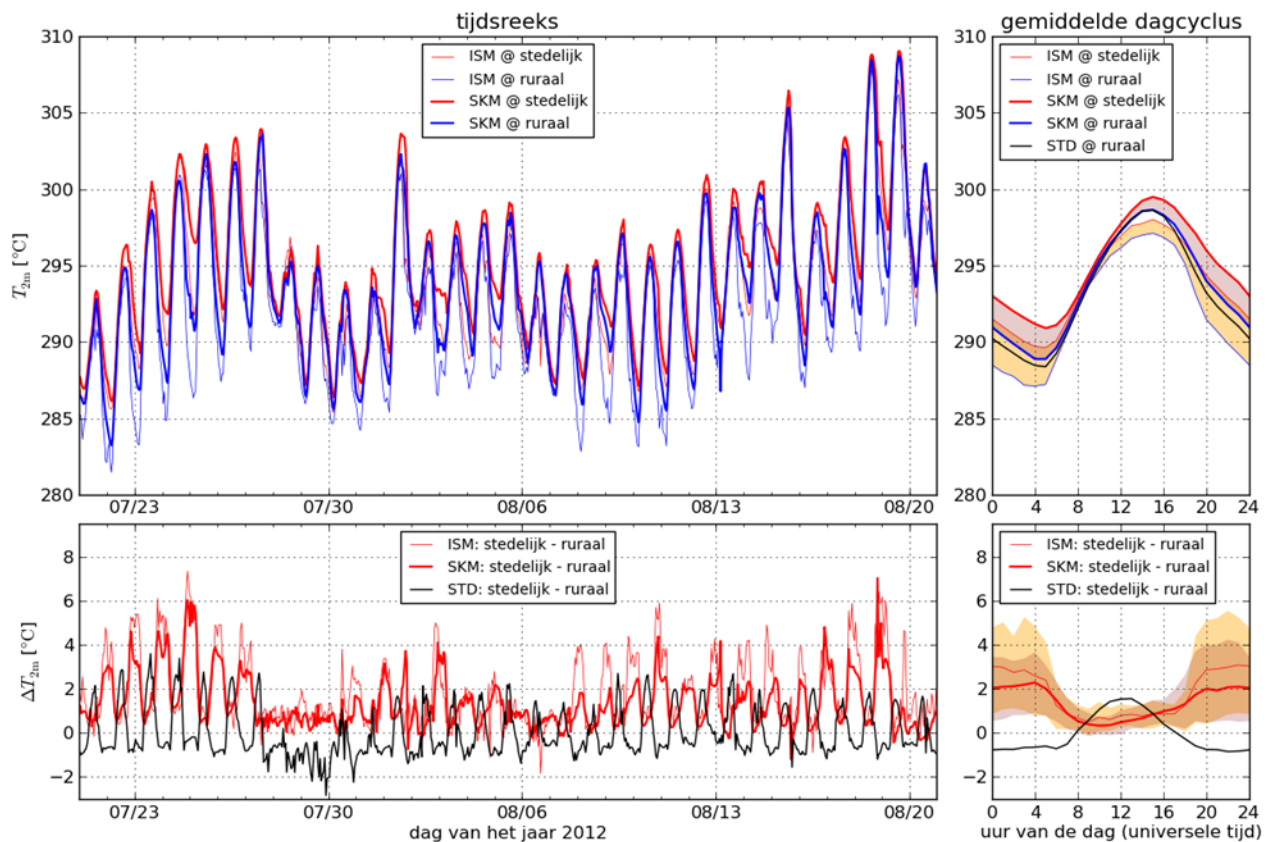
grafiek uitgezet voor elk van de categorieën (elk een andere kleur), én voor elk van de klimatologische periodes (elk een andere plaats op de X-as). Zodoende verkrijgt men voor de verschillende mogelijke toekomstige scenario's een aantal klimatologische tendensen voor stedelijke hittestress in termen van gemiddelde jaarlijkse HGD en de variatie hierop.

3.3 Modevaluatie voor 2012

3.3.1 Evaluatie van SKM op basis van in-situ metingen voor Antwerpen

Om het SKM te evalueren, gaan we na of het in staat is de uurlijkse waarden voor temperatuur van de in-situ metingen voor de stedelijke site in Antwerpen en de nabij gelegen rurale site in Vremde goed te reproduceren. Dit doen we voor de zomer vanaf wanneer de stedelijke klimaatobservaties voor Antwerpen voorhanden zijn. Wat betreft de grensvoorwaarden is 2012 de klimatologische dataset van CLIMAQs slechts beschikbaar voor de periode van 2000 tot 2010. Daarom maken we voor de evaluatieperiode in 2012 in plaats daarvan gebruik van de weersvoorspellingsdataset van het Europees Centrum voor Weersverwachtingen op Middellange Termijn (ECMWF) beschikbaar op 12,5 km resolutie. Vooreerst zien we in Figuur 73 dat het model met stedelijke parameterisatie (SKM) in staat is om de temperatuur en het stedelijk hitte-eiland, inclusief hun dagcyclus (cfr. hitte-eiland maximum tijdens de nacht) en dagdagelijkse variabiliteit heel goed te reproduceren. Dit is in tegenstelling tot hetzelfde model zonder stedelijke parameterisatie (STD) die zowel de magnitude als de dagfase van het stedelijk hitte-eiland van Antwerpen niet kan reproduceren. Echter merken we voor het SKM toch nog een aantal tekortkomingen: ten eerste zien we een algemene onderschatting van het stedelijk hitte-eiland voor Antwerpen van ongeveer 25 %, dit zowel voor de lage als de hoge intensiteiten van het stedelijke hitte-eiland. Deze onderschatting heeft o.a. te maken met het feit dat de turbulente processen in de laag dicht bij het oppervlak tijdens de nacht (wanneer het stedelijk hitte-eiland een maximum bereikt) door klimaatmodellen moeilijk te modelleren is, zoals uitvoerig besproken in Steeneveld et al., (2012). Door de SKM te gaan vergelijken met geobserveerde verticale temperatuurprofielen op masten van de VMM in Zwijndrecht en SCK-CEN in Mol zien we inderdaad dat het model de stijging van de temperatuur met de hoogte onderschat in natuurlijke gebieden (resultaten hiervan vallen buiten het bestek van deze studie). Zoals we konden aantonen voor Parijs in Wouters et al. (2013) kan dat laatste inderdaad aanleiding geven tot een onderschatting van stedelijke hitte-eilanden. Ook blijkt dat COMSO-CLM over het algemeen de hoeveelheid bewolking overschat (pers. comm. Kwinten Van Weverberg). Hierdoor wordt de hoeveelheid zonneinstraling onderschat, wat op zijn beurt aanleiding geeft tot een onderschatting van het stedelijk hitte-eiland (pers. comm. Dirk Lauwaet). Ten tweede zien we voor de zomerperiode van 2012 een algemene overschatting van de twee-meter temperaturen voor zowel de stedelijke site als voor de natuurlijke site. Dit is een algemene bevinding bij gebruikte model COSMO-CLM voor Europese zomers (Keuler et al., 2014). Het model werd ook geëvalueerd met in-situ metingen voor Gent waarvoor gelijkaardige resultaten werden bekomen (niet getoond).

Figuur 73: Uurlijkse tijdsreeksen en gemiddelde dagcycli volgens in-situ metingen (ISM; dunne lijnen), stedelijke klimaatmodellering (SKM; dikke lijnen) en standaard regionale klimaatmodellering (STD; zwarte lijnen)



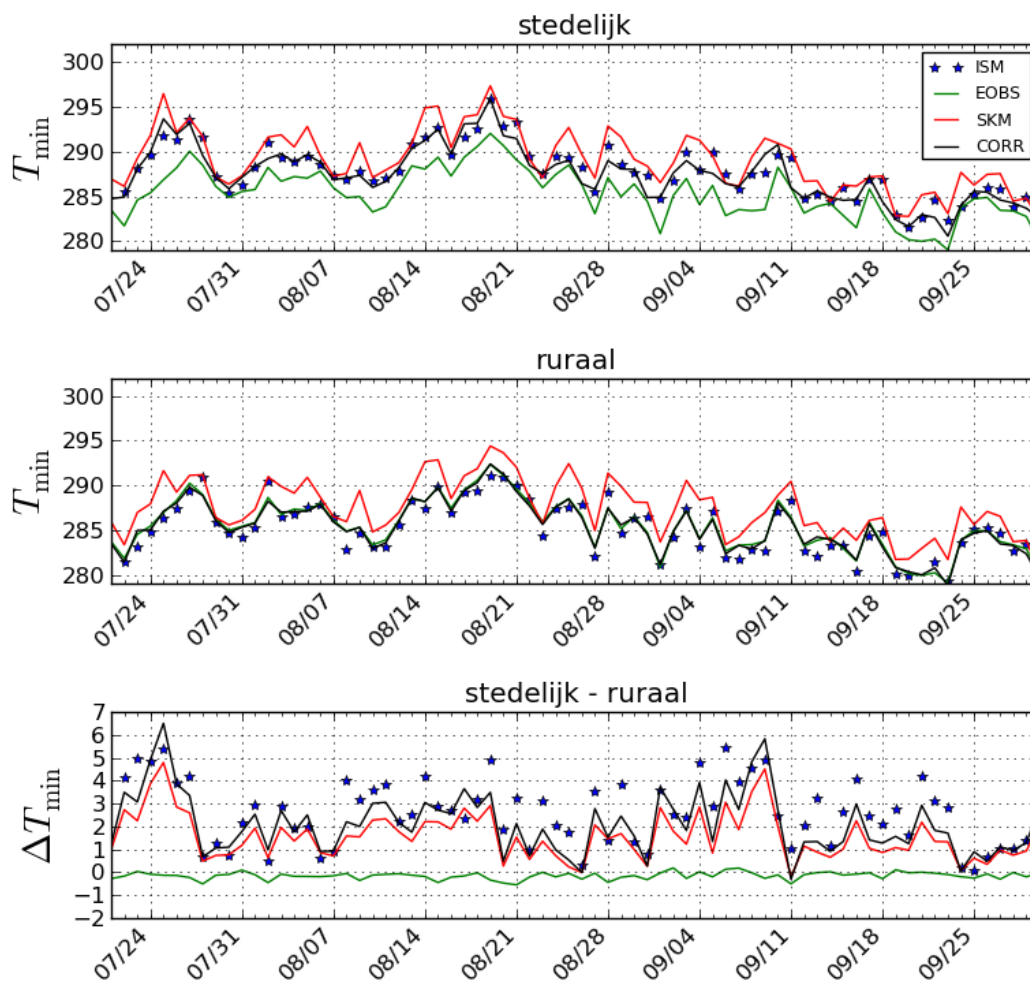
De bovenste panelen geven de waarden voor de stedelijke site op het Koninklijk Lyceum van Antwerpen (rood) en voor de rurale site op de bio-boerderij te Vremde (blauw). In het paneel rechtsboven wordt het stedelijk hitte-eiland volgens de in-situ metingen in het oranje gekleurd, en deze volgens de SKM in het rood. De onderste panelen tonen het temperatuurverschil tussen de stedelijke en natuurlijke site voor elk van de datasets. In het paneel rechtsonder wordt het bereik tussen de 10e en 90e percentielen van het stedelijk hitte-eiland weergegeven door de oranje kleur voor de in-situ metingen, en door de rode kleur voor stedelijke klimaatmodellering. (Antwerpen en Vremde, 2012).

Bron: Wouters et al. (2015b), aangepast

3.3.2 SKM versus observatiedataset E-OBS

De E-OBS dataset (Haylock et al., 2008) levert dagelijkse minima, maxima en gemiddelde temperaturen over Europa vanaf 1950 tot heden. Deze dataset wordt weergegeven op een grid met een horizontale resolutie van ongeveer 25 km. Vanwege het grootschalig karakter worden lokaal effecten zoals het stedelijk hitte-eiland niet weergegeven in de dataset. Meer nog, zoals hoger aangegeven in sectie 1.1.1 worden microklimaten zoals stedelijke hitte-eilanden zoveel mogelijk gemeden in het WMO synoptische meetnetwerken waarop E-OBS berust. We kunnen E-OBS bijgevolg beschouwen als een dataset voor de grootschalige achtergrondtemperatuur van de natuurlijke gebieden. Deze dataset kan daarom niet gebruikt worden om stedelijke hittestress in kaart te brengen of om een modevaluatie te doen m.b.t. het reproduceren van stedelijke hitte-eilanden. Dat laatste manifesteert zich nl. meestal over ruimtelijke schalen die typisch kleiner zijn dan 25 km (met uitzondering op erg grote steden zoals Brussel en Parijs). Voor modevaluatie zijn we dus aangewezen op puntmetingen van temperaturen. In het vervolg van deze paragraaf vergelijken we SKM en E-OBS met in-situ metingen. Hierbij gaan we na hoe de dagelijkse minima en maxima in E-OBS versus deze voor SKM de in-situ metingen van Antwerpen binnen en buiten de stad kan reproduceren aan de hand van Figuur 74. In deze figuur komt ook een gecorrigeerde dataset (CORR) aan bod, maar dit zal worden besproken in Sectie 3.3.3.

Figuur 74: Dagelijkse temperatuurminima voor in-situ metingen (ISM), E-OBS, stedelijke klimaatmodellering (SKM) en gecorrigeerde stedelijke klimaatmodellering (CORR) gedurende de zomer van 2012



Het bovenste en het middelste paneel tonen de resultaten respectievelijk voor de stedelijke site voor het Koninklijk Lyceum te Antwerpen en de rurale op de bio-boerderij te Vremde. Het onderste paneel toont het verschil tussen de sites voor elk van de datasets (Antwerpen en Vremde, 2012).

Bron: KU Leuven (2014)

Zoals blijkt uit Figuur 74 komen de temperatuurminima in E-OBS heel goed overeen met de in-situ metingen voor de natuurlijke site in Vremde. Dat is ook het geval voor de temperatuurmaxima (niet getoond). Voor de stedelijke site daarentegen krijgt men voor de minima volgens E-OBS een duidelijke onderschatting. Dit is ook het geval voor de temperatuurmaxima in E-OBS (niet getoond), maar dan in mindere mate waardoor dus de dagelijkse gang (ie., het verschil tussen maxima en minima) wordt overschat. In het SKM worden over het algemeen de temperatuurminima en maxima overschat voor beide sites, en dit in iets grotere mate voor de natuurlijke site. Dit komt overeen met de evaluatie voor de uurlijkse metingen in de vorige paragraaf. Het verschil in temperatuurminima tussen stad en platteland wordt niet gereproduceerd door E-OBS zoals aangegeven op het onderste panel van Figuur 74. Het stad-platteland contrast wordt wél goed gereproduceerd door SKM in zowel de minimum (zie Figuur 74) als de maximum temperaturen (niet getoond), zij het met de reeds aangegeven onderschatting van 25 % in de nacht.

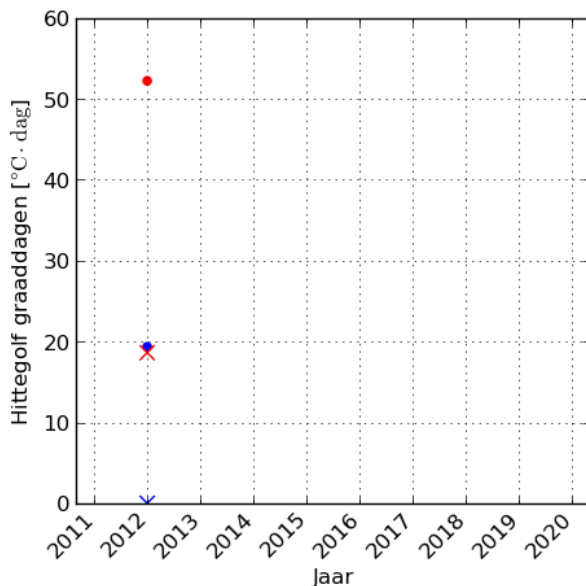
Puur vanuit retrospectief oogpunt blijken SKM en de E-OBS-dataset elk zijn voordelen te hebben, wat hieronder zal worden besproken. We kunnen voor deze sectie besluiten dat E-OBS dataset goed de absolute temperaturen, meer bepaald de minima en maxima, kan weergeven voor de natuurlijke gebieden, terwijl het contrast in temperaturen tussen stad en platteland helemaal niet wordt

weergegeven. Daarentegen kan SKM het stad-platteland contrast goed weergeven, terwijl over het algemeen de absolute temperaturen worden overschat door het model voor zowel stad als platteland. De bevindingen voor E-OBS waren te verwachten gezien de onderliggende data berust op gelijkaardige metingen als de in-situ metingen voor Antwerpen, maar dan alleen voor natuurlijke gebieden en opgeschaald naar een grove resolutie van 25 km.

3.3.3 Evaluatie stedelijke hitte-indicator voor 2012 op basis van SKM

Zoals reeds aangehaald in paragraaf 3.3.1 en 3.3.2 is er een algemene temperatuuroverschatting in het gebruikte SKM. We gaan nu na wat de invloed is van deze temperatuuroverschatting op de in-situ stedelijke hittestress indicator uit paragraaf 3.2.3, zie Figuur 75. Hoewel het model een toename in hittegolf graaddagen voor het stedelijk station t.o.v. het rurale station bevestigt, zien we echter dat het aantal hittegolfgraaddagen voor de metingen tijdens de zomer 2012 voor beide sites heel sterk overschat. Dit was te verwachten uit het feit dat de indicator gebaseerd is op vaste drempelwaarden voor temperaturen, en dus sterk gevoelig aan een zulke systematische overschattingen van temperaturen. Een oplossing dringt zich op om uit deze impasse te geraken.

Figuur 75: De in-situ stedelijke hitte-indicator voor Antwerpen



De kruisjes tonen het aantal hittegolf graaddagen volgens de in-situ metingen, en de bolletjes deze volgens de ongecorrigeerde output van het stedelijk klimaatmodel. De rode symbolen refereren naar de stedelijke site in Antwerpen (Koninklijk Lyceum Antwerpen) en de blauwe symbolen naar de rurale site te Vremde (Bio-boerderij Van Leemputten) (Antwerpen en Vremde, 2012).

Bron: KU Leuven (2014)

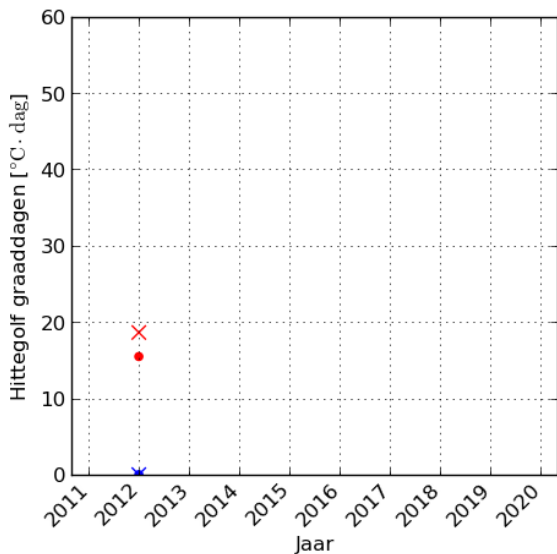
3.3.4 Evaluatie stedelijk hitte-indicator voor 2012 op basis van gecorrigeerde SKM

In paragraaf 3.3.1 hebben we gezien dat de historische datasets verkregen vanuit SKM en E-OBS elk sterke en zwakke punten bezitten, maar dat ze afzonderlijk niet geschikt zijn om de hittestress voor zowel stad als platteland in kaart te brengen voor het recente verleden. Zo hebben we gezien in paragraaf 3.3.2 dat het SKM aanleiding geeft tot een algemeen te hoog aantal hittegolfgaaddagen, terwijl we voor E-OBS vanwege de afwezigheid van stedelijk micro-klimaat in de dataset geen verhoging in hittegolfgaaddagen voor steden t.o.v. platteland oplevert (niet getoond). Daarom passen we nu een methode toe om aan de hand van E-OBS de modelfout in SKM te corrigeren. Dit zal dan resulteren in de gecorrigeerde dataset (CORR) die zowel de fluctuaties op microschaal (zoals stedelijke hitte-eilanden) als de grootschalige absolute temperatuur goed reproduceert. Deze methode is hieronder kort beschreven. Voor verdere details verwijzen we naar Annex 5.

Voor elke SKM gridcel wordt de omgevende grootschalige temperatuur berekend voor zowel SKM als voor E-OBS. Vervolgens gaan we voor elke SKM gridcel de grootschalige temperatuur uit E-OBS optellen, en deze van het SKM aftrekken. Gezien E-OBS de stedelijke temperatuur niet in rekening neemt, zullen we voor de berekening van de grootschalige temperatuur stedelijke gebieden weglaten in beide datasets en vervangen met het ruimtelijk gemiddelde van de omgeving. Zo zal voor de stedelijke gebieden in eerste instantie eenzelfde modelcorrectie doorgevoerd worden voor steden als deze voor de natuurlijke omgeving. Op basis van deze grootschalige achtergrondfout kan men nu voor het hele domein (inclusief stedelijke en niet-stedelijke gebieden) een correctie doorvoeren. We kunnen deze methode interpreteren als een 'bias-correctie' van het SKM. Bij zo'n grote schaal modelcorrectie zullen de kleinschalige ruimtelijke fluctuaties - zoals het stedelijk hitte-eiland - in het SKM behouden blijven. Bovenop de grootschalige correctie gaan we ook een tweede correctie doorvoeren die zal compenseren voor het feit dat het gebruikte SKM de UHI intensiteit met 25 % onderschat (zie paragraaf 3.3.1).

De resultaten voor de gecorrigeerde dataset CORR in termen van dagelijkse minima voor de stedelijke site te Antwerpen en de rurale te Vremde worden weergegeven in Figuur 74. We merken op dat CORR zowel de absolute temperaturen als het stads-plattelandscontrast goed kan representeren, dit in tegenstelling tot de ongecorrigeerde SKM dataset en de E-OBS dataset. Als gevolg hiervan zien we dat nu ook de aantal hittegolfgaaddagen voor beide sites nu vrij goed gereproduceerd wordt (zie Figuur 76), wat niet helemaal niet het geval is voor de ongecorrigeerde SKM (zie paragraaf 3.3.2 en Figuur 75). Dit toont aan dat de doorgevoerde bias-correctie en de hitte-eilandcorrectie op de resultaten van het SKM nodig - maar ook voldoende - zijn om de stedelijke hittestress over heel Vlaanderen te gaan reconstrueren. Deze modelcorrecties zullen we dan ook toepassen voor het aanmaken van de retrospectieve dataset van stedelijke hitte-indicatoren voor Vlaanderen van 2000 tot 2010 in de volgende sectie.

Figuur 76: Idem als figuur 75, maar volgens stedelijke klimaatmodellering waarvoor correcties werden toegepast volgens Annex 5 m.b.t de grootschalige temperatuur en de intensiteit van stedelijke hitte-eilanden (Antwerpen en Vremde, 2012)



Bron: KU Leuven (2014)

3.4 Toepassing stedelijke klimaatmodellering (SKM) op hitte-eilandindicator

3.4.1 Retrospectieve SKM

In deze sectie berekenen we de stedelijke hittestress indicator op basis van SKM voor een lange klimatologische periode tussen 2000 en 2010 voor Vlaanderen. Hierbij gebruiken we exact dezelfde modelopstelling als in de evaluatie besproken in sectie 3.3. Hierbij zullen we ook de modelcorrectie doorvoeren op basis van E-OBS. In plaats van deze zoals in een evaluatieopstelling in sectie 3.3 direct aan te drijven door een weervoorspellingsdataset van 2012 op 12,5 km resolutie, zullen we nu deze gaan nesten in de ERA-INTERIM-geneste QLIMAQS-dataset beschikbaar voor een lange periode van 2000 tot 2010 (Brisson et al., 2014a,b). Deze retrospectieve berekeningen zullen in eerste instantie dienen om een globale historiek van de hittestress indicator te bekomen voor Antwerpen en voor andere Vlaamse steden, waar ook zal gekeken worden naar zijn ruimtelijke en temporele variabiliteit (zie verder). Nadien zal de retrospectieve berekening ook dienen als basis voor de toekomstige business-as-usual scenario's voor stedelijke uitbreiding (paragraaf 3.4.2) en globale klimaatverandering (paragraaf 3.4.3).

We bespreken nu de historiek van de in-situ stedelijke hitte-indicator (definitie, zie paragraaf 3.2.3) voor de verschillende steden in Vlaanderen volgens de gecorrigeerde SKM tussen 2000 en 2010, zie figuren 77 tot 82. De locaties van de verschillende stations worden weergegeven in Tabel 16. Zoals reeds besproken in Sectie 3.3 kan deze dataset na correctie het stedelijk hitte-eiland en de stedelijke hitte-indicator voor Antwerpen in 2012 goed reproduceren. Deze vormen dus een goede proxy voor de ontbrekende meetwaarden in die jaren. De figuren laat zien dat er voor de hele periode beduidend meer hittegolf graaddagen zijn in de stadscentra dan in de omgevende natuurlijke gebieden. We zien ook dat het aantal hittegolf graaddagen voor de natuurlijk sites op 2003 en 2006 na bijna altijd gelijk is aan nul. Dat is in tegenstelling tot de stedelijke sites waarbij het aantal hittegolf graaddagen voor de jaren 2000 tot en met 2006 meestal de kaap van 5 hittegolf graaddagen overschrijdt. We merken een grote variabiliteit in de tijd in het aantal hittegolf graaddagen voor alle stedelijke sites, met uitschieters voor de jaren 2003 en 2006. Deze temporele variabiliteit reflecteert zich ook in het feit dat voor de jaren 2007 tot en met 2010 het aantal hittegolf graaddagen voor de meeste steden en hun natuurlijk omgeving op nul ligt. We zien verder dat het aantal hittegolf graaddagen sterk beïnvloed wordt door de grootte van de stad. Zo wordt het centrum van Brussel tijdens de zomers van 2003 en 2006 blootgesteld aan 76 en 103 hittegolf graaddagen, terwijl deze voor het centrum van Lier 'slechts' 32 en 34 hittegolf graaddagen telt. Tot slot bemenken we dat, naast de grootte, ook de locatie van steden een grote invloed heeft op de hittestress. De stad Hasselt landinwaarts (Figuur 80) ondervindt

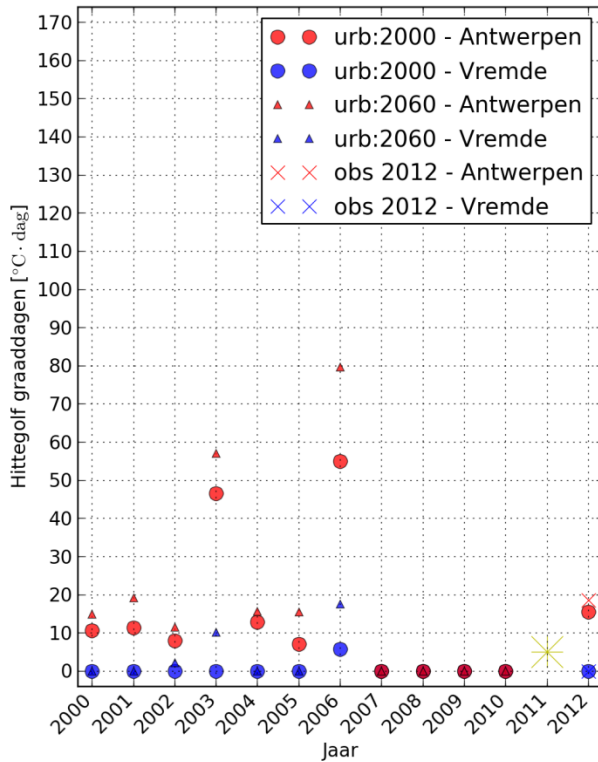
bijvoorbeeld beduidend meer hittegolf graaddagen over de jaren heen dan de stad Brugge dichterbij de kust (zie Figuur 81), wat vooral te wijten is aan het algemeen afkoelend effect van de zee tijdens de zomer. Dat is ondanks het feit dat de lokale toename in temperatuur vanwege de aanwezigheid van die steden (t.t.z. de stedelijke hitte-eilanden) ongeveer dezelfde is (Wouters et al. 2015b). Hasselt ondervindt overigens meer hittegolf graaddagen dan de grotere stad Gent (Figuur 79) die zich net zoals Brugge ook dichterbij de kust bevindt. Noteer hierbij dat de invloed van de zee zich manifesteert op de hittestress voor zowel stad als platteland. Daardoor is de stad Hasselt de enige stad in deze analyse die voor 2010 een positief aantal hittegolf graaddagen ondervindt voor zowel zijn centrum als zijn natuurlijke omgeving.

Tabel 16: Locaties van de (toekomstige) in-situ metingen gebruikt voor de in-situ stedelijke hittestressindicator

stad	# inw.	stedelijk station		ruraal station	
		naam locatie	lat/lon-coördinaten	naam locatie	lat/lon-coördinaten
Brussel	1 000 000	BIM station Brussel/Molenbeek	50,850 / 4,334	VMM station St Pieters-Leeuw	50,768 / 4,224
Gent	250 000	VMM station Gustaaf Callierlaan	51,041 / 3,735	KMI station Melle	50,980 / 3,816
Brugge	120 000	nieuw meetpunt Stad Brugge	51,209 / 3,224	VMM station Moerkerke	51,255 / 3,363
Hasselt	80 000	nieuw meetpunt Stad Hasselt	50,930 / 5,339	KMI station Diepenbeek	50,915 / 5,450
Lier	35 000	nieuw meetpunt Stad Lier	51,131 / 4,569	VITO station Vremde	51,166 / 4,549

Bron: VITO (2014)

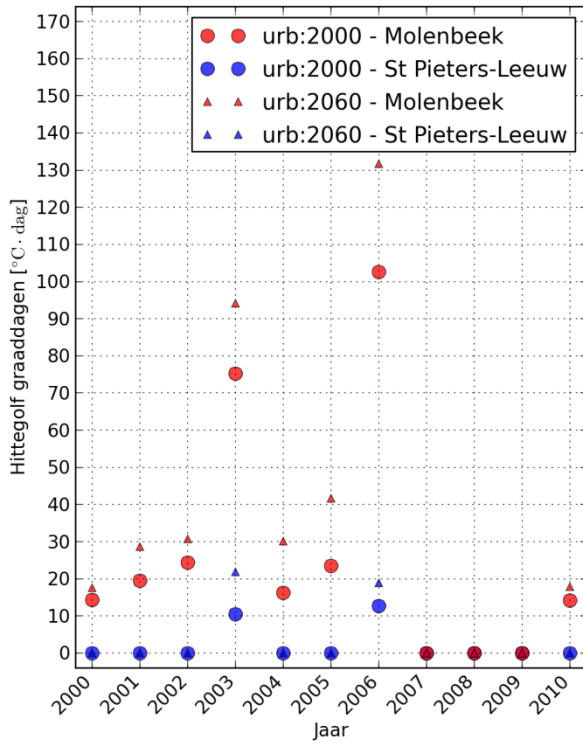
Figuur 77: Historiek van de in-situ stedelijke hitte-indicator voor Antwerpen volgens gecorrigeerde stedelijke klimaatmodellering



De bolletjes en de driehoeken verwijzen naar de simulaties met stedelijk landgebruik voor respectievelijk het jaar 2000 en 2060. De kruisjes verwijzen naar de metingen voor 2012. De rode symbolen komen overeen met de temperaturen op de locatie van het stedelijk meetstation op het Koninklijk Lyceum van Antwerpen, terwijl de blauwe symbolen overeenkomen met deze op de locatie van het ruraal station te Vremde. De resultaten voor de modevaluatie in 2012 werden aan de figuur toegevoegd voor zowel de metingen (kruisjes) als voor gecorrigeerde modeloutput (bolletjes) (Antwerpen en Vremde, 2000 tot en met 2012).

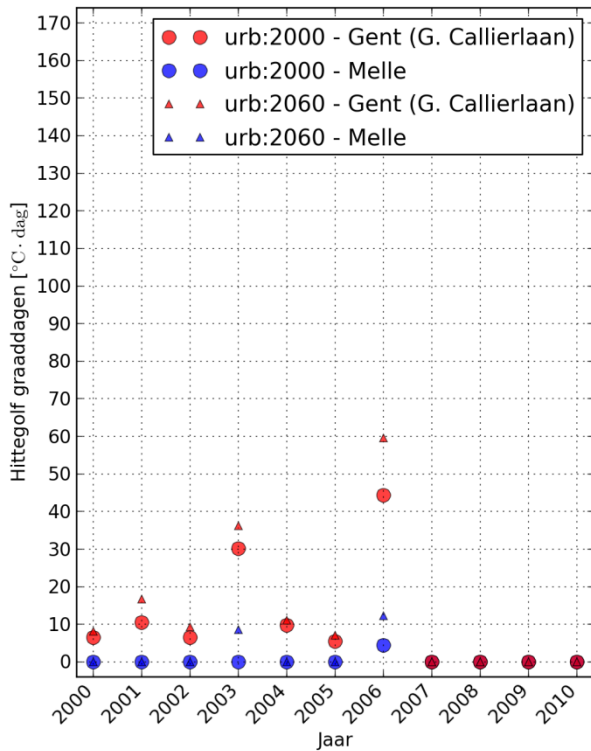
Bron: KU Leuven (2014)

Figuur 78: Historiek van de in-situ stedelijke hitte-indicator volgens gecorrigeerde stedelijke klimaatmodellering (idem als figuur 76) voor Brussel (Molenbeek en St Pieters-Leeuw, 2000 tot en met 2010)



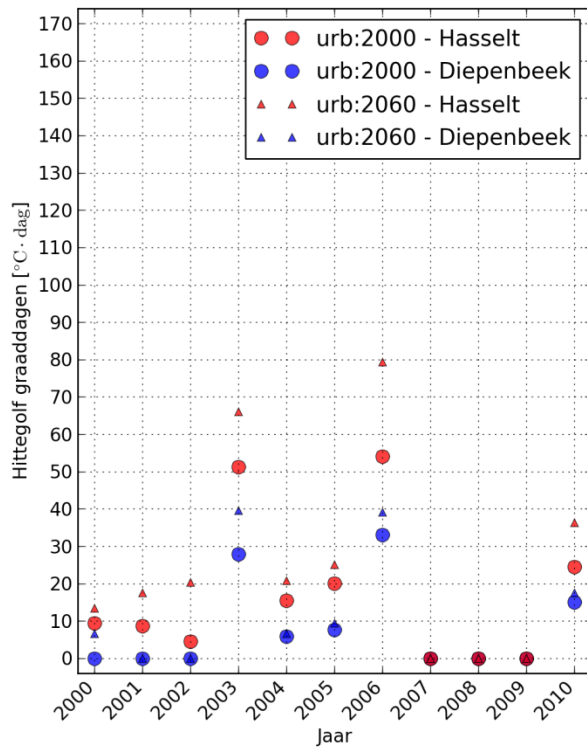
Bron: KU Leuven (2014)

Figuur 79: Historiek van de in-situ stedelijke hitte-indicator volgens gecorrigeerde stedelijke klimaatmodellering (idem als figuur 76) voor Gent (Gent en Melle, 2000 tot en met 2010)



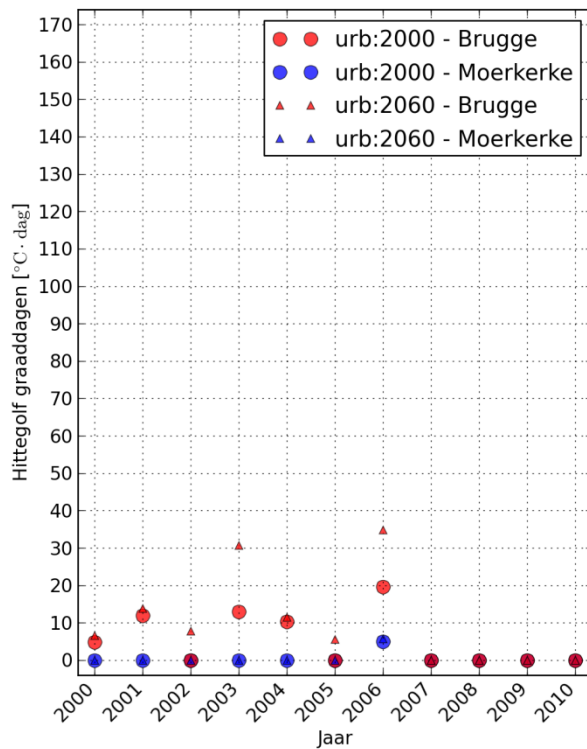
Bron: KU Leuven (2014)

Figuur 80: Historiek van de in-situ stedelijke hitte-indicator volgens gecorrigeerde stedelijke klimaatmodellering (idem als figuur 76) voor Hasselt (Hasselt en Diepenbeek, 2000 tot en met 2010)



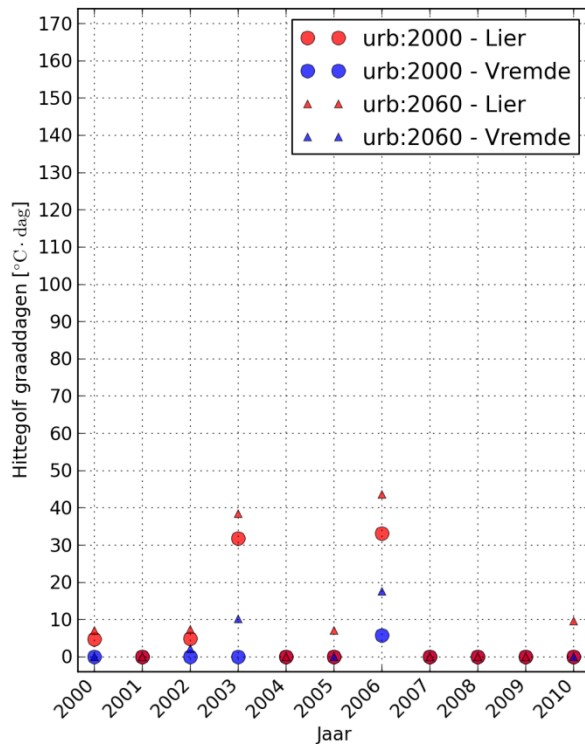
Bron: KU Leuven (2014)

Figuur 81: Historiek van de in-situ stedelijke hitte-indicator volgens gecorrigeerde stedelijke klimaatmodellering (idem als figuur 76) voor Brugge (Brugge en Moerkerke, 2000 tot en met 2010)



Bron: KU Leuven (2014)

Figuur 82: Historiek van de in-situ stedelijke hitte-indicator volgens gecorrigeerde stedelijke klimaatmodellering (idem als figuur 76) voor Lier (Lier en Vremde, 2000 tot en met 2010)



Bron: KU Leuven (2014)

3.4.2 Artificiële scenario's voor stedelijke uitbreiding 2060

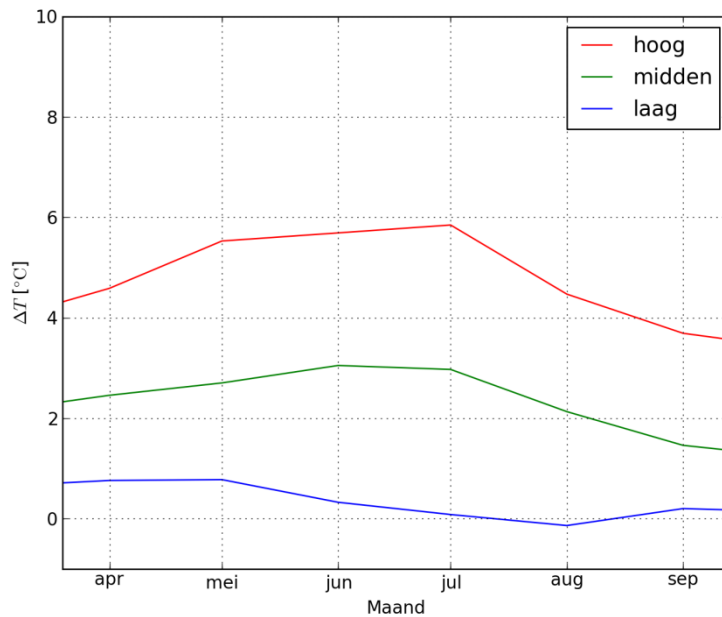
Deze sectie heeft als doel om de weerslag van de stedelijke uitbreiding op het stedelijke hittestress te onderzoeken. Onder stedelijke uitbreiding verstaan we zowel de toename in versteningsgraad als de toename in hitte-emissie volgens een 'business-as-usual' scenario. Om de gevoeligheid van deze stedelijke uitbreiding na te gaan zullen we exact dezelfde retrospectieve SKM gaan doorvoeren als in paragraaf 3.4.1 en dit met dezelfde grensvoorwaarden uit CLIMAQs voor de periode van 2000 tot en met 2010. Het enige verschil is dat de versteningsgraad en hitte-emissie van 2000 wordt vervangen door deze voor de projecties in 2060 beschreven in paragraaf 3.2.2. Voorts nemen we aan dat de modelfout voor de gevoeligheidsrun exact dezelfde is deze voor de retrospectieve run. Daarom passen we dezelfde biascorrectie toe zoals deze werd berekend in sectie 3.4.1. Voor meer details m.b.t. deze biascorrectie verwijzen we naar het einde van Annex 5.

De stedelijke uitbreiding doet het aantal hittegolf graaddagen sterk toenemen vooral in de stadcentra, zie Figuren 77 tot en met 82. De toename in stedelijke hittestress is vooral merkbaar in de stadscentra, ook al manifesteert de staduitbreiding (en bijgevolg de verstening) zich vooral daarbuiten in de randstedelijke gebieden en de aangrenzende natuurlijke gebieden. Voorts is de toename des te sterker voor de grotere steden als Antwerpen en Brussel dan voor de kleinere steden als Lier en Brugge. Verder zien we een hogere toename van hittegolf graaddagen voor warmere zomers (de jaren 2003 en 2006) dan voor de koelere zomers. Voor de warmere zomers manifesteert de toename zich in lichte mate ook in de natuurlijke omgeving, maar is gemiddeld over de jaren heen vrij klein. De toename in hittegolfgraaddagen vanwege stedelijke uitbreiding in combinatie met de klimaatverandering voor Vlaanderen zal besproken worden in de volgende sectie.

3.4.3 Artificiële scenario's voor globale klimaatverandering 2060

Deze sectie heeft als doel om een aantal tendensen voor hittestress in en rond steden te gaan bekijken voor de verwachte globale klimaatverandering in de toekomst al dan niet gecombineerd met de stedelijke uitbreiding. Om te kunnen blijven gebruik maken van de hiervoor genoemde correcties voor SKM zullen we een toekomstig klimaatscenario construeren vertrekkende van de gecorrigeerde retrospectieve modelsimulaties uit paragraaf 3.4.1 en de gevoeligheidsrun voor stedelijke uitbreiding uit paragraaf 3.4.2. Vervolgens tellen we hierbij de verwachte gemiddelde temperatuurstijging per maand volgens de globale klimaatverandering bij op. Hierbij maken we gebruik van de CMIP5 hoog, midden, -en laagscenario's zoals beschreven in het meest recente VMM klimaatrapport (van Lipzig & Willems, 2015), zie ook Figuur 83.

Figuur 83: De verandering in maandgemiddelde temperatuur te Ukkel voor de zomermaanden over 60 jaar (2060 versus 2000) volgens het hoog (rode lijn), midden (groene lijn) en laag (blauwe lijn) klimaatscenario uit van Lipzig & Willems (2015)



Bron: KU Leuven (2014)

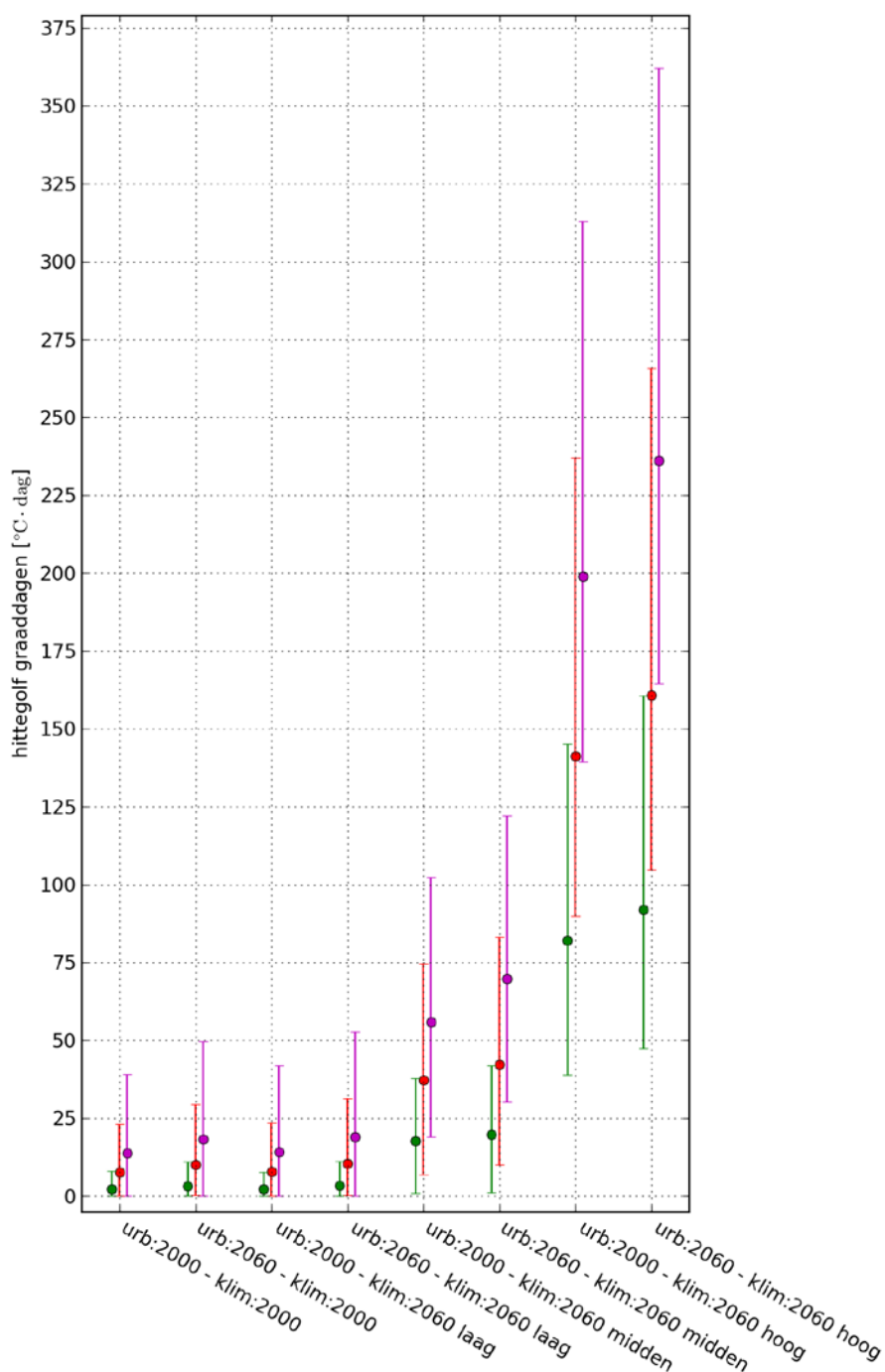
We bespreken de 'ruimtelijke' en 'klimatologische' stedelijke hitte-indicatoren (definities, zie paragraaf 3.2.3) voor Vlaanderen voor de verschillende scenario's voor klimaatverandering en stedelijke uitbreiding. In de 'klimatologische' indicator wordt onderscheid gemaakt tussen 'stedelijke', 'lichtstedelijke' en 'natuurlijke' gebieden. De 'stedelijke' gebieden betreffen locaties met een omgevende (huidige) versteningsgraad hoger of gelijk aan 50 % voor de omgevende 100 km² (centrum van Brussel en Antwerpen), de lichtstedelijke en randstedelijke gebieden deze tussen 25 % en 50 % (centrum van Gent, Brugge en Kortrijk, en rondom de stadscentra Antwerpen en Brussel), en de rurale gebieden deze onder de 25 % (overig Vlaams grondgebied).

Klimaatverandering

Het effect van klimaatverandering op het gemiddeld aantal hittegolf graaddagen per jaar is aanzienlijk voor het midden en het hoog klimaatscenario. Hierbij is de toename het meest uitgesproken voor de stedelijke gebieden met respectievelijke stijgingen van 14 naar 56 graaddagen (midden-klimaatscenario) en van 14 naar 198 graaddagen (hoog-scenario), en in mindere mate voor de lichtstedelijke gebieden van 8 naar 37 graaddagen (midden-klimaatscenario), en van 8 naar 141 graaddagen (hoog-klimaatscenario). Voor de rurale gebieden is er een toename van 2 naar 18 graaddagen voor het midden-klimaatscenario, en van 2 naar 82 voor het hoog-klimaatscenario, telkens kleiner. De toename in hittegolf graaddagen is overal verwaarloosbaar voor het laag-klimaatscenario. We merken op dat het gemiddeld aantal hittegolf graaddagen voor het toekomstig midden-klimaatscenario in respectievelijk de stedelijke, lichtstedelijke en rurale gebieden telkens

hoger ligt dan het aantal hittegolfgraaddagen voor de warmste zomers uit het recente verleden (cfr. 84^e percentielen: zomers 2003 en 2006).

Figuur 844: De 'klimatologische' stedelijke hitte-indicator: jaarlijks aantal hittegolf graaddagen gemiddeld voor de stedelijke gebieden (paarse symbolen), rand -of lichtstedelijke gebieden (rode symbolen), en rurale gebieden (groene symbolen) volgens modelgecorrigeerde klimaatsimulaties



De stedelijke gebieden betreffen locaties met een omgevende (huidige) versteningsgraad hoger of gelijk aan 50 % voor de omgevende 100 km² (centrum van Brussel en Antwerpen), de lichtstedelijke en randstedelijke gebieden deze tussen 25 % en 50 % (centrum van Gent, Brugge en Kortrijk, en rondom de stadscentra Antwerpen en Brussel), en de rurale gebieden deze onder de 25 % (overig Vlaams grondgebied). De bolletjes geven de gemiddelde waarden over de 10 jaren heen weer, terwijl de horizontale lijntjes overeenkomen met de 16^e en 84^e percentielen (voor een normaalverdeling komen deze waarden overeen met de gemiddelde waarde ± één standaarddeviatie) (Vlaanderen, 2000-2010 versus 2060-2070).

Bron: KU Leuven (2014)

Stadsuitbreiding

De stedelijke uitbreiding zorgt voor extra hittegolf graaddagen voor het retrospectief scenario (dit is ongeveer hetzelfde vertrekkende van het laag-scenario), en dit vooral in de stedelijke gebieden van 14 naar 18 graaddagen, en voor de lichtstedelijke gebieden van 8 naar 10 graaddagen. Voor de natuurlijke gebieden is de stijging van het gemiddeld aantal hittegolf graaddagen van 2 naar 3 kleiner. Overeenkomend met de resultaten uit paragraaf 3.4.2 is de bijkomende toename in stedelijke hittestress vanwege stadsuitbreiding dus vooral merkbaar in de stadscentra, ook al manifesteert de toename in verstening zich daarbuiten in randstedelijke gebieden en de aangrenzende natuurlijke gebieden. Dit wordt toegeschreven aan de toenemende ruimtelijke omvang van de hitte-eilanden rond de stadscentra. Hierbij wordt de aanvoerende lucht richting de stadscentra 's nachts meer voorverwarmd (of juist, minder afgekoeld) vanwege de toenemende warmteopslag in de stadsrand. Dat leidt uiteindelijk tot een grotere intensiteit van de hitte-eilanden ter hoogte van de stadscentra. Dat is terloops ook één van de belangrijkste redenen waarom de stedelijke hittestress van grotere steden beduidend groter is dan deze van de kleinere steden, zoals ook reeds aangehaald in paragraaf 3.4.1. Vertrekkende van het retrospectief scenario is de toename in hittegolf graaddagen vanwege de stedelijke uitbreiding over het algemeen kleiner dan deze vanwege de klimaatverandering voor het midden -en hoog-klimaatsscenario.

Combinatie klimaatverandering en stadsuitbreiding

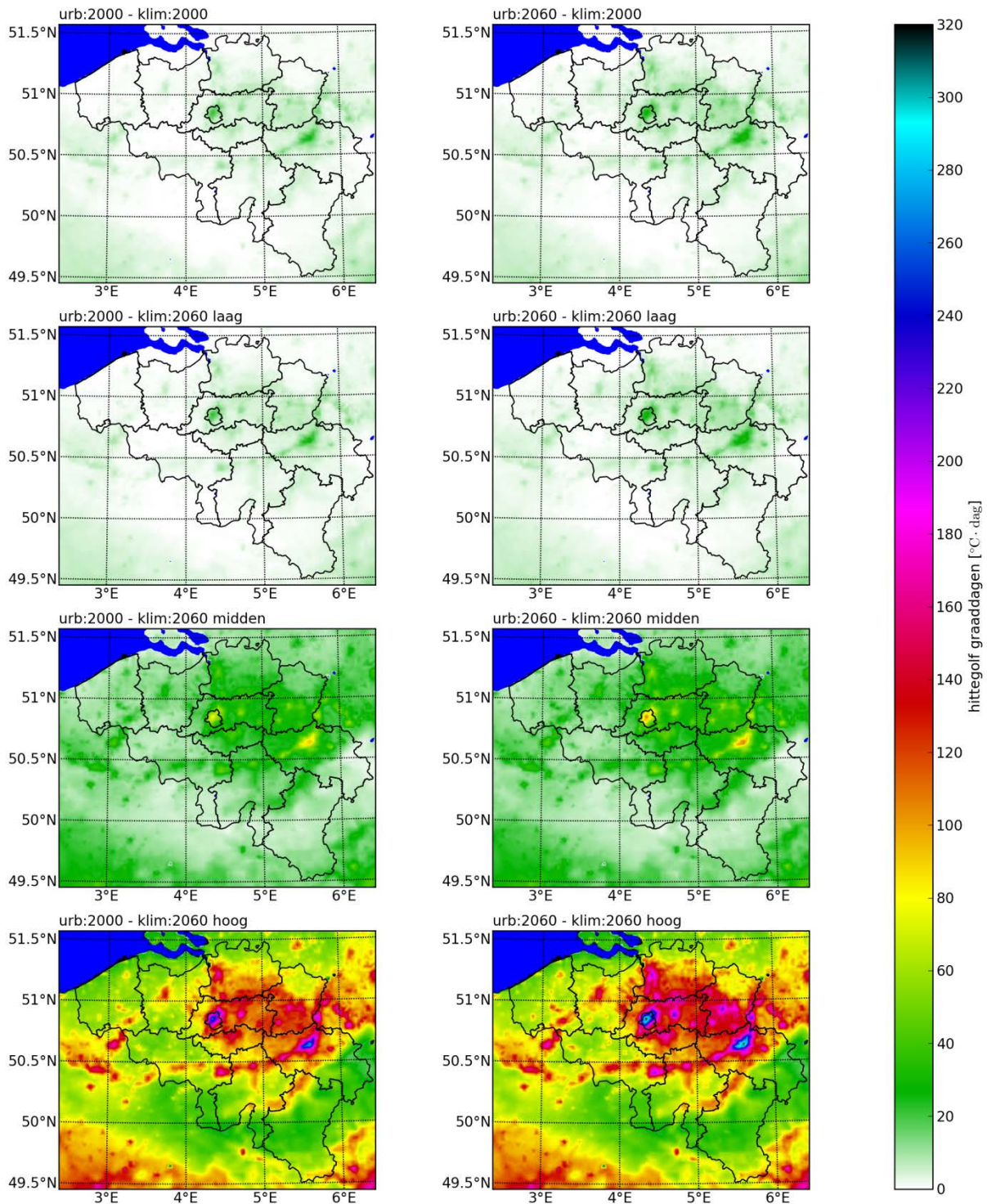
De graaaddagtoename vanwege stedelijke uitbreiding is groter vertrekkende van de midden en hoog klimaatscenario's dan vertrekkende van het retrospectief scenario (zie Figuur 85): voor het midden- (hoog-) scenario is er een stijging van 56 (199) naar 70 (236) graaddagen voor de stedelijke gebieden, van 37 (141) naar 42 (160) graaddagen voor lichtstedelijke gebieden, en van 18 (82) naar 20 (92) graaddagen voor natuurlijke gebieden. We zien dat elk van de hierboven besproken toenames in hittegolf graaddagen iets groter zijn voor de 84^e percentielen (dus voor de warme zomers tussen 2000 en 2010) dan voor de hierboven vermelde 10-jaarlijkse gemiddelde waarden. Tot slot merken we uit de 'ruimtelijke' indicator weergegeven in Figuur 84 dat steden dicht bij de kust (bv. Brugge, zie ook Figuur 81) over het algemeen minder onderhevig zijn aan (de toename in) hittestress dan de gelijkaardige steden landinwaarts (bv. Hasselt, zie ook Figuur 80). Zoals beschreven aan het einde van paragraaf 3.4.1 houdt dit resultaat verband met het afkoelend effect van de zee.

3.5 Conclusies

Uit de bovenstaande resultaten verwachten we dat de klimaatverandering het aantal hittegolf graaddagen voor heel Vlaanderen mogelijks fel de hoogte zal induwen. Hierbij zien we dat vanwege de reeds hogere temperaturen in steden de toename daar merkelijk groter is dan in de natuurlijke gebieden. Verder is er een niet-onbelangrijke bijkomende toename van hittegolf graaddagen vanwege de verwachte stedelijke uitbreiding. Deze extra toename in hittestress manifesteert zich uitdrukkelijk in de stadscentra, en dit vooral binnen de context van klimaatverandering. Toch zal deze toename hoogstwaarschijnlijk kleiner zijn dan deze bewerkstelligd door de klimaatverandering zelf. Deze laatste bevinding is echter sterk afhankelijk van welk toekomstig scenario voor de globale klimaatverandering men veronderstelt.

De stijgende stedelijke hittestress in de toekomst wordt vooral veroorzaakt door de opwarming van de aarde, en wordt versterkt door stedelijke expansie. Mede gezien de andere gevolgen van klimaatverandering wereldwijd (smelten van ijskappen, de stijgende zeespiegel, toename in overstromingen bij felle neerslag, orkanen enz.) moet Vlaanderen in een internationale context de uitstoot van broeikasgassen verminderen. Dit kan gebeuren via duurzame energieopwekking en het verkleinen van de energievraag via o.a. sensibilisering en energie-efficiëntere technologieën. Niet in het minst moet ingezet worden op geïntegreerde beleidsmaatregelen die tegelijk de CO₂-emissie en de stedelijke hitte-eilanden tijdens hittegolven verminderen: een energie-efficiënt transportbeleid in combinatie met een slimme ruimtelijke planning dringt zich op, waarbij stedelijke expansie omgebogen wordt tot een slimme inbreiding van steden. Groendaken, plantenbegroeiing, watervijvers en fonteinën moeten de stedelijke hitte verder inperken. Ook investering van gebouwisolatie speelt een belangrijke rol: het zorgt niet alleen voor een vermindering van CO₂-uitstoot tijdens de winter. Het vermijdt ook de bijkomende CO₂-uitstoot én stedelijke hitte-emissie vanwege airconditioning tijdens hittegolven.

Figuur 855: De 'ruimtelijke' stedelijke hitte-indicator voor Vlaanderen/België: de jaarlijkse hittegolf graaddagen voor stedelijke klimaatmodellering gemiddeld over 10 jaar



De linkse panelen geven de stedelijke klimaatsimulaties met stedelijk landgebruik voor 2000 (urb:2000) weer, terwijl de rechtse panelen deze met stedelijk landgebruik voor 2060 (urb:2060). De bovenste panelen komen overeen met de gecorrigeerde retrospectieve stedelijke klimaatsimulaties van 2000 tot 2010. Elk van panelen daaronder (klim:2060 laag, -midden en -hoog) verwijzen respectievelijk naar de resultaten waarbij men bovenop deze retrospectieve simulaties een temperatuursverhoging veronderstelt volgens het laag, midden, en hoog klimaatscenario uit het huidige VMM klimaatrapport (van Lipzig en Willems, 2015) (Vlaanderen, 2000-2010 versus 2060-2070).

Bron: KU Leuven (2014)

3.6 Slotopmerkingen

Klimaatscenario's

De bovenstaande resultaten vormen een eerste betrouwbare afschatting van het effect van de mondiale klimaatverandering en toekomstige verstedelijking voor 2060 op het stedelijk thermisch comfort tijdens de zomer. Toekomstige studies kunnen deze bevindingen verder verfijnen. Hierbij kan men bijvoorbeeld rekening houden met het feit dat de variaties in temperatuurminima en -maxima wijzigen in de toekomst: naast een stijging van de (maand)gemiddelde temperaturen is het mogelijk dat extreme hittegolven meer frequent voorkomen of nog extremer worden in de toekomst dan nu het geval is. Tot slot zou men ook kunnen rekeningen houden met het feit dat de magnitude van de stedelijke hitte-eilanden kan veranderen in de toekomst vanwege het veranderende klimaat (afgezien van het effect van de verandering in landgebruik). Over dat laatste heerst echter nog heel wat onduidelijkheid.

Interpretatie van de stedelijke hitte-indicatoren voor de toekomst

Er moet opgemerkt worden dat de hittestress indicator gebaseerd is op hoe hittegolven in onze contreien binnen ons huidige klimaat een impact hebben op het welbehagen en de gezondheid van de bevolking. Het is hoogstwaarschijnlijk dat hittegolven met de klimaatverandering anders zullen ervaren worden in de toekomst, gezien de bevolking zich mogelijks aan de hogere temperaturen deels zal aanpassen. Het aantal hittegolf graaddagen zal hierdoor mogelijks anders moeten berekend worden in de toekomst, bijvoorbeeld door hogere drempelwaarden in te stellen.

Conclusies

In het voorliggende rapport werd een beschrijving gegeven van de ontwikkeling en toepassing van een aantal kwantitatieve indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen. Deze indicatoren werden ontwikkeld op basis van verschillende bronnen van gegevens:

1. De in-situ indicator werd ontwikkeld op basis van metingen van de luchttemperatuur nabij de grond. De *Hittegolf Graaddagen*-indicator werd gedefinieerd als de cumulatieve overschrijding van dagelijkse temperatuurwaarden boven de drempels vastgelegd door de FOD Volksgezondheid in zijn hittegolfdefinitie. Momenteel zijn er enkel in Antwerpen metingen beschikbaar die de berekening van deze indicator toelaat, en dat vanaf 2012.
2. Een tweede indicator werd opgesteld, op basis van thermisch infraroodbeelden afkomstig van zon-synchrone satellietplatformen: de *Hot Island Area (Population)* geeft een beeld van de grootte van het gebied (aantal personen) dat blootgesteld wordt aan oppervlakte-temperaturen boven bepaalde limietwaarden.
3. Tot slot werd een indicator ontwikkeld op basis van output van het CCLM regionaal klimaatmodel. Vergelijkbaar in zijn berekening met de in-situ indicator (*Hittegolf Graaddagen*) werd deze indicator toegepast op de periode 2060-2070, rekening houdend met zowel de globale klimaatverandering als met de verwachte verder schrijdende verstedelijking in Vlaanderen.

De in-situ en model-gebaseerde indicatoren zijn in principe onderling uitwisselbaar, dankzij een procedure die werd op punt gesteld om de bias van de modeluitvoer zodanig te corrigeren dat consistentie met de geobserveerde waarden van de *Hittegolf Graaddagen* indicator automatisch resulteerde. De satelliet-gebaseerde indicator daarentegen is niet direct vergelijkbaar met de andere indicatoren, omdat de eerstgenoemde afhangt van de oppervlakte (stralings-) temperatuur, terwijl de twee andere bepaald worden door de luchttemperatuur nabij de grond.

Elk van deze indicatoren heeft zijn voor- en nadelen. De in-situ indicator is de meest nauwkeurige, omdat hij gebaseerd is op een directe meting van luchttemperatuur. Deze indicator heeft echter het nadeel dat hij (momenteel) slechts voor één stad (Antwerpen) kan berekend worden, en dan nog voor een beperkte periode (vanaf het jaar 2012). De model-gebaseerde indicator heeft geen last van deze beperkingen, maar is dan weer minder accuraat, onder andere wegens de gebruikte ruimtelijke resolutie van 2,8 km (opgelegd vanwege het rekenintensieve karakter van het regionaal klimaatmodel), die in het bijzonder voor kleinere steden aan de lage kant is. Modellen hebben ook het voordeel toekomstscenario's te kunnen doorrekenen. De indicator gebaseerd op informatie uit satellietbeelden is dan weer redelijk complementair met de andere indicatoren: hij is net als het model gebiedsdekkend, heeft zelfs een lichtjes betere resolutie (1 km), en is ook gebaseerd op een gemeten eerder dan een gemodelleerde grootheid; maar is daardoor ook enkel voor retrospectieve periodes beschikbaar.

De bedoeling is om deze indicatoren in de toekomst regelmatig opnieuw door te rekenen, met name om tendensen te kunnen vaststellen. Op basis van de momenteel beschikbare informatie kan in ieder geval reeds het volgende gesteld worden:

- De blootstelling aan hittestress, hetzij via de luchttemperatuur hetzij via de stralingstemperatuur, is beduidend hoger in steden dan in de nabije landelijke gebieden.
- De hittestress zoals uitgedrukt in de *Hittegolf Graaddagen* wordt verwacht te stijgen, door de globale klimaatverandering evenals door de toenemende verstedelijking in Vlaanderen, met ongeveer een factor tien.

Referenties

- Acosta-Michlik, L., B. Henry de Frahan, H. Brunke, K. Hansen, G. Engelen, I. Uljee, A. Van Herzele, M. Rounsevell, R. White, 2011. A Multiscalar and Multiagent Modelling Framework for Assessing Sustainable Futures in a Globalised Environment (MULTIMODE). Final Report. Brussels: Belgian Science Policy 2011 – 79 p. (Research Programme Science for a Sustainable Development).
- Aertsens, J., L. De Nocker, H. Lauwers, K. Norga, I. Simoens, L. Meiresonne, F. Turkelboom, S. Broekx, 2012. Daarom groen! Waarom u wint bij groen in uw stad of gemeente. Studie uitgevoerd in opdracht van ANB – Afdeling Natuur en Bos, 144 pp.
- Ashley, S.T., and W.S. Ashley, 2008. Flood fatalities in the United States. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 47, 805–818.
- Barsi J a., Barker JL, Schott JR. An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a single thermal band earth-sensing instrument. IGARSS 2003 2003 IEEE Int Geosci Remote Sens Symp Proc (IEEE Cat No03CH37477) [Internet]. Ieee; 2003;00(C):3014–6. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1294665>.
- Barsi J a. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. *Proc SPIE* [Internet]. Spie; 2005 [cited 2011 Apr 21];5882:5882E–5882E–7. Available from: <http://link.aip.org/link/?PSI/5882/5882E/1&Agg=doi>.
- Beven J.L., L.A. Avila, E.S. Blake, D.P. Brown, J.L. Franklin, R.D. Knabb, R.J. Pasch, J.R. Rhome, and S.R. Stewart, 2008. Atlantic Hurricane Season of 2005. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 1109–1173.
- Brisson, E., Demuzere, M., van Lipzig, N.P.M., 2014a. A study on modelling strategies for performing convective permitting climate simulations using the COSMO-CLM over a mid-latitude coastal region. Minor review in *Meteorologische Zeitschrift*.
- Brisson, E., S. Saeed., M. Demuzere, N. P. M. van Lipzig, 2014b. How well can a convection permitting model reproduce decadal statistics of precipitation, temperature and cloud characteristics? (in voorbereiding).
- Coll C, Valor E, Galve JM, Mira M, Bisquert M, García-Santos V, et al. Long-term accuracy assessment of land surface temperatures derived from the Advanced Along-Track Scanning Radiometer. *Remote Sens Environ* [Internet]. Elsevier Inc.; 2012 Jan [cited 2012 Nov 6];116:211–25. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425711002227>.
- Conlon K.C., N.B. Rajkovich, J.L. White-Newsome, L. Larsen, and M.S.O. Neill, 2012. Preventing cold-related morbidity and mortality in a changing climate. *Maturitas*, 69, 197–202.
- Coskun C., 2010. A novel approach to degree-hour calculation: Indoor and outdoor reference temperature based degree-hour calculation. *Energy*, 35, 2455-2460.
- Couder, J., & A Verbruggen, 2008. Uitbreiding van de tool SAVER-LEAP voor scenario-analyses voor de huishoudens. Onderzoeksrapport MIRA/2008/01, 247 pp.
- Coutts, A.M., N.J. Tapper, J. Beringer, M. Loughnan, and M. Demuzere, 2012. Watering our cities: The capacity for Water Sensitive Urban Design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context. *Progress in Physical Geography*, 37, 2-28.
- Davies, F., D. R. Middleton, and K. E. Bozier, 2007. Urban air pollution and measurements of boundary layer height. *Atmos. Environ.*, 41, 4040 - 4049.
- De Ridder, K., D. Lauwaet, and B. Maiheu, 2014. UrbClim – a fast urban boundary layer climate model. Submitted to *Urban Climate*.
- De Ridder K, Bertrand C, Casanova G, Lefebvre W. Exploring a new method for the retrieval of urban thermophysical properties using thermal infrared remote sensing and deterministic modeling. *J Geophys Res* [Internet]. 2012 Sep 6 [cited 2012 Sep 13];117(D17):1–14. Available from: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2012/2011JD017194.shtml>.
- Diffenbaugh, N.S., and F. Giorgi, 2012. Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. *Climatic Change*, 114, 813–822.
- Dousset, B. Avhrr-derived Cloudiness And Surface Temperature Patterns Over The Los Angeles Area And Their Relationships To Land Use. 12th Can Symp Remote Sens Geosci Remote Sens Symp [Internet]. IEEE; 1989 [cited 2014 Oct 21]. p. 2132–7. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=577798>.
- Dousset, B., Gourmelon, F., Laaidi, K., Zeghnoun, A., Giraudet, E., Bretin, P., Mauri, E. and Vandentorren, S., 2011. Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area. *International Journal of Climatology*, 31, 313–323.

- Engelen G., Poelmans L, Uljee I, de Kok J.L & Van Esch L. De Vlaamse Ruimte in 4 Wereldbeelden. Studie uitgevoerd in opdracht van: Steunpunt Ruimte en Wonen. VITO Rapport 2011/RMA/R/363. December 2011a.
- Engelen, G., Van Esch L., Uljee, I., De Kok, J-L., Poelmans L., Gobin, A., & van der Kwast, H., 2011b, 'RuimteModel: Ruimtelijk-Dynamisch landgebruikmodel voor Vlaanderen' Eindrapport december 2011b, 256 p.
- Erell, E., V. Leal, and E. Maldonado, 2005. Measurement of air temperature in the presence of a large radiant flux: an assessment of passively ventilated thermometer screens. *Boundary-Layer Meteorology*, 114, 205-231.
- Ferrero JS, Montero E, Tamame M, Palacios M, Keramitsoglou I. TIR Element Study Report. 2011 p. 1–111.
- Flanner, M. G. (2009) Integrating anthropogenic heat flux with global climate models, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L02801, doi:10.1029/2008GL036465.
- Fouillet, A., G. Rey, V. Wagner, K. Laaidi, P. Empereur-Bissonnet, A. Le Tertre, P. Frayssinet, P. Bessemoulin, F. Laurent, P. De Crouy-Chanel, E. Jouglu, and D. Hémon, 2008. Has the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave of summer 2003? A study of the 2006 heat wave. *International Journal of Epidemiology*, 37, 309-317.
- Gabriel K.M.A., and W.R. Endlicher, 2011. Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Env. Poll.*, 159, 2044-2050.
- Garrat, J.R., 1992. *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge University Press.
- Grasselt, R., 2008. Validation of TERRA-ML with discharge measurements. *Meteorologische Zeitschrift* 17 (6), 763–773.
- Gillespie AR, Rokugawa S, Hook SJ, Matsunaga T, Kahle AB. Temperature / Emissivity Separation Algorithm Theoretical Basis Document , Version 2 . 4. Jet Propuls. 1999 p. 1–64.
- Grize, L., Huss, A., Thommen, O., Schindler, C. and Braun-Fahrländer, C., 2005. Heat wave 2003 and mortality in Switzerland. *Swiss Medical Weekly*, 135, 200–205.
- Guhathakurta, S., and P. Gober, 2007. The impact of the phoenix urban heat island on residential water use. *Journal of the American Planning Association*, 73, 317-329.
- Harrison RG. 2010. Natural ventilation effects on temperatures within Stevenson screens. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 136, 253–259.
- Hinkel, K.M., F.E. Nelson, A.E. Klene, and J.H. Bell, 2003. The urban heat island in winter at Barrow, Alaska. *Int. J. Climatol.* 23, 1889–1905.
- Holderness T, Barr S, Dawson R, Hall J. An evaluation of thermal Earth observation for characterizing urban heatwave event dynamics using the urban heat island intensity metric. *Int J Remote Sens* [Internet]. 2013 Feb 10 [cited 2013 Jun 26];34(3):864–84. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2012.714505>.
- IPCC, 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
- Jimenez-Munoz JC, Cristobal J, Sobrino J a., Soria G, Ninyerola M, Pons X. Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* [Internet]. 2009 Jan;47(1):339–49. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4689350>.
- Jin M, Treadon RE. Correcting the orbit drift effect on AVHRR land surface skin temperature measurements. *Int J Remote Sens* [Internet]. 2003 Jan [cited 2014 May 16];24(22):4543–58. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0143116031000095943>.
- Julien Y, Sobrino JA, Nerry F. Correcting NOAA-AVHRR Orbital Drift: a Simple and Automatic Methodology. 2007 *Int Work Anal Multi-temporal Remote Sens Images* [Internet]. IEEE; 2007 [cited 2014 May 16]. p. 1–6. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4293072>.
- Kawai Y, Wada A. Diurnal Sea Surface Temperature Variation and Its Im- pact on the Atmosphere and Ocean : A Review. *J Ocean*. 2007;63:721–44.
- Keramitsoglou I, Kiranoudis CT, Ceriola G, Weng Q, Rajasekar U. Identification and analysis of urban surface temperature patterns in Greater Athens, Greece, using MODIS imagery. *Remote Sens Environ* [Internet]. Elsevier Inc.; 2011 Dec [cited 2012 Nov 15];115(12):3080–90. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S00344257111002380>.
- Kovats, R. S. & Hajat, Shakoob, 2008. Heat stress and public health: A critical review. *Annual Review of Public Health*, 29, 41–55.

- Lagouarde J, Moreau P, Irvine M, Bonnefond J-M, Voogt JA, Sollicec F. Airborne experimental measurements of the angular variations in surface temperature over urban areas: case study of Marseille (France). *Remote Sens Environ* [Internet]. 2004 Dec [cited 2011 Mar 26];93(4):443–62. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425704000033>.
- Lauwaet D., K. De Ridder, S. Saeed, E. Brisson, N.P.M. van Lipzig, B. Maiheu, H. Hooyberghs, G. Driesen, & S. Van Looy, 2014. Assessing the current and future urban heat island of Brussels. In preparation.
- Lauwaet D., Maiheu B., Aertsens J & De Ridder K. Opmaak van een hittekaart en analyse van het stedelijk hitte-eiland effect voor Antwerpen. 2013. Studie uitgevoerd voor Stad Antwerpen. VITO Rapport 2013/RMA/R/352
- Lauwaet, D., B. Maiheu, J. Aertssens, & K. De Ridder, 2013. Opmaak van een hittekaart en analyse van het stedelijk hitte-eiland effect voor Antwerpen. Eindrapport van een studie uitgevoerd in opdracht van Stad Antwerpen, 2013/RMA/R/352, 234 pp.
- Lee, K., H. Baek, & C. Cho, 2014. The estimation of base temperature for heating and cooling degree-days for South Korea. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 53, 300-309.
- Li, D., & E. Bou-Zeid, 2013. Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves: The impact in cities is larger than the sum of its parts. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 52, 2051–2064.
- Lu D, Weng Q. Spectral mixture analysis of ASTER images for examining the relationship between urban thermal features and biophysical descriptors in Indianapolis, Indiana, USA. *Remote Sens Environ* [Internet]. 2006 Sep [cited 2014 May 16];104(2):157–67. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425706001805>.
- Luber, G., and M. McGeehin, 2008. Climate change and extreme heat events. *American Journal of Preventive Medicine*, 35, 429–435.
- Maiheu B., Van den Berghe K, Boelens L., De Ridder K. & Lauwaet D. Opmaak van een hittekaart en analyse van het stedelijk hitte-eiland effect voor Gent. 2013. Studie uitgevoerd voor Stad Gent. VITO Rapport 2013/RMA/R/113.
- Meehl, G.A., & C. Tebaldi, 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305, 994–997.
- Mills, G., 2004. Beschikbaar via www.urban-climate.org/documents/UHI_Canopy.pdf.
- Nakamura, R., & L. Mahrt, 2005. Air temperature measurement errors in naturally ventilated radiation shields. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22, 1046-1058.
- Oke, T.R., 2006. Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites. World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods, IOM Report No. 81, WMO/TD-No. 1250.
- Oltra-Carrió R, Sobrino J a., Franch B, Nerry F. Land surface emissivity retrieval from airborne sensor over urban areas. *Remote Sens Environ* [Internet]. Elsevier Inc.; 2012 Aug [cited 2012 Oct 12];123:298–305. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425712001265>.
- Parlow, E. (1999). Remotely-sensed heat fluxes of urban areas. In de Dear, et al. (Eds.), *Biometeorology and urban climatology at the turn of the millennium*. WMO Tech. Doc., vol. 1026 (pp. 523–528). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- Patz, J.A., H. Frumkin, T. Holloway, D.J. Vimont, A. Haines, 2014. Climate change challenges and opportunities for global health. *Journal of the American Medical Association*, doi:10.1001/jama.2014.13186.
- Richardson, S.J., F.V. Brock, S.R. Semmer, & C. Jirak, 1999. Minimizing errors associated with multiplate radiation shields. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16, 1862-1872.
- Robine J.-M., S.L.K. Cheung, S. Le Roy, H. Van Oyen, C. Griffiths, J.-P. Michel, F.R. Herrmann, 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies*, 331, 171–178.
- Rockel, B., A. Will, A. Hense, 2008. The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift* 17 (4), 347–348.
- Sarrat, C., A. Lemonsu, V. Masson, & D. Guedalia, 2006. Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. *Atmos. Environ*, 40, 1743-1758.
- Schär, C., P.L. Vidale, D. Luthi, C. Frei, C. Haberli, M.A. Liniger, and C. Appenzeller, 2004. The role of increasing temperature variability in European Summer heat waves. *Nature*, 427, 332-336.
- Schwarz N, Lautenbach S, Seppelt R. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures. *Remote Sens Environ* [Internet]. 2011 Dec [cited 2014 May 16];115(12):3175–86. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425711002471>
- Short, C.A., M.J. Cook, & A. Woods, 2009. Low energy ventilation and cooling within an urban heat island. *Renewable Energy*, 34, 2022-2029.

- Sobrino JA, Julien Y, Atitar M, Nerry F. NOAA-AVHRR Orbital Drift Correction From Solar Zenithal Angle Data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens.* 2008;46(12).
- Steenekveld, G.J., Koopmans, S., Heusinkveld, B.G., van Hove, L.W.A., Holtslag, A.A.M., 2011. Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands. *Journal of Geophysical Research*, 116, 1-14.
- Streutker D. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sens Environ* [Internet]. 2003 May 30 [cited 2014 May 9];85(3):282–9. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425703000075>.
- Streutker DR. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. *Int J Remote Sens* [Internet]. 2002 Jan;23(13):2595–608. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160110115023>.
- Tarara, J.M., & G.-A. Hoheisel, 2007. Low-cost shielding to minimize radiation errors of temperature sensors in the field. *HortScience*, 42, 1372-1379.
- US-EPA. Reducing Urban Heat Islands : Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics [Internet]. 2013. Available from: <http://www.epa.gov/heatisld/resources/pdf/BasicsCompendium.pdf>.
- van Lipzig, N. P. M. & P. Willems, 2015. Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, KU Leuven i.s.m. KMI. Studie komt medio 2015 beschikbaar via www.milieuraapport.be.
- van Ypersele, J.-P., & Ph. Marbaix, 2004. Impact van de klimaatverandering in België. Greenpeace, Brussel, 2004, 44p.
- Voogt JA, Oke TR. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens Environ* [Internet]. 2003 Aug [cited 2010 Aug 12];86(3):370–84. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425703000798>.
- Wilby, R.L., 2007. A review of climate change impacts on the built environment. *Built Environment*, 33, 31-45.
- WMO, 2011. Meteorology and the energy sector - a WMO perspective. *WMO Bulletin*, 60, 73-79. Aminou DMA, Jacquet B, Pasternak F. Characteristics of the Meteosat Second Generation (MSG) radiometer/imager: SEVIRI. In: Desachy J, Schreiber U, Haigh JD, Fujisada H, Cecchi G, Kohnle A, et al., editors. 1997 [cited 2012 Dec 4]. p. 19–31. Available from: <http://spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.298084>.
- Wouters, H., De Ridder, K., Demuzere, M., Lauwaet, D., & van Lipzig, N. P. M., 2013. The diurnal evolution of the urban heat island of Paris: a model-based case study during Summer 2006. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 8525–8541, doi:10.5194/acp-13-8525-2013.
- Wouters, H., M. Demuzere, K. De Ridder, N. P. M. van Lipzig, 2015a. The impact of impervious water-storage parametrization on urban-climate modelling. *Urban Climate* 11 (1), 24–50, doi:10.1016/j.uclim.2014.11.005.
- Wouters, H., M. Demuzere, K. De Ridder, U. Blahak, N. P. M. van Lipzig, 2015b. Modelling the seasonal dependency of the contributions to urban heat islands in Belgium (insturing voorzien begin 2015).
- Zhang J, Wang Y. Study of the Relationships between the Spatial Extent of Surface Urban Heat Islands and Urban Characteristic Factors Based on Landsat ETM+ Data. *Sensors* [Internet]. 2008 Nov 20 [cited 2014 May 16];8(11):7453–68. Available from: <http://www.mdpi.com/1424-8220/8/11/7453>.

ANNEX 1 OVERZICHT BESTAANDE IN-SITU METEOROLOGISCHE METINGEN

data	beschrijving
<u>KMI – synoptisch netwerk</u> Luis Gonzalez Sotelino luis.gonzalez@meteo.be	- 30-tal stations verspreid over België - uurlijkse waarden van T, Td, ff, dd ... (*) - beschikbaar tegen betaling
<u>KMI – klimatologisch netwerk</u> Christian Tricot ctricot@meteo.be	- 270 stations verspreid over België - dagelijkse waarden van TN, TX, neerslag, ... - beschikbaar tegen betaling
<u>Belgocontrol</u> Wim Demol wim_demol@belgocontrol.be	- 5 stations op Belgische luchthavens - uurlijkse waarden van T, Td, ff, dd ... - beschikbaar tegen betaling
<u>Meteo Wing</u> Alain Sneessens alain.sneessens@mil.be	- 5-tal stations op voornamelijk industriële locaties - 10-min waarden van T, RH, ff, dd ... - beschikbaar
<u>VMM – meetnetwerk Lucht</u> Daniël Tielemans d.tielemans@vmm.be	- 5-tal stations op voornamelijk industriële locaties - 10-min waarden van T, RH, ff, dd ... - beschikbaar
<u>VMM – meetnetwerk Water</u> Willem Defloor w.defloor@vmm.be	- 8 stations in rivierbekkens - 10-minuuts waarden van T, RH, ff, dd ... - beschikbaar
<u>IBGE-BIM</u> Olivier Brasseur obrasseur@environnement.irisnet.be	- 3 meteorologische stations in Brussels Gewest - 10-minuutswaarden van T, ff, dd, straling - beschikbaar op vraag (onderzoek)
<u>FANC Telerad netwerk</u> François Menneson francois.menneson@fanc.fgov.be	- 13 meteorologische masten bij nucleaire installaties - 10-minuutswaarden van T, ff, dd, straling - vrij beschikbaar
<u>VITO permanente stations</u> Bino Maiheu bino.maiheu@vito.be	- stations in Antwerpen en Vremde (juli 2012-heden) - 15-minuutswaarden van T, RH, ff, dd, straling - vrij beschikbaar voor dit project

(*) T = temperatuur, RH = relatieve vochtigheid, ff = windsnelheid, dd = windrichting, TN = dagelijkse minimumtemperatuur, TX = dagelijkse maximumtemperatuur

ANNEX 2 KOST VAN SYNOPTISCHE DATA (KMI, BELGOCONTROL)

(overgenomen uit een e-mail van Wim Demol, Belgocontrol, 4 december 2013)

De prijzen zijn gebaseerd op de KMI-tarieven, en bestaan uit drie delen:

- een forfaitaire kost van 50 euro per aanvraag;
- een uurkost (62 euro per uur met een minimum van 31 euro);
- de prijs voor de gegevens zelf.

Het basistarief voor waarnemingen bedraagt

- 0,03 euro voor een elementaire waarneming (een waarde voor één parameter);
- 0,08 euro per afgeleid gegeven (daggemiddelde van een temperatuur ...);
- 0,06 euro per synop.

Indien slechts een deel van een synop wordt gevraagd, dan wordt per element 20 % van de prijs voor een volledige synop gevraagd, met een minimum van 40 % en met een maximum van 120 % van de prijs voor een complete synop.

Er zijn reducties van de kost voor grote hoeveelheden, als volgt:

- voor de eerste 10 000 gegevens wordt de volle prijs aangerekend;
- voor de volgende 90 000 gegevens wordt 75 % van de prijs aangerekend;
- de volgende 900 000 gegevens aan 50 % van de prijs;
- vanaf 1 miljoen gegevens: 35 % van de prijs.

Verder is er een reductie voor wetenschappelijk onderzoek of onderzoek nuttig voor de gemeenschap van 40 % (dus 60 % van basistarief te betalen).

De benodigde tijd voor aanvragen van Synop-gegevens is gering; normaal blijft de uurkost hier beperkt tot 31 euro, onafhankelijk van het aantal opgevraagde jaren.

Voorbeelden:

- Eén station, één jaar, één element uit de Synop (bijv. temperatuur): prijs = (50 (forfait) + 31 (uurkost) + 8 760 × 0,015 (datakost)) × 0,60 (reductie wetenschappelijk onderzoek) = 127,44 euro.
- Eén station, één jaar, vier elementen uit de Synop (windsnelheid, windrichting, temperatuur & dauwpunt (hieruit kan je zelf de relatieve vochtigheid berekenen)): prijs = (50 + 31 + 8 760 × 4 × 0,015) × 0,60 = 363,94 euro.

ANNEX 3 KOST VAN KLIMATOLOGISCHE DATA (KMI)

(uit e-mail van Christian Tricot, KMI, 14 januari 2014)

Voor wat betreft de dagelijkse waarden, tot 3 650 gegevens bedraagt de prijs 22 euro (prijzen BTW inbegrepen). Bij een bestelling van bv dagelijkse min en max temperatuur (TN respectievelijk TX) voor 5 stations voor een gans jaar komt men aan dit bedrag van 22 euro.

Bij een grotere hoeveelheid aan bestelde data verandert het tarief, met en aandeel prijs van de data zelf, en daarboven een dossierkost (normaalgezien 81 euro excl. BTW). De kost voor één gegeven bedraagt 0,03 euro (excl. BTW).

Voorbeeld:

Beschouw opnieuw de parameters TX en TN, dagelijkse frequentie, voor een gans jaar en voor 10 stations. Het gaat dan om $20 \times 365 = 7\ 300$ gegevens, dus een kost van 219 euro, met 40 % reductie nog 131,4 euro. Totale kost: $81 + 131,4 = 212,4$ euro, incl. BTW komt dit op 257 euro.

ANNEX 4 LOCATIES FIDAS-MONITOREN VMM

station	(deel)gemeente	straat	Lambert X (m)	Lambert Y (m)	opmerking
40AB01	Antwerpen	Boudewijnsluis	147285	219010	industrie/water
40AB02	Berendrecht	Antwerpse baan	146730	225666	rand van het dorp, op weide, gebouwen, wegen op enkele tientallen m, vlak naast bomenrij, op 800 m van de haven => niet ideaal maar wel te overwegen
40AL01	Antwerpen-Linkeroever	Scheldedijk	150865	214046	vlakbij de Schelde
40GK06	Diepenbeek	Zinniastraat	227468	180302	in woonwijk
40HB23	Hoboken	Curiestraat	148054	206698	tussen woonwijk & industriegebied
40MN01	Menen	Wervikstraat	61231	165539	industrie
40OB01	Oostrozebeke	Hulstestraat	75368	179068	industrie & bebouwing
40OB02	Wielsbeke	Den Meynaert	80203	178758	dorpsrand, woningen vlakbij
40RL01	Roeselare	Brugsesteenweg	62335	183302	in de stad (binnen de ring) vlakbij industriegebied - mogelijk stedelijk station doch ook niet echt centraal genoeg
40SA04	Hoevenen	Abelenlaan	152449	222679	in woonwijk
40SZ01	Zaventem	Domein Luchthaven	159520	178258	luchthaven
40SZ02	Steenokkerzeel	Keizerinlaan	160087	178087	woonwijk naast luchthaven
42M802	Antwerpen-Luchtbal	Havanastraat	153884	216790	woonwijk
42N016	Dessel	Nieuwendijk - Sluis 4	205542	214045	vlakbij grote watermassa's
42N035	Aarschot	Tieltsebaan	182928	185363	landelijk, maar toch dichtbij bebouwing
42N045	Hasselt	Boksbeemdenstraat	220258	181520	industrie/water, rand van Hasselt
42N054	Walshoutem	Walhostraat	201869	155940	dichtbij E40 maar verder wel ruraal (Google Earth toont weliswaar vlakbij velden waar geroid is - dus geen grasveld) - op 12 km van St Truiden
42R020	Vilvoorde	Mechelsesteenweg	154777	181235	bij woonwijk / begraafplaats (?)
42R801	Borgerhout	Plantin en Moretuslei	154407	211080	stedelijk - zeker bruikbaar
42R802	Borgerhout	Plantin en Moretuslei - straatkant	154396	211055	id.
42R811	Schoten	Lodewijk Weijtenstraat	158560	215807	woonwijk
42R815	Zwijndrecht	Laarstraat	147489	211634	industrie/bebouwing
42R831	Berendrecht	Hoefbladstraat	147976	226558	wei naast woonwijk, op 1 km van de haven
42R834	Boom	Schorrestraat	150795	197988	wei tussen woonwijk en watermassa in
42R841	Mechelen	Technologielaan	157059	188039	Technopolis gebouw, industrie, woonwijk
44M705	Roeselare	Graankaai	64521	182374	industrie/kanaal
44N012	Moerkerke	Damweg	79753	216550	landelijk, maar geen gras (eerder gewassen)
44N029	Houtem	Westmoerstraat	24655	191071	id. (maar dan in de buurt van Veurne)
44N052	Zwevegem	Hinnestraat	76269	167678	woonwijk, nabij Kortrijk
44R701	Gent	Baudelostraat	105169	194435	stedelijk station - wel na te gaan in hoeverre het Baudeloopark een invloed heeft (afhankelijk v/d precieze locatie van het station)
44R702	Gent	Gustaaf Callierlaan	105550	192469	id. maar minder centraal gelegen
44R710	Destelbergen	Admiraaldreef	108394	194736	woonwijk bij Gent
44R731	Evergem	Doornzelestraat	105947	201811	gemengd landelijk - woonwijk - industrie
44R740	Sint-Kruis-Winkel	Schuitstraat	110815	204603	landelijk - woonwijk op 300 m, haven/industrie op +/- 1 km
44R750	Zelzate	Burgemeester Chalmetlaan	111845	209705	woonwijk

Bron: email Dienst Lucht VMM (Leen Verlinden) 25 november 2014

ANNEX 5 CORRECTIES VOOR TEMPERATUREN BIJ STEDELIJKE KLIMAATMODELLERING

Zoals besproken in paragraaf 3.3.1 worden de zomerse temperaturen overschat door het stedelijke klimaatmodel, maar wordt de dagelijkse gang (ie., het verschil in minimum en maximum dagtemperaturen) voor zowel de stad als platteland goed gemodelleerd. Het is daarom voldoende om op basis van dagwaarden voor temperatuur (t.t.z dagminimum, daggemiddelde of dagmaximum) een correctie door te voeren, die dus beschikbaar zijn in E-OBS.

Voor een bepaalde gridcell van het horizontale 2,8 km SKM grid met positie (i,j) wordt voor een bepaald tijdstip 't' de gecombineerde twee-meter temperatuur berekend als volgt:

$$T_{i,j}^{\text{CORR}}(t) = T_{i,j}^{\text{SKM}}(t) + [T_d^{\text{EOBS}}(t) * G]_{i,j} - [T_d^{\text{SKM}}(t) * G]_{i,j}$$

Hierbij verwijst $T_d(t)$ naar de glijdende dagwaarden in de tijd voor de temperatuur, t.t.z deze voor tussen $t - 12u$ en $t + 12u$. Hierbij kan opgemerkt worden dat $T_d^{\text{EOBS}}(t) * G$ verwijst naar de grootschalige horizontale temperatuurfluctuatie van E-OBS, en $T_d^{\text{SKM}}(t) * G$ deze voor de SKM. Hierbij verwijst '*' naar een glijdend gemiddelde van de temperatuur in de ruimte over het oppervlak, t.t.z. een convolutie in de ruimte tussen het temperatuurveld op tijdstip (t) en een tweedimensionale gaussiaanse functie 'G' met een standaard deviatie van 12,5 km overeenkomend met de schaal van E-OBS van 25 km. De bovenstaande formule gaat met andere woorden voor elke 2,8 km gridcel op locatie (i,j) een correctie uitvoeren op SKM door de grootschalige temperatuur vanuit E-OBS op te tellen, en hiervan de grootschalige temperatuur van SKM af te trekken. Als dagwaarde nemen we het dagminimum (dus voor de nacht) omdat op dat moment mogelijke fouten vanwege zonne-instraling bij passief-geventileerde meetposten in de onderliggende dataset van E-OBS wordt gemeden.

De vergelijking hierboven kunnen we perfect toepassen voor natuurlijke gebieden die in E-OBS vervatten zitten, want zoals reeds vermeld in paragraaf 3.3.2 weten we dat stedelijke microklimaten zoals stedelijke hitte-eilanden worden gemeden in E-OBS. Hierbij is het echter van belang dat we de correctie doorvoeren alleen op basis van temperaturen in natuurlijke (landelijke) gebieden, en niet deze voor steden of zee. Hierbij gaan we dus de zee en stedelijke gebieden gaan maskeren om de grootschalige correctie door te voeren. We verkrijgen de volgende aangepaste correctie:

$$T_{i,j}^{\text{CORR}}(t) = T_{i,j}^{\text{SKM}}(t) + \frac{[T_{d,(nat)}^{\text{EOBS}}(t) * G]_{i,j}}{[\mathbf{1}_{(nat)} * G]_{i,j}} - \frac{[T_{d,(nat)}^{\text{SKM}}(t) * G]_{i,j}}{[\mathbf{1}_{(nat)} * G]_{i,j}}$$

waarbij (nat) verwijst naar het feit dat de gridcel-waarde met 0 wordt vervangen voor niet-natuurlijke of niet-landelijke gebieden, t.t.z steden of zee. Hierbij wordt voor deze maskering een gridcel als 'natuurlijk' (dus vrij van verstelijking) beschouwd indien de versteningsgraad voor een omliggend gebied van 100 km² kleiner is dan 15 %. Voorts stelt ' $\mathbf{1}$ ' de één-matrix (ie., matrix met overal 1) voor over het horizontaal SKM grid. De termen in de noemers van de groteschaalvelden voor temperatuur voor E-OBS en SKM staan in voor de normalisatie (cfr. 0-waarden m.b.t. (nat)).

Merk op dat de bovenstaande correctie aanvankelijk wordt doorgevoerd voor zowel natuurlijke als stedelijke gebieden. Door dit te doen nemen we dus aan dat de temperatuuroverschating in SKM voor stedelijke gebieden dezelfde is als de temperatuuroverschating in de omliggende natuurlijke gebieden. Dit zal inderdaad het geval zijn indien stedelijke hitte-eilanden (en zijn variatie met de tijd) goed worden gerepresenteerd door SKM. We zien echter dat het model het stedelijk hitte-eiland voor Antwerpen met ongeveer 25 % onderschat (zoals ook besproken in paragraaf 3.3.1 en 3.3.2), wat impliceert dat de overschatting in stedelijke gebieden dus iets kleiner is. Dat laatste houdt verband met het feit dat de atmosferische grenslaag voor stedelijke gebieden anders is dan natuurlijke gebieden, vooral wanneer het stedelijke hitte-eilanden het meest uitgesproken zijn tijdens hittegolven. Hierdoor is de uiteindelijke modelfout in de twee-meter temperatuur dus verschillend voor steden en platteland. Om te verhelpen aan de onderschatting in de stedelijke hitte-eilanden zullen we voor de dagwaarden (ter berekening van de stedelijke hitte-stressindicatoren) een verschillende correctie

doorvoeren voor de natuurlijke fractie 'n' en de stedelijke fractie 'u' binnen elk van de 2,8 km gridcellen met respectievelijk:

$$T_{d;i,j}^{n,CORR}(t) = T_{d;i,j}^{n,SKM}(t) + \frac{[T_{d,(nat)}^{EOBS}(t) * G]_{i,j}}{[\mathbf{1}_{(nat)} * G]_{i,j}} - \frac{[T_{d,(nat)}^{SKM}(t) * G]_{i,j}}{[\mathbf{1}_{(nat)} * G]_{i,j}}$$

$$T_{d;i,j}^{u,CORR}(t) = T_{d;i,j}^{u,SKM}(t) + \frac{[T_{d,(nat)}^{EOBS}(t) * G]_{i,j}}{[\mathbf{1}_{(nat)} * G]_{i,j}} - \frac{[T_{d,(nat)}^{SKM}(t) * G]_{i,j}}{[\mathbf{1}_{(nat)} * G]_{i,j}} + c \left(T_{d;i,j}^{u,SKM} - \frac{[T_{d,(nat)}^{SKM} * G]_{i,j}}{[\mathbf{1}_{(nat)} * G]_{i,j}} \right)$$

Hierbij stelt de term in ronde haakjes het lokale hitte-eiland in de dagwaarden voor. Door deze term nu te vermenigvuldigen met de factor $c = (1 - 1/(1 - 0.25)) = 0.33$ en op te tellen bij de schatting voor de temperatuur van de lokale stedelijke fractie wordt gecompenseerd voor de hitte-eilandonderschatting van 25 %.

In paragraaf 3.4.2 wordt een SKM simulatie uitgevoerd voor artificieel scenario met toekomstig landgebruik. Voor zo'n artificieel scenario bestaat a priori geen observatiedataset om de grootschalige fout te corrigeren, waardoor we dus de bovenstaande methode niet kunnen toepassen. Voor het artificieel scenario gaan we er van uit dat de grootschalige modelfout op de temperatuur exact dezelfde is als deze van de retrospectieve stedelijke klimaatmodellering. Voor het artificieel scenario kunnen we bijgevolg de gecorrigeerde temperatuur als volgt berekenen:

$$T_{arti}^{CORR}(t) = T_{arti}^{SKM}(t) + T_{retro}^{CORR}(t) - T_{retro}^{SKM}(t)$$

Waarbij $T_{retro}^{SKM}(t)$ en $T_{arti}^{SKM}(t)$ temperatuurvelden zijn voor de retrospectieve SKM en het artificiële scenario respectievelijk, terwijl $T_{retro}^{CORR}(t)$ de gecorrigeerde temperatuur voor de retrospectieve run zoals hierboven berekend.

ANNEX 6 Methodefiche indicator 'IN-SITU'

Doel van deze methodefiche:

- verankering van de methode van de indicator als wetenschappelijke onderbouwing;
- beschikbaar maken van de methode binnen het MIRA-team en de betrokken auteurs onafhankelijk van personen (die komen en gaan);
- beschikbaar maken van de methode aan derden in kader van indicatorenoverleg (verantwoording, afstemming, verbetering).

Bijkomende uitleg over de gevraagde info, staat in het begeleidend document

Het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen

TECHNISCHE INFORMATIE

1 Specificatie van de indicator

1 Definitie	Deze indicator vergelijkt de temperatuur in de stad tijdens hittegolven met de temperatuur op het nabijgelegen platteland. Daarvoor wordt, voor de periode april-september van het beschouwde jaar, eerst bepaald op welke dagen zich een hittegolf voordoet volgens de definitie van de FOD Volksgezondheid. Voor die dagen wordt dan de som genomen van de overschrijdingen van de dagelijkse maximumtemperatuur boven de drempel van 29,6 °C, samengeteld met de som van de overschrijdingen van de dagelijkse minimumtemperatuur boven de drempel van 18,2 °C.
2 Eenheid	°C dag
3 Geografische dekking	Momenteel zijn de nodige gegevens enkel voorhanden in Antwerpen, in de toekomst verwachten we de indicator uit te kunnen breiden naar andere steden in Vlaanderen.
4 Sectoriële dekking	-
5 Basisjaar, frequentie, beschikbaarheid	<ul style="list-style-type: none">• Basisjaar: 2013• Frequentie: jaarlijks• Beschikbaarheid: deze indicator kan beschikbaar zijn enkele maanden na het aflopen van de periode waarvoor hij opgesteld wordt
6 Plaats in de verstoringsketen	D P S I R

2 Methodologische beschrijving

Deze beschrijving bevat bij voorkeur:

- een stapsgewijze beschrijving van de gebruikte methode (hoe komt de indicator tot stand?);
- type methode met uitleg; per stap of voor het geheel;
- literatuurreferentie (indien noodzakelijk voor begrip van de methode).

2.1 In-situ metingen

De sterkte van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen wordt berekend op basis van gemeten luchttemperatuur. Per beschouwde stad zijn er telkens metingen nodig afkomstig van (1) een centraal-stedelijk en (2) een nabijgelegen landelijk station.

De goede plaatsing van een stedelijk meteorologisch station is geen sinecure. Het stedelijk weefsel is zodanig heterogeen dat het vinden van een locatie die representatief is voor een ruimere omgeving (en niet enkel voor zijn directe microklimaat) meestal een moeilijke oefening is. Het is in alle geval belangrijk om niet te dicht bij gebouwen te meten, maar minstens verscheidene meters er vandaan. Richtlijnen m.b.t. meteorologische metingen in steden worden gegeven door de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO), zie Oke (2006).

Voor het rurale meetstation is het belangrijk dat de metingen voldoende representatief zijn voor landelijk gebied, en bijvoorbeeld niet verstoord worden door een nabijgelegen gebouw of impermeabel oppervlak (parking, landingsbaan, ...). Hier ook zijn de richtlijnen van de WMO (2008) de referentie. Het ruraal station moet voldoende dichtbij de stad in kwestie liggen, maar uiteraard ook weer niet zo dicht dat de stedelijke invloed meetbaar wordt. Een afstand van 10-15 km lijkt optimaal. Men dient in het bijzonder voorzichtig te zijn met temperatuurmetingen afkomstig van luchthavens, die vaak (te) dicht bij een stad liggen en bovendien door lokale obstakels kunnen beïnvloed worden.

Verder is het van belang om ervoor te zorgen dat er geen al te groot hoogteverschil is tussen de posities van de rurale en stedelijke stations. Indien dat wel het geval is dan dient er gecorrigeerd voor de effecten van de hoogte (correctie door toepassen van een standaard-atmosfeer verticale gradiënt van $-6,5 \text{ }^\circ\text{C km}^{-1}$).

De temperatuurmetingen gebeuren bij voorkeur in automatische weerstations, en best dan nog in weerstations die in near-real time gemonitord worden. Er bestaan weliswaar goede sensoren met een interne opslagcapaciteit (waarbij het instrument dan om de paar weken of maanden dient uitgelezen te worden), maar bij slecht functioneren van zo'n sensor/logger kan het dan ook lang duren voor het euvel aan het licht komt, en dat zou tot een groot verlies aan data kunnen leiden. Als een malfunctie zich voordoet tijdens een hittegolf zou dat zelfs kunnen betekenen dat er voor dat jaar geen indicator kan opgesteld worden. Vandaar dus het belang om de metingen continu op te volgen, en om bij problemen snel in te grijpen.

Het type sensor maakt op zich niet zoveel uit, voor zover de nauwkeurigheid voldoende is (orde $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ of beter). De behuizing van de temperatuursensor is dan weer wel van groot belang. Gegeven de soms erg lage windsnelheden in typische stedelijke 'street canyons' dient de temperatuurmeting te gebeuren in een stralingsschild met actieve ventilatie. De meetfrequentie moet voldoende hoog liggen, om de minima en maxima van temperatuur die zich in de loop van een dag voordoen niet te missen. Een meting om de 10 à 15 minuten lijkt voldoende, en is meet-technisch goed haalbaar.

2.2 Berekening van de indicator

De voorgestelde stedelijke hitte-indicator meet zowel de duur als het gewicht van een hittegolf, en doet dit apart voor de stedelijke en rurale locaties. Door de indicator voor beide samen voor te stellen komt het stedelijk hitte-eiland effect tot uiting.

De berekening van de indicator verloopt in drie stappen:

(i) Op basis van de 15-minuutswaarden van gemeten luchttemperatuur (actief geventileerde meting) worden dagelijkse minimum (T_{\min}) en maximum (T_{\max}) temperaturen berekend. Dit gebeurt apart voor de stedelijke en de landelijke locatie, voor de periode gaande van 1 april om 00:00 tot 30 september om 23:45. De tijd wordt uitgedrukt in UTC+2, wat overeenkomt met de lokale tijd in België gedurende de zomerperiode.

(ii) Vervolgens wordt bepaald welke dagen deel uitmaken van een hittegolf. We baseren ons daarbij op de FOD Volksgezondheid (2014), die een hittegolf definieert als een periode van minstens drie opeenvolgende dagen met een gemiddelde maximum temperatuur (gemiddelde over de drie dagen en niet per dag) hoger dan 29,6 °C, én een gemiddelde minimum temperatuur hoger dan 18,2 °C. Het resultaat is een vector h_i met 183 elementen (één voor elke dag in de periode 1 april tot 30 september), en met $h_i = 1$ dag indien dag i deel uitmaakt van een hittegolf, en $h_i = 0$ dagen in het andere geval. De grootte h_i heeft dus de dimensie van tijd, met eenheid van een dag.

(iii) In een laatste stap worden voor alle hittegolfdagen de overschrijdingen van de minimum en maximum temperaturen boven de drempelwaarden van respectievelijk 18,2 °C en 29,6 °C opgeteld in de 'hittegolf graaddagen':

$$HGD = \sum_i \left[(T_{\min,i} - 18.2 \text{ °C})^+ + (T_{\max,i} - 29.6 \text{ °C})^+ \right] h_i,$$

waarbij de som loopt over alle dagen i van de periode 1 april tot 30 september van het beschouwde jaar, en met $T_{\max,i}$ en $T_{\min,i}$ de maximum en minimum temperaturen, respectievelijk, op dag i . De '+' symbolen die als superscript gebruikt worden wijzen erop dat enkel positieve argumenten (van hetgeen tussen ronde haakjes staat) in rekening worden gebracht; negatieve argumenten dragen niet bij tot de som. De resulterende getalwaarde voor HGD is een maat voor de totale duur van hittegolven in een gegeven zomerperiode, maar ook van hun gewicht, d.w.z. de mate waarin temperaturen tijdens hittegolven meer of minder boven de drempelwaarden uitstijgen. Noteer dat de eenheid van HGD gegeven wordt door '°C dag'.

De berekening van de hittegolf graaddagen volgens bovenstaande formule gebeurt afzonderlijk voor een stedelijk en voor een nabijgelegen landelijk meetstation. Het resultaat bestaat voor elk van de beide locaties uit één getalwaarde per jaar. Deze getallen worden samen in een grafiek uitgezet, zodat het stedelijk effect duidelijk tot uiting komt.

Momenteel (najaar 2014) zijn in Vlaanderen enkel metingen beschikbaar voor Antwerpen; indien in de toekomst metingen voor andere steden ter beschikking komen, dan kunnen de resultaten ervan op dezelfde grafiek geplaatst worden, om zo bijvoorbeeld het effect van de grootte van een stad, of de nabijheid van de kust, te kunnen tonen. Het lijkt moeilijker om indicatoren of meetwaarden van verschillende steden te combineren in één enkele Vlaamse stedelijke hitte-stress indicator.

Noteer dat de indicator zoals hierboven gedefinieerd in principe ook op basis van modelresultaten kan worden opgesteld, en op die manier onder de vorm van geografische kaarten kan gevisualiseerd worden.

2.3 Procedure bij ontbrekende data

Zoals eerder gezegd zijn er momenteel enkel in Antwerpen metingen beschikbaar (VITO klimaatstations) voor de berekening van de indicator. Terwijl er voor de zomerperiode (1 april – 30 september) van 2013 een volledige meetreeks voorhanden was, was dat niet het geval voor 2014 voor het stedelijk station, waarvoor tussen begin april en begin juli een data hiaat was (voor het ruraal station was er wel een volledige tijdsreeks voorhanden). Echter, ontbrekende data zijn enkel een probleem als er zich in de periode in kwestie een hittegolf voordoet, omdat de berekening van de indicator enkel 'geactiveerd' wordt op zulke dagen. Daarom werd er een procedure op punt gesteld

om op basis van andere gegevens in te schatten of er zich in een periode van onvolledige data al dan niet een hittegolf voordoet. (En indien er zich geen hittegolf voordoet dan zijn de overblijvende data voldoende om de indicator te berekenen.) Deze procedure is gebaseerd op de dagelijkse maximum temperaturen, omdat die het minst verschil geven tussen verschillende stations, met name tussen stedelijk en rurale stations. Het basisprincipe is dat er op basis van T_{max} (en de overschrijding van de 29,6 °C drempel) gekeken wordt of er zich überhaupt een hittegolf kan hebben voorgedaan. Indien dat niet het geval is dan zal zelfs een hoge T_{min} geen hittegolf opleveren.

Voor het jaar 2014 waren er zoals gezegd dus nog wel data voor de rurale site voorhanden. Uit een analyse van gegevens van 2013, waar zowel de rurale als de stedelijk site volledige meetreeksen hadden, bleek dat de dagelijkse T_{max} in het stedelijk station gedurende 99 % van de tijd minder dan 2 °C boven de waarden van het ruraal station lag. De stedelijke 'hittegolf test' bestond er dus uit van de rurale T_{max} waarden met 2 °C te verhogen om zodoende een proxy voor de bovengrens van de stedelijke T_{max} te bekomen. Die waarde kan dan makkelijk afgetoetst worden voor overschrijdingen van de dagdrempel van 29,6 °C. Zo'n aftoetsing gebeurde voor het jaar 2014, en daaruit bleek dat er zich in de periode met ontbrekende data in het stedelijk station heel waarschijnlijk geen hittegolf had voorgedaan. Als gevolg kon voor het jaar 2014 de indicator ook berekend worden, ondanks de ontbrekende data.

Een vergelijkbare procedure werd toegepast op de data voor het jaar 2012. In dat jaar werden de VITO metingen in Antwerpen opgestart, echter pas in begin juli zodat de maanden april-mei-juni ontbraken voor de berekening van de indicator in dat jaar. Het verschil met de hierboven beschreven situatie (voor 2014) is nu echter dat er voor deze periode van ontbrekende data in 2012 ook geen data van het ruraal meetstation voorhanden waren om de 'hittegolf test' mee toe te passen. Daarom werd gebruik gemaakt van metingen in het KMI station van Ukkel om in te schatten of er zich een hittegolf had voorgedaan in de periode met ontbrekende data. Omdat enkel T_{max} waarden nodig zijn voor deze test werd gebruik gemaakt van gegevens die gratis verspreid worden via het European Climate Assessment & Dataset project (www.ecad.eu, zie Klok en Tank, 2009). Er werd geen formele analyse gemaakt van de representativiteit van Ukkel voor het meetstation in Vremde, maar men kan ervan uitgaan dat de lagere temperaturen die men in Ukkel verwacht omdat het hoger is gelegen (effect van 0,6 °C voor een hoogteverschil van 100 m) ongeveer gecompenseerd worden door het feit dat het een licht stedelijk effect heeft (Van Weverberg et al., 2008). In alle geval, uit een analyse van de Ukkel data, ook verhoogd met 2 °C zoals hierboven beschreven, bleek dat er zich geen hittegolf voordeed in de periode met ontbrekende data, zodat ook voor het jaar 2012 een indicatorwaarde kon berekend worden.

KWALITEIT VAN DE INDICATOR

1 Verantwoording indicatorkeuze en mogelijke verbeteringen

De optimale indicator zou er één zijn die de actuele blootstelling van de bevolking weergeeft, rekening houdend met het dagelijkse verplaatsingspatroon van individuen doorheen het jaar, en die verder gebruik maakt van locatie-specifieke (binnen- en buitenshuis ...) meteorologische informatie, waaronder temperatuur, vochtigheid, windsnelheid, kort- en langgolvlige stralingsbelasting. Om inzicht te krijgen in het stedelijk effect zou men dan met verschillende cohorten kunnen werken, bijvoorbeeld bestaande uit mensen die in de stad wonen, mensen die landelijk wonen, en pendelaars die overdag in de stad komen, maar buiten de stad wonen (en eventueel andersom), en andere groepen zoals toeristen. Echter, om tot zo'n indicator te komen is er nog veel onderzoek nodig; verder zijn er ook een hoop praktische belemmeringen om die te implementeren.

Daarom werd gekozen om te werken met een relatief eenvoudige indicator, gebaseerd op in-situ metingen die makkelijk te realiseren zijn, en die een verband legt met de definitie van hittegolven in België zoals gedefinieerd door de FOD Volksgezondheid zoals hierboven vermeld. Belangrijk bij deze definitie van hittegolven, en verschillend van bijvoorbeeld de definitie die door het KMI gehanteerd wordt (vijf dagen op rij warmer dan 25 graden, waarvan drie dagen warmer dan 30 graden), is dat naast de maximum temperatuur tevens gebruik gemaakt wordt van de dagelijkse *minimum* temperatuur. In de context van een stedelijke hitte-indicator is dit van belang: enerzijds omdat de grootste temperatuurverschillen tussen stad en platteland zich's nachts voordoen; anderzijds omdat

studies hebben aangetoond dat het vooral de verhoogde nachtelijke temperaturen zijn die in steden voor een extra hitte-last zorgen (Dousset et al., 2010).

2 Datakwaliteit, methodekwaliteit en mogelijke verbeteringen

De enige gegevens die momenteel in het Vlaams Gewest beschikbaar zijn om stedelijke hitte-stress in te schatten zijn de temperatuurmetingen van de VITO klimaatstations in Antwerpen en het nabijgelegen (landelijke) Vremde. Deze metingen zijn uitvoerig gecontroleerd, gekalibreerd, onderling vergeleken etc. Voorts zijn temperatuurdata van deze meetstations tijdens een meetcampagne in het Gentse (aan de proefhoeve van de UGent) vergeleken met data van een nabijgelegen KMI station, waarbij een root mean square error van 0,4 °C gevonden werd. Meer informatie over de kwaliteitscontrole van deze data is beschikbaar in Lauwaet et al., (2013) en Maiheu et al. (2013).

In het kader van de detectie van trends dient men er wel rekening mee te houden dat er op dit ogenblik nagenoeg geen historische tijdsreeksen van gemeten temperatuur in steden in Vlaanderen beschikbaar zijn. Buiten de VITO metingen in Antwerpen zijn er enkel nog de metingen van BIM in Molenbeek (Brussel). Echter, analyse van deze data wijst op een atypisch dagverloop van het stedelijk-rurale temperatuurverschil, dus ze dienen met de nodige voorzichtigheid behandeld te worden. Voor zover ons bekend, en zoals hierboven vermeld, zijn de enige andere beschikbare en professioneel uitgevoerde metingen afkomstig van de VITO klimaatstations in/nabij in Antwerpen, maar die meetreeks neemt pas een aanvang in juli 2012.

De klimaatmetingen van VITO in Antwerpen gebeurden van juli 2012 tot december 2013 op een laag gebouw op de speelplaats van het Koninklijk Lyceum van Antwerpen (KLA). Sinds begin 2014 is de meetpost verplaatst naar de VMM Lucht meet-site op de Plantin en Moretuslei in Borgerhout. Dat zou op zich een probleem van data-continuïteit kunnen geven, ware het niet dat bij tijdelijk parallel uitgevoerde metingen in het KLA en de VMM meet-site gedurende de zomer van 2013 aangetoond werd dat het temperatuurverloop op beide locaties nagenoeg identiek is. In de nabije toekomst wil VITO blijven meten op de VMM site van Borgerhout. Op termijn zou VMM deze metingen eventueel kunnen overnemen.

De rurale temperatuurmetingen gebeuren op een graswei bij bioboer Seger Van Leemputten in Vremde (deelgemeente van Boechout), op zo'n 12 km afstand van het centrum van Antwerpen. Deze site is met grote zorgvuldigheid geselecteerd (voldoende ver van woonwijken, lokale obstakels, etc.), en met de nodige logistieke hoofdbrekens geïnstalleerd. Het enige nadeel aan deze locatie is dat haar beschikbaarheid op termijn niet gegarandeerd is. Een alternatieve bron van rurale temperatuurmetingen in de nabijheid van Antwerpen is het nieuwe KMI meetstation in Stabroek, dat sinds kort meetwaarden produceert. Er is voor dit station wel enige bezorgdheid omtrent de locatie, op ongeveer 1 km van de haven van Antwerpen, zodat het bij bepaalde windrichtingen onderhevig zou kunnen zijn aan een lokaal hitte-eiland effect, wat het station onbruikbaar zou maken als landelijk referentiestation. Om de geschiktheid van dit station te evalueren is verder onderzoek nodig.

Het verwerven van inzicht in trends van het stedelijk hitte-eilandfenomeen in Vlaanderen zal enkel mogelijk zijn als de huidige metingen kunnen verdergezet worden in de komende jaren, en liefst ook uitgebreid naar andere steden.

In alle geval is het zo dat de temperatuurmetingen die momenteel beschikbaar zijn voor Antwerpen beantwoorden aan de hoogste kwaliteitsvereisten. Uit een recent overleg met de VMM Afdeling Lucht in Antwerpen is trouwens gebleken dat de meetmethodes die VMM hanteert voor temperatuur in zijn luchtkwaliteitsstations nagenoeg identiek is (actief geventileerde pt1000 sensoren, relatief hoge opslagfrequentie, continue monitoring). Waar wel rekening mee dient gehouden is dat de vakgroep binnen VITO die deze metingen uitvoert geen operationele missie heeft (in tegenstelling tot VMM), en dat de meetactiviteiten puur ter ondersteuning van modelleringswerk zijn opgezet. In het belang van de continuïteit van de data op langere termijn dient nagedacht hoe hier verder mee moet worden omgegaan.

Mogelijke verbeteringen zijn de volgende:

(1) Consolidatie van de metingen in Antwerpen: op termijn overname van de VITO metingen in Borgerhout door VMM, en opname van deze metingen in het telemetrisch netwerk. Voor wat betreft

het rurale station dient nagegaan of het KMI station in Stabroek voldoende representatief is voor de landelijke omgeving. Indien niet, dan dient er gekeken te worden naar een alternatief voor het station in Vremde, ofwel moet de continuïteit van dat station op één of andere manier verzekerd te worden; hierbij dient rekening gehouden met het feit dat het station zich op het terrein van een particulier bevindt.

(2) Het zou ook zeer zinvol zijn om de metingen uit te breiden naar andere steden. Concreet denken we aan:

i. Gent: KMI station van Melle (ruraal) en nieuw te installeren temperatuursensor aan het VMM meetstation aan de Gustaaf Callierlaan (stedelijk);

ii. Brugge: extra te installeren sensor aan de VMM meetpost van Moerkerke (ruraal), stedelijk station moet wel nog geïnstalleerd;

iii. Brussel: het stedelijk station van BIM in Molenbeek dient verder geëvalueerd m.b.t. de afwijkende dagcyclus, als ruraal station nabij Brussel zou de VMM site in St-Pieters-Leeuw kunnen uitgebreid worden met een temperatuurmeting;

iv. Hasselt: het rurale KMI station in Diepenbeek, en als stedelijk station mogelijk een nieuw te installeren site aan het VMM gebouw aan de Ring van Hasselt (hoewel dit niet echt centraal gelegen is) – ofwel toch een meer centrale locatie zien te vinden;

v. Lier: het station van Vremde zou hier ook dienst kunnen doen als landelijk referentiestation, er moet dan nog wel een locatie voor een meetpost in de binnenstad gezocht worden.

Op deze manier zou er een relatief grote diversiteit van data ter beschikking komen, voor steden van verschillende groottes en inwoneraantallen, en ook op verschillende geografische locaties in Vlaanderen (van de Kust tot Limburg).

3 Internationale vergelijkbaarheid

De voorgestelde indicator wordt niet internationaal gebruikt. Om te beginnen is de definitie van een hittegolf van de FOD Volksgezondheid, en met name de drempelwaarden voor temperatuurminima en -maxima, uniek voor België. Omdat het echter om een officiële Belgische definitie gaat lijkt het passend om deze definitie en de daarin gebruikte drempelwaarden te gebruiken.

Om te kunnen vergelijken met andere landen is het nuttig te noteren dat de drempelwaarden van 18,2 °C (minimum temperatuur) en 29,6 °C (maximum temperatuur) overeenkomen met de 95^e percentiel van de dagwaarden voor de maanden juni-juli-augustus van de periode 1975-2004, voor het KMI station van Ukkel (zie FOD Volksgezondheid (2014)). Men zou dus kunnen gaan vergelijken met andere regio's door gebruik te maken van de lokale temperatuurwaarden die met deze 95^e percentielen overeenkomen. Dit reflecteert dan meteen het feit dat in landen waar bv hogere temperaturen heersen, de bevolking ook beter is aangepast aan extreme waarden. Hetgeen de vergelijking bemoeilijkt is het feit dat de Belgische waarden gebaseerd zijn op een tijdsreeks van gemeten temperatuur van Ukkel, wat noch stedelijk, noch ruraal is. Uit studies gedaan op VITO blijkt dat de temperatuur in Ukkel 's nachts gemiddeld ongeveer een graad hoger ligt dan op de luchthaven van Zaventem – deze laatste is dan echter ook weer niet geheel representatief voor een rurale omgeving. Om aan de drempelwaarden van de FOD Volksgezondheid te geraken op basis van de rurale metingen nabij Antwerpen moet men bijvoorbeeld al richting de 98^e percentiel gaan.

Verder dient genoteerd dat VITO overleg heeft gehad met de Wereld Gezondheidsorganisatie (WGO) in Bonn, in verband met het gebruik van een indicator gebaseerd op resultaten van het EuroHEAT project (d'Ippoliti et al., 2010), waarin WGO zelf mee onderzoek heeft verricht. Bedoeling van deze indicator was om pan-Europees toepasbaar te zijn, om zodoende de hitte-stress in verschillende Europese steden te kunnen vergelijken. In deze indicator wordt gebruik gemaakt van dagelijkse maxima van de 'schijnbare temperatuur', wat een combinatie is van de luchttemperatuur en de dauwpunttemperatuur (een maat voor de luchtvochtigheid), en verder wordt ook de dagelijkse minimumtemperatuur erin gebruikt. Echter, de drempelwaarden die in deze indicator voorkomen zijn gebaseerd op de 90^e percentiel voorkomend *per maand*. De berekening van deze indicator is dus niet compatibel met de Belgische definitie van hittegolf, noch voor wat betreft de formules, noch in de drempelwaarden die gebruikt worden. Voorts lijkt het problematisch dat, door te werken met

percentielwaarden per maand, men ook (relatief gezien) warmere perioden in de koude maanden gaat catalogeren als hittegolf, zelfs als vanuit een absoluut standpunt het om eerder koude temperaturen gaat.

Referenties

D'Ippoliti, D., Michelozzi, P., Marino, C., de' Donato, F., Menne, B., Katsouyanni, K., Kirchmayer, U., et al. (2010). The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project. *Environmental health : a global access science source*, 9, 37. doi:10.1186/1476-069X-9-37.

Dousset, B., F. Gourmelon, K. Laaidi, A. Zeghnoun, E. Giraudet, P. Bretin, E. Maurid, & S. Vandentorren, 2010. Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area. *Int. J. Climatol.*, 31, 313–323.

FOD Volksgezondheid (2014). Hittegolf- en ozonpiekenplan. Beschikbaar via http://www.health.belgium.be/filestore/8108413/plan%20HOP_NL2014.pdf (deze link was actief op 6 oktober 2014).

Klok, E.J. & A.M.G. Klein Tank, 2009. Updated and extended European dataset of daily climate observations. *Int. J. Climatol.*, 29, 1182, doi:10.1002/joc.1779.

Lauwaet, D., B. Maiheu, J. Aertssens, K. De Ridder, 2013. Opmaak van een hittekaart en analyse van het stedelijk hitte-eiland effect voor Antwerpen. VITO rapport 2013/RMA/R/352.

Maiheu B., K. Van den Berghe, L. Boelens, K. De Ridder, & D. Lauwaet, 2013. Opmaak van een hittekaart en analyse van het stedelijk hitte-eiland effect voor Gent. VITO rapport 2013/RMA/R113.

Oke, T.R., 2006. Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites. World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods, IOM Report No. 81, WMO/TD-No. 1250.

Van Weverberg, K., K. De Ridder, & A. Van Rompaey, 2008. Modeling the contribution of the Brussels heat island to a long term temperature time series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 976-990.

World Meteorological Organisation, 2008. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-No.8, ISBN 978-92-63-10008-5.

Verantwoordelijke MIRA: Johan Brouwers (j.brouwers@vmm.be)

Laatst gewijzigd: 5 november 2014, Koen De Ridder (koen.deridder@vito.be)

ANNEX 7 Methodefiche indicator 'SATELLIET'

Doel van deze methodefiche:

- verankering van de methode van de indicator als wetenschappelijke onderbouwing;
- beschikbaar maken van de methode binnen het MIRA-team en de betrokken auteurs onafhankelijk van personen (die komen en gaan);
- beschikbaar maken van de methode aan derden in kader van indicatorenoverleg (verantwoording, afstemming, verbetering).

Bijkomende uitleg over de gevraagde info, staat in het begeleidend document

Hot Island Area/Population indicator

TECHNISCHE INFORMATIE

1 Specificatie van de indicator

1 Definitie	<p><i>De indicator bestaat in 2 varianten, HIA (Hot Island Area) of HIP (Hot Island Population)</i></p> <p><i>De HIA - variant geeft de fractie weer van het oppervlak van een bestuurlijk arrondissement (of gans Vlaanderen) dat gedurende de periode april-september maandgemiddelde oppervlaktetemperatuur kende die voor de dag beelden hoger is dan 31,5 °C en voor de nachtbeelden hoger dan 15,7 °C.</i></p> <p><i>De HIP – variant is analoog gedefinieerd, maar geeft niet de fractie van het oppervlak weer, maar de fractie van de bevolking van het arrondissement.</i></p>
2 Eenheid	<i>percent [%]</i>
3 Geografische dekking	<i>Gans Vlaanderen indien de maand aggregaties van de satelliet oppervlaktetemperatuurdata gebiedsdekkend zijn voor de maanden (april-september)</i>
4 Sectoriële dekking	<i>Niet van toepassing</i>
5 Basisjaar, frequentie, beschikbaarheid	<ul style="list-style-type: none">• Basisjaar: <i>Nodige drempelwaarden voor het opstellen van de indicatoren zijn bepaald op de zomers van 2002 t.e.m. 2013. De tijdsreeks van de indicator vangt aan in 2002.</i>• Frequentie: <i>Jaarlijks</i>• Beschikbaarheid: <i>kan afgeleid worden in het najaar van elke zomerperiode mits voldoende satelliet observaties van de afgelopen zomer beschikbaar zijn</i>
6 Plaats in de verstoringsketen	D P S I R

2 Methodologische beschrijving

2.1 Dataverwerking voorafgaand aan de berekening van de indicator

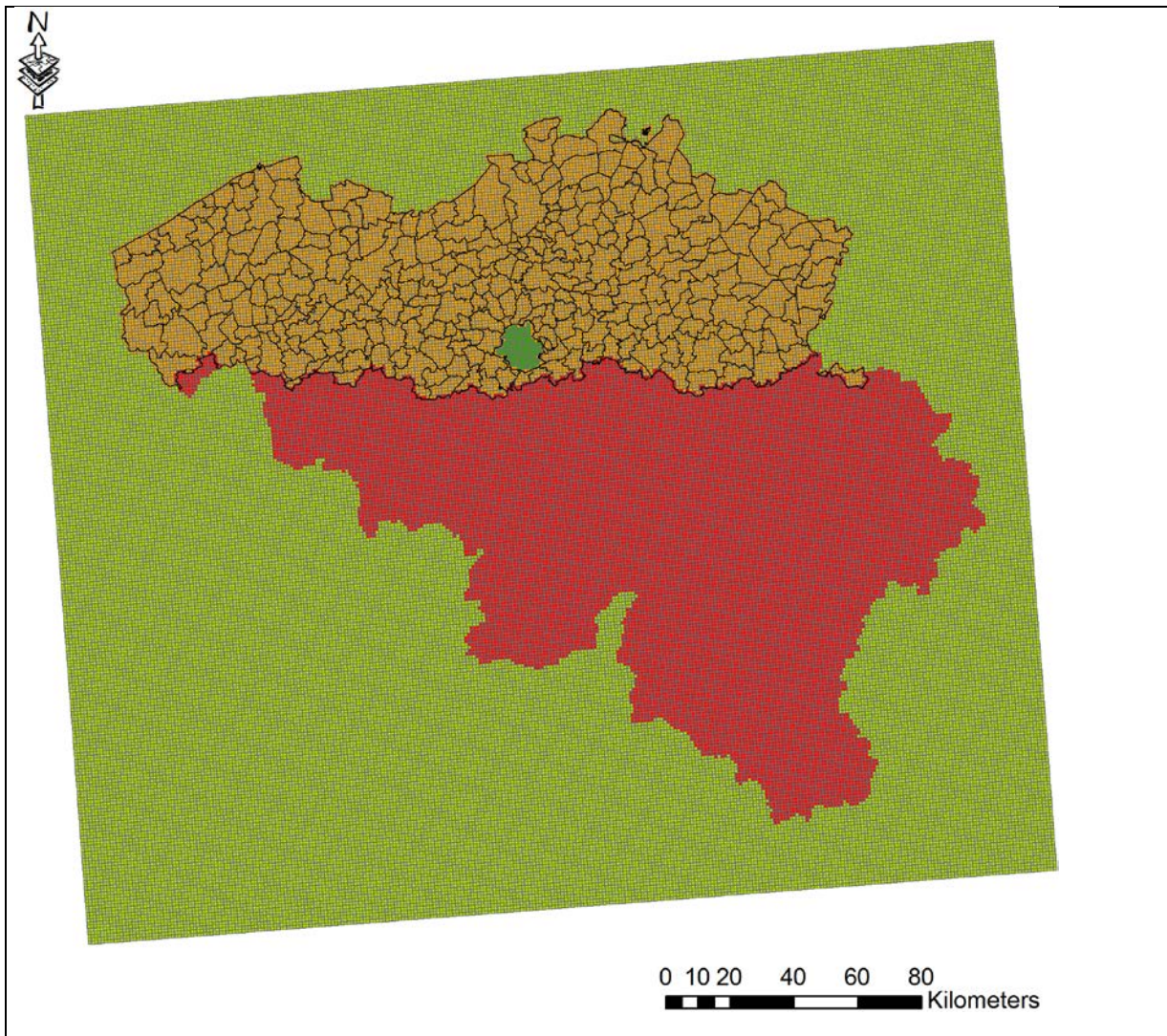
De indicator wordt berekend op basis van het MOD11A1 en MYD11A1 oppervlaktetemperatuurproduct afgeleid van de MODIS satelliet sensor aan boord van de EOS-Terra

en EOS-Aqua satellieten. MODIS oppervlaktetemperatuurdata is relatief vlot beschikbaar via het Earth Observing System - Data and Information System van NASA, het Amerikaans ruimtevaartagentschap, meer bepaald via het Reverb tool (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>). Dit online tool bevat een zoek functie waarin een gebruiker kan zoek op basis van het geografisch interessegebied, een tijdsvenster en een product omschrijving. Voor MODIS oppervlaktetemperaturen zoeken we op product codes MOD11A1 en MYD11A1, welke de dagelijkse globale aggregaties zijn op een 1 km rooster. Om de data voor Vlaanderen te bekomen dient met een geografisch zoekvenster (latitude / longitude) gewerkt te worden dat minstens Vlaanderen bedekt. Eens de hdf-eos bestanden klaargezet zijn op de FTP servers van NASA kan de gebruiker ze downloaden en archiveren op lokale storage. De totale dataset, gedownload voor de periode 2002 – 2013 bedraagt 52 Gb.

Hierna dienen de beelden geprojecteerd te worden op een gemeenschappelijk rooster boven Vlaanderen. Deze projectie gebeurt aan de hand van het MRTSwath tool (https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool_swath) en meer bepaald het *resample* commando dat deel uitmaakt van de toolkit. Daar deze tool niet alle projectie systemen ondersteunt konden we geen gebruik maken van de gekende Belgische Lambert 72 projectie. We maakten daarom gebruik van het Europese grid systeem (<http://spatialreference.org/ref/epsg/etrs89-etsr-1000/>) dat de INSPIRE richtlijn volgt (<http://inspire.ec.europa.eu/>). Dit projectiesysteem wordt wel makkelijk ondersteund in de resample tool. Een voorbeeld parameter file (.prm) voor de resample tool is hieronder opgenomen met de correcte projectie parameters.

```
INPUT_FILENAME = MOD11A1.A2002002.h18v04.005.2007079055204.hdf
SPECTRAL_SUBSET = ( 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 )
SPATIAL_SUBSET_TYPE = OUTPUT_PROJ_COORDS
SPATIAL_SUBSET_UL_CORNER = ( 3777000.0 3180000.0 )
SPATIAL_SUBSET_LR_CORNER = ( 4080000.0 2920000.0 )
OUTPUT_FILENAME = /home/maiheub/test.hdf
RESAMPLING_TYPE = NEAREST_NEIGHBOR
OUTPUT_PROJECTION_TYPE = LA
OUTPUT_PROJECTION_PARAMETERS = (
6378137.0 0.0 0.0
0.0 10.0 52.0
4321000.0 3210000.0 0.0
0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 )
DATUM = NoDatum
OUTPUT_PIXEL_SIZE = 1000
```

In onderstaande figuur is een afbeelding van het in het rapport gebruikte rooster opgenomen samen met de pixels die we vlaggen als zijnde Vlaanderen (oranje).



Figuur 86: Gemeenschappelijk 1x1 km² rooster voor de projectie van de MODIS beelden

De ruimtelijke maskers voor de steden en gemeenten zijn berekend op basis van de shapefile in de figuur.

Vervolgens worden de individuele dagelijkse opnames geaggregeerd naar maandgemiddelde beelden op dit gemeenschappelijke rooster en dit apart voor de dag beelden en nachtbeelden. We gebruiken hierbij zowel beelden van de EOS-Terra (MOD11A1) satelliet als de EOS-Aqua satelliet (MYD11A1). Voor de aggregatie naar maandgemiddelden berekenen we per pixel het rekenkundig gemiddelde overheen de verschillende dag-opnames voor elke maand, uiteraard rekening houdend met ontbrekende waarden.

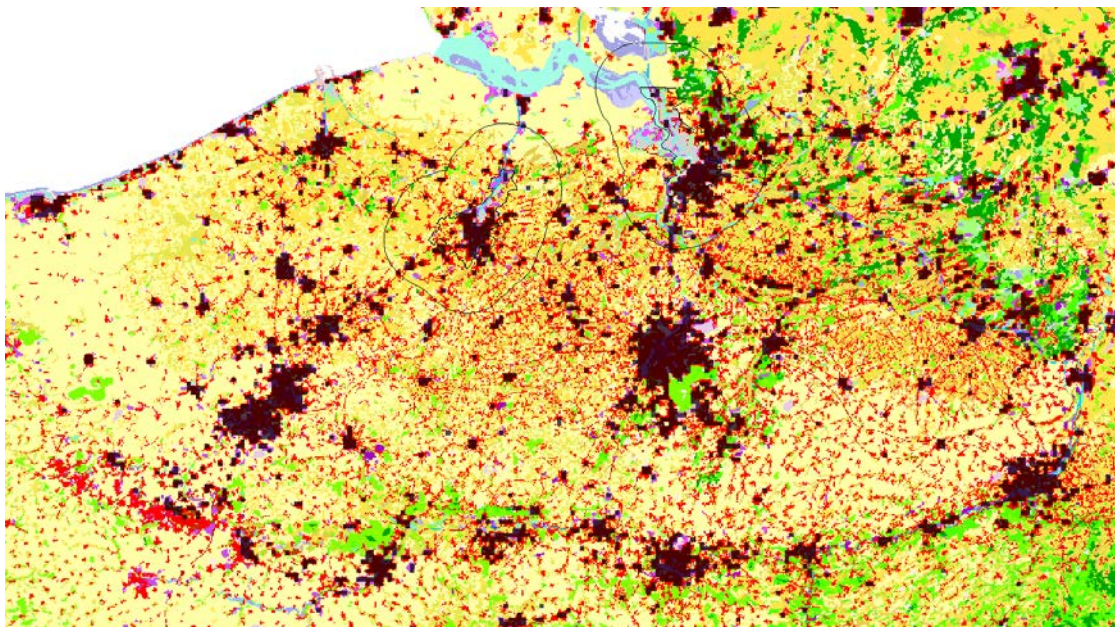
Voor we kunnen overgaan tot de berekening van de indicatoren op basis van de ge-co-registreerde maandgemiddelde LST kaarten, dienen we de bevolkingsdichtheid op ditzelfde rooster te herprojecteren. De HIP indicator maakt hier immers gebruik van. We maken hiervoor gebruik van de EEA bevolkingsdichtheidskaart, beschikbaar op <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/population-density-disaggregated-with-corine-land-cover-2000-2> zie ook Gallego et al, (2010). Deze kaart werd samengesteld op basis van de 2001 census gegevens (Eurostat) en gedisaggregeerd naar een 100x100m raster op basis van de CORINE landcover dataset (EEA).

2.2 De drempelwaarden voor de indicator

Voor het opstellen van de drempelwaarden die gehanteerd worden in de HIA en HIP indicatoren maken we verder ook gebruik van CORINE landgebruiksdata. Strik genomen is deze data niet nodig voor het berekenen van de indicator zelf, maar wel wanneer de indicator dient bijgewerkt te worden en eventueel aangepast aan toekomstige satelliet sensoren. We zullen hier dan ook even kort stil

staan bij de berekening van de drempelwaarden.

Om een uniforme set drempelwaarden te hebben voor alle steden in Vlaanderen, baseren we onze drempelwaarden op percentielwaarden van de stedelijke temperatuur. Hiervoor bekijken we alle stedelijke pixels in het gemeenschappelijk rooster van bovenstaande figuur. Dit doen we op basis van een CORINE landgebruiksmasker, waarbij we een stedelijke pixel definiëren als zijnde een pixel waarvoor de som van de CORINE fracties voor continue en discontinu stedelijk gebied (111, 112); industrieel gebied (121); 'road and rail networks + associated land' (122); 'Green urban areas' (141) en 'Sport & leisure facilities' (142) hoger is dan 70%. Dit zijn alle artificiële oppervlakken behalve havengebied, airports en 'mine, dump en construction sites'. Dit masker is hieronder afgebeeld. De landgebruiksfacties hiervoor nodig werden voor elke 1x1 km² rooster cel afgeleid op basis van de CORINE vector dataset. Van elke landgebruiksklasse werd gekeken met welke fractie van de totale oppervlakte ze in elke rooster cel aanwezig is.



Figuur 87: CORINE landgebruiksmasker voor stedelijke gebieden

Er worden vervolgens twee drempelwaarden bepaald voor de HIP en de HIA indicatoren. We nemen enerzijds het 95^e percentiel van alle stedelijke, maandgemiddelde oppervlaktetemperaturen in de zomerperiodes van 2002 - 2013 voor de MODIS dagbeelden (terra + aqua), en analoog maar voor de nachtbeelden. Met zomerperiode bedoelen we dat we enkel de maanden april – september in rekening brengen voor het afleiden van deze percentielwaarden. Deze drempelwaarden zijn:

- $T_{\text{dag}} = 31,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $T_{\text{nacht}} = 15,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Beide waarden worden vervolgens gebruikt in het opstellen van de indicator. Dit wordt hieronder beschreven.

2.3 Berekening indicator

Eens we de drempelwaarden (eventueel bijgewerkte) hebben en we beschikken over de maandgemiddelde oppervlaktetemperatuurdata voor de beelden overdag en 's nachts, kunnen we de indicator bepalen. De indicator wordt bepaald op het niveau van een stad of gemeente, maar kan eventueel ook op schaal van gans Vlaanderen bepaald worden. Per stad of gemeente worden dus enkel de pixels bekeken die geheel of gedeeltelijk binnen de administratieve grenzen vallen. Per jaar wordt de totale oppervlakte bepaald (HIA) van de pixels binnen de administratieve grens van de stad/gemeente die een maandgemiddelde oppervlaktetemperatuur hebben boven 31,5 °C voor de maandgemiddelde dagbeelden én boven de 15,7 °C voor de maandgemiddelde nachtbeelden. Dit wordt gedaan voor de maanden april tot en met september. De totale oppervlakte (over de 6

maanden) wordt vervolgens gedeeld door 6 keer de beschikbare oppervlakte van de administratieve zone (gezien we deze indicator over 6 maanden bekijken). Zodoende krijgen we de zomer gemiddelde fractie van de oppervlakte waarvoor zowel de dag als nacht LST waarden boven de drempelwaarden zitten.

Analoog wordt voor de HIA indicator niet de totale oppervlakte, maar de totale bevolking (op basis van de bevolkingsdichtheidskaart) genomen. De normering gebeurt op gelijkaardige manier.

De berekening van de indicatoren hebben we hieronder in formulevorm opgenomen:

$$HIA = \frac{\sum_{i=4}^9 A_c (LST_{i,dag} > 31.5 \text{ } ^\circ\text{C} \ \& \ LST_{i,nacht} > 15.7 \text{ } ^\circ\text{C})}{\sum_{i=4}^9 A_c}$$

Waarbij de som loopt van maand 4 (april) tot maand 9 (september) en A_c oppervlakte van de administratieve zone voor stad/gemeente c en $LST_{i,dag}$ en $LST_{i,nacht}$ resp. de maandgemiddelde dag/nacht oppervlaktetemperatuur voor maand i .

De HIP indicator wordt geheel analoog berekend, maar dan wel op basis van inwonersaantallen i.p.v. oppervlakte.

Merk op dat in de praktijk we de oppervlakte of het aantal inwoners bepalen met een resolutie van $1 \times 1 \text{ km}^2$. Zeker voor kleinere steden kan dit misschien relatief grof zijn.

KWALITEIT VAN DE INDICATOR

1 Verantwoording indicatorkeuze en mogelijke verbeteringen

Het intrinsieke probleem met indicatoren op basis van oppervlaktetemperatuur, afgeleid van satelliet gegevens, is de interpretatie die eraan gegeven kan worden. In tegenstelling tot de luchttemperatuur, die rechtstreeks te linken valt aan gezondheidseffecten en vb. sterfte cijfers, is de relatie tussen de oppervlaktetemperatuur en de gezondheid veel minder direct. De oppervlaktetemperatuur geeft veeleer informatie over de karakteristieken van het stedelijk weefsel, fractie verhard oppervlak, fractie aanwezige vegetatie en gebruikte materialen (asfalt, beton ...). Grote parken en groene zones hebben typisch een veel lagere oppervlaktetemperatuur dan vb. grote asfalt-parkings, of golfplaten daken van grote industriële gebouwen. Ook de stedelijk geometrie, de beperkte ruimtelijke resolutie en de kijk-hoek van de satelliet t.o.v. de stand van de zon spelen een niet-verwaarloosbare rol bij de interpretatie van de oppervlaktetemperaturen. Het is echter zeer moeilijk hiervoor te corrigeren.

Verder dienen we zeker de intrinsieke systematische bias te vermelden bij satelliet opnames, die uiteraard enkel kunnen plaatsvinden bij heldere hemel. Een beperkte analyse van luchttemperatuur en bewolgingsgraad toonde aan dat dit in de winter kan leiden tot een negatieve bias in de winter en in de zomer tot een positieve bias. M.a.w. in de winter is het bij heldere hemel kouder dan gemiddeld, in de zomermaanden iets warmer. Om vast te stellen hoe hier best mee wordt omgegaan in het kader van het opstellen van stabiele indicatoren is nog verder onderzoek nodig.

Voorts is continuïteit en beschikbaarheid van de satelliet data sowieso problematisch. Momenteel maken we gebruik van MODIS data, waarvoor we een stabiele tijdsreeks hebben vanaf 2002 tot heden. De instrumenten zijn echter reeds ver voorbij hun oorspronkelijk begroote levensverwachting en het is dan ook de vraag wanneer deze sensoren ermee ophouden. Er zijn reeds een aantal alternatieven actief, maar wanneer men data wil gebruiken van andere sensoren dienen een aantal zaken herbekeken te worden bij de definitie van de indicatoren. Zoals daar zijn:

- De systematische verschillen tussen verschillende berekeningsalgoritmes bij verschillende instrumenten om van ruwe satelliet gegevens naar een inschatting van de oppervlaktetemperatuur te komen.
- De systematische verschillen t.g.v. andere overpass tijden. De meest relevante instrumenten

voor deze toepassing bevinden zich immers aan boord van heliosynchrone satellieten, waardoor die ongeveer een vast dagelijks tijdstip hebben waarop ze voorbijvliegen. Bij verschillende instrumenten kunnen die tijdstippen variëren, waardoor een systematisch verschil ontstaat tussen de temperatuurwaarden.

Momenteel zijn de HIP en HIA indicatoren volledig afgeijkt met hun drempelwaarden op de MODIS data van zowel het EOS-Terra instrument als het EOS-Aqua instrument. Het aanpassen van de indicatoren aan data van nieuwe satellieten om een continue en consistente tijdsreeks van de indicatoren te garanderen is niet iets wat op triviale wijze gedaan kan worden en dient best binnen een onderzoeksproject bekeken te worden.

Tenslotte dienen we nog de dynamiek van de oppervlaktetemperatuur te vermelden als mogelijke hinderpaal voor de interpretatie van de indicatoren. De oppervlaktetemperatuur is sterk afhankelijk van de toestand van de bodem en vooral de waterinhoud. Gezien water een hoge warmte capaciteit heeft, zal het slechts traag opwarmen. Omgekeerd zal een bodem met een lage waterinhoud (zoals vb. dorre zandgrond aan het einde van de zomer of een lange droogte) aanleiding geven tot hogere oppervlaktetemperaturen (Hawkins et al, 2004; Carnahan and Larson, 1990), zelfs hoger dan in een stedelijke omgeving. De vraag stelt zich dan uiteraard wat we precies bekijken met onze Hot Island Indicator.

Al deze moeilijkheden en caveats m.b.t. oppervlaktetemperatuur en hitte-indicatoren op basis van satelliet gegevens werpen twijfel over de geschiktheid van dergelijke data voor het opstellen van stabiele indicatoren. Het is echter wel zo dat satelliet opnames één groot voordeel hebben, met name het feit dat de temperatuurdata ruimtelijk expliciet is.

Hierdoor is toch voorzichtig gekozen voor het opstellen van een pragmatische indicator die een eenvoudige maat geeft voor de grootte van het oppervlakte hitte eiland in elke stad. Door het vasthouden aan gelijke drempelwaarden voor alle steden stelt de indicator ons in staat om de grootte van het oppervlakte hitte eiland tussen de steden onderling te vergelijken. De indicator is ook zo opgebouwd dat de zeer warme jaren, zoals de zomers van 2006 en 2003 eruit springen.

De HIP en HIA indicatoren zijn gebaseerd op maandgemiddelde oppervlaktetemperaturen. Dit werd als compromis naar voren geschoven tussen de beperkte bedekkingsgraad van individuele opnames (waar nogal vaak ontbrekende pixels t.g.v. wolkenbedekking aanwezig kunnen zijn) en jaargemiddelden anderzijds die veel van de dynamiek van de oppervlaktetemperaturen uitmiddelen. De keuze voor berekening op basis van maandgemiddelden wordt ondersteund door gelijkaardig werk uit de literatuur (Schwarz et al, 2011).

2 Datakwaliteit, methodekwaliteit en mogelijke verbeteringen

In vorige sectie gaven we reeds een aantal problemen aan die intrinsiek verbonden zijn met het gebruiken van satelliet data bij de afleiding van indicatoren, zeker wanneer die over een lange periode wenst te gebruiken. Hieronder geven we een lijst van enkele mogelijke verbeteringen waar kan over na gedacht worden:

- Het in rekening brengen van meerdere instrumenten voor het afleiden van de oppervlaktetemperatuur. Zo zijn er momenteel nog een aantal satelliet sensoren in omloop met thermisch infrarode sensoren waarmee de oppervlaktetemperatuur bepaald kan worden. Het meenemen van meerdere sensoren bij het opstellen van een indicator zou ervoor zorgen dat de dataset robuuster wordt t.o.v. wijzigingen in of het wegvallen van individuele sensoren. Het is echter wel zo dat het consistent verwerken van data van meerdere instrumenten een tijdrovende en dure aangelegenheid is, gezien niet voor elk instrument kant en klare oppervlaktetemperatuurproducten beschikbaar zijn.
- Het verhogen van de ruimtelijke resolutie van de oppervlaktetemperatuurdata waarmee de indicatoren worden afgeleid. Het is zo dat de oppervlaktetemperatuurdata op 1 km ruimtelijke resolutie voor kleinere steden/gemeenten misschien relatief grof is. Het verhogen van de ruimtelijke resolutie door middel van bv. NDVI data afgeleid van de MODIS sensor zou ons in staat stellen de indicator te baseren op een rooster met een resolutie van een 300-tal m i.p.v. 1 km.

- Het bestuderen van de bias geïntroduceerd door de intrinsieke beperking dat satelliet data enkel beschikbaar is bij wolkenvrije condities.
- Het bestuderen van de relatie tussen oppervlaktetemperatuur en gezondheidseffecten, energie consumptie etc. om het ruimtelijk expliciete aspect van satelliet data aan meer relevantere impacts te kunnen koppelen dan enkel het in kaart brengen of het afleiden van de grootte van het oppervlakte hitte eiland, zoals momenteel met de indicatoren gebeurt.
- Het bijwerken van de kaart met bevolkingsaantallen voor de HIP indicator. De gebruikte kaart met de bevolkingsaantallen baseert zich op de 2001 volkstellingen, waarvan de gegevens bij Eurostat beschikbaar zijn en waarmee men aan de hand van de CORINE landgebruiksdataset bevolkingsaantallen in een 100x100 m rooster inschatte voor gans Europa. Die disaggregatie kan op schaal van Vlaanderen veel nauwkeuriger worden uitgevoerd en eventueel frequenter worden bijgewerkt.

3 Internationale vergelijkbaarheid

De voorgestelde indicatoren worden bij ons weten niet internationaal gebruikt. De definitie ervan is echter wel generiek. De indicatoren zijn losweg gebaseerd op (Schwarz et al, 2011) , waar ook duidelijk wordt aangegeven dat de kwantificatie van oppervlakte hitte eilanden d.m.v. indicatoren toch heel wat moeilijkheden heeft inzake stabiliteit en verschillen afhankelijk van de exacte definitie van de indicator.

In elk geval kunnen de HIP en HIA indicatoren makkelijk worden berekend voor elk gebied waarvoor een landgebruikskaart en een bevolkingsdichtheidskaart beschikbaar is. De definitie van de T_{dag} en T_{nacht} drempelwaarden op basis van percentielwaarden zorgt ervoor dat de indicator wordt afgeijkt op de locatie waarvoor hij is opgesteld, wat een directe vergelijking tussen steden (ook buiten België) mogelijk maakt. Het is echter zo dat we dan opnieuw dienen te analyseren wat de impact is van bv. een systematische bias die door bewolking of door een ander opname tijdstip geïntroduceerd wordt.

Bij het opstellen van de indicatoren zijn echter wel verschillende aspecten opgenomen die gepubliceerd zijn in internationale wetenschappelijke tijdschriften. Zo vermeldden we reeds de vergelijkende studie van SUHI indicatoren van Schwarz et al, (2011). Daarnaast volgden we ook het voorbeeld van Zhou et al, (2013) voor het aflijnen van het ruraal gebied rond elke stad, om echter wel tot de conclusie te komen dat een bufferstraal die een verdubbeling van het oppervlak van het stedelijk gebied inhoud niet geschikt is voor een sterk verstedelijkt gebied zoals Vlaanderen (zie analyse rapport).

Referenties

- Carnahan W.H.; Larson R.C. An analysis of an urban heat sink. *Remote Sensing of Environment* 1990, 33(1), 65-71.
- Gallego F.J., A population density grid of the European Union, *Population and Environment*. 2010, 31, 460-473.
- Hawkins, T. W.; Brazel, A. J.; Stefanov, W. L.; Bigler, W.; Saffell, E. M. The Role of Rural Variability in Urban Heat Island Determination for Phoenix , Arizona. *J. Appl. Meteorol.* 2004, 43, 476–486.
- Schwarz, N.; Lautenbach, S.; Seppelt, R. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures. *Remote Sens. Environ.* **2011**, 115, 3175–3186.
- Zhou, B.; Rybski, D.; Kropp, J. P. On the statistics of urban heat island intensity. *Geophys. Res. Lett.* **2013**, 40, 5486–5491.

Verantwoordelijke MIRA: Johan Brouwers (j.brouwers@vmm.be)

Laatst gewijzigd: 4 november, Bino Maiheu (bino.maiheu@vito.be)

ANNEX 8 Methodefiche indicator 'MODELLERING'

Doel van deze methodefiche:

- verankering van de methode van de indicator als wetenschappelijke onderbouwing;
- beschikbaar maken van de methode binnen het MIRA-team en de betrokken auteurs onafhankelijk van personen (die komen en gaan);
- beschikbaar maken van de methode aan derden in kader van indicatorenoverleg (verantwoording, afstemming, verbetering).

Bijkomende uitleg over de gevraagde info, staat in het begeleidend document

Stedelijke klimaatmodellering voor Vlaanderen

TECHNISCHE INFORMATIE

1 Specificatie van de indicator

1 Definitie	Deze indicator beschouwt de ruimtelijke variatie in temperatuur in en rond steden in Vlaanderen tijdens hittegolven op basis van stedelijke klimaatmodellering. Dit gebeurt over langere klimatologische periodes voor het recente verleden (2000) en voor mogelijke scenario's voor de toekomst (2060). Daarvoor wordt, voor de periode april-september van het beschouwde jaar, eerst bepaald op welke dagen zich een hittegolf voordoet volgens de definitie van de FOD Volksgezondheid. Voor die dagen wordt dan de som genomen van de overschrijdingen van de dagelijkse maximumtemperatuur boven de drempel van 29,6 °C, samengeteld met de som van de overschrijdingen van de dagelijkse minimumtemperatuur boven de drempel van 18,2 °C.
2 Eenheid	°C dag
3 Geografische dekking	De modelgebaseerde resultaten verstrekken het hele Vlaamse grondgebied, hierin voor zowel de verschillende steden als platteland
4 Sectoriële dekking	-
5 Basisjaar, frequentie, beschikbaarheid	<ul style="list-style-type: none">• Basisjaar: 2000• Frequentie: twee maal, nl. voor de periode 2000-2010 en voor de periode 2060-2070• Beschikbaarheid: deze indicator is nu beschikbaar gesteld voor beide periodes. Deze kan herberekend worden als nieuwe modelresultaten beschikbaar worden.
6 Plaats in de verstoringsketen	D P S I R

2 Methodologische beschrijving

Deze beschrijving bevat bij voorkeur:

- een stapsgewijze beschrijving van de gebruikte methode (hoe komt de indicator tot stand?);
- type methode met uitleg; per stap of voor het geheel;
- literatuurreferentie (indien noodzakelijk voor begrip van de methode);

2.1 Stedelijke klimaatmodellering (SKM)

De sterkte van het hitte-eilanden voor de steden in Vlaanderen wordt berekend op basis van de luchttemperatuur verkregen uit stedelijke klimaatmodellering op 2,8 km resolutie. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een Europees regionaal klimaatmodel COSMO-CLM (Rockel et al., 2008). Hierbij heeft de oppervlaktemodule TERRA-ML (Grasselt et al., 2008) een aantal aanpassingen ondergaan om de aanwezigheid van steden in rekening te brengen, wat resulteert in het landoppervlak-model TERRA-URB (Wouters et al 2015a, 2015b). Bij dat laatste wordt enerzijds rekening gehouden met het stedelijk weefsel, wat gekarakteriseerd wordt door een vermindering in vegetatie t.o.v. van de directe natuurlijke omgeving en door de aanwezigheid gebouwen en straten (hierna genoemd 'versteningsgraad'). Anderzijds wordt ook de hitte-emissie naar de atmosfeer vanwege menselijke activiteiten in rekening gebracht (niet te verwarren met CO₂-emissie). Zodoende kan de stedelijke impact vanwege de versteningsgraad en de hitte-emissie op het lokale klimaat en de daaruit volgende stedelijke hitte-eilanden op hoge resolutie worden gesimuleerd.

De ruimtelijke fluctuatie in twee-meter temperatuur wordt berekend op een horizontaal grid van 2,8 km resolutie. Hierbij wordt per gridcel de energiebalans van enerzijds versteende oppervlakken - bestaande uit straten en gebouwen - en anderzijds deze van de natuurlijke oppervlakken met plantenbegroeiing apart berekend. De versteende oppervlakken krijgen een aantal specifieke toepasselijke eigenschappen toegewezen m.b.t. de zonnestraling en infraroodstraling, warmtecapaciteit en warmtegeleiding, oppervlakteruwheid, wateropslag en efficiëntie van warmte-uitwisseling tussen het oppervlak en de atmosfeer. Deze eigenschappen staan in contrast met deze voor natuurlijke oppervlakken die overigens bestaan uit water-doordringbare oppervlakken met plantenbegroeiing. Om de heterogeniteit van het stedelijk weefsel in rekening te brengen, wordt gebruik gemaakt van een 'tile'-benadering. Hierbij wordt rekening gehouden met zowel de versteende fractie als natuurlijke fractie van iedere gridcel. De respons in termen van uitwisseling van energie en waterdamp tussen het landoppervlak en de atmosfeer wordt voor beide fracties gewogen volgens hun oppervlaktepercentage.

Om te verhelpen aan de systematische modelfouten waaraan regionale klimaatmodellering in het algemeen onderhevig is, wordt op de ruwe modeldata een aantal modelcorrecties doorgevoerd. Dat is nodig omdat de hierna genoemde uitkomsten van de stedelijke hitte-indicator hiervoor sterk gevoelig is. Enerzijds wordt de modelfout op de achtergrondtemperatuur in natuurlijke gebieden gecorrigeerd aan de hand van de observatiedataset E-OBS beschikbaar op Europese schaal. Anderzijds wordt er gecompenseerd voor de 25 % onderschatting voor de intensiteit van de stedelijke hitte-eilanden. Hierdoor kan het temperatuurcontrast tussen stad en platteland op een nauwkeurigere wijze worden gereproduceerd.

Gezien de heterogeniteit van het stedelijk weefsel is het verkrijgen van een luchttemperatuur uit in-situ metingen representatief voor het betreffende stedelijk gebied geen sinecure. Het voordeel van stedelijke klimaatmodellering is dat er nu slechts één twee-meter temperatuur is die representatief is voor de versteende oppervlakken van een bepaalde gridcel die een bepaald stadsgedeelte bestrijkt. Het nadeel echter is dat mogelijke temperatuurfluctuaties rond de gebouwen niet kunnen gerepresenteerd worden in SKM, waarvoor eigenlijk een veel hogere resolutie nodig is. Zo zullen bijvoorbeeld de hogere temperaturen aan de zonzijde van gebouwen en de lagere temperaturen aan de schaduwzijde niet worden voorgesteld in het SKM.

Een voordeel t.o.v. in-situ metingen is dat we de temperatuur voor uitgestrekte gebieden zoals Vlaanderen in zijn geheel kunnen gaan bekijken. Met SKM kunnen we op eenvoudige manier de gebieden gaan classificeren volgens de versteningsgraad, waarvoor men afzonderlijk een aantal

temperatuurstatistieken kan berekenen. Voorts is een SKM in staat om op voor langere klimatologische periodes de temperaturen te gaan berekenen. Er moet wel opgemerkt worden dat in-situ metingen noodzakelijk zijn om de kwaliteit van het SKM te evalueren en te verbeteren. Een SKM wordt vervolgens aangewend voor het doorrekenen van scenario's voor stedelijke uitbreiding en mondiale klimaatverandering. Zo kunnen een aantal tendensen van temperatuur en hittestress voor de toekomst bekeken worden in steden en op het platteland.

2.2 Berekening van de indicator

De berekening van de stedelijke hitte-indicator gebaseerd op SKM verloopt op een analoge manier als deze gebaseerd op in-situ metingen. De stedelijke hitte-indicator beschouwt hierbij zowel de duur als het gewicht van een hittegolf, en doet dit in eerste instantie apart voor de stedelijke en rurale locaties.

De berekening van de indicator verloopt in drie stappen:

(i) Op basis van de 15-minuutswaarden van gemodelleerde luchttemperatuur worden dagelijkse minimum (T_{\min}) en maximum (T_{\max}) temperaturen berekend voor iedere gridcel van het domein in Vlaanderen. Dit gebeurt apart voor de temperatuur boven versteende en natuurlijke oppervlaktefractie van iedere gridcel van het horizontaal grid van 2,8 km resolutie. De periode gaat van 1 april om 00:00 tot 30 september om 23:45. De tijd wordt uitgedrukt in UTC+2, wat overeenkomt met de lokale tijd in België gedurende de zomerperiode.

(ii) Vervolgens wordt bepaald welke dagen deel uitmaken van een hittegolf. Hierbij gaan we analoog te werk als de indicator gebaseerd op in-situ metingen.

(iii) Analoog als voor de in-situ metingen worden voor alle hittegolfdagen de overschrijdingen van de minimum en maximum temperaturen boven de drempelwaarden van respectievelijk 18,2 °C en 29,6 °C opgeteld in de 'hittegolf graaddagen':

$$HGD = \sum_i \left[(T_{\min,i} - 18.2 \text{ °C})^+ + (T_{\max,i} - 29.6 \text{ °C})^+ \right] h_i,$$

waarbij de som loopt over alle dagen i van de periode 1 april tot 30 september van het beschouwde jaar. De '+' symbolen die als superscript gebruikt worden wijzen erop dat enkel positieve argumenten (van hetgeen tussen ronde haakjes staat) in rekening worden gebracht; negatieve argumenten dragen niet bij tot de som. Dit wordt apart berekend voor het versteende en het natuurlijke oppervlaktefractie.

In wat hierna volgt zal onderscheid gemaakt worden tussen een '**in-situ**'-indicator, een '**ruimtelijke**' indicator, een '**omgevings**'-indicator en een '**klimatologische**' indicator.

- De '**in-situ**'-indicator berekent enerzijds het aantal gemodelleerde HGD voor de versteende oppervlakken van een gridcel die zich bevindt in het centrum een stad, en anderzijds deze voor de natuurlijke oppervlakken van een gridcel in een ruraal gebied in de omgeving van die stad. Dit benadert de stedelijke hitte-stress indicator gebaseerd op in-situ metingen, bijvoorbeeld die voor Antwerpen: de modelgebaseerde HGD komen hierbij respectievelijk overeen met deze zoals gemeten boven een gebouw in de stad, en met deze gemeten voor een grasveld buiten de stad. Net zoals voor de indicator gebaseerd op de in-situ metingen worden op jaarbasis de HGD voor elke locatie voorgesteld op één grafiek. Zo komt de bijkomende hitte-stress vanwege het hitte-eiland tot uiting. De in-situ indicator wordt gebruikt om enerzijds het SKM model te gaan evalueren met in-situ metingen in termen van stedelijke hittestress, alsook om de indicator voor het verleden te gaan reconstrueren alsof hij gemeten zou worden door de in-situ metingen. Hierbij worden de gridcellen voor enerzijds de stad en anderzijds het natuurlijk gebied gekozen zodat zij overeen komen met de locatie van de in-situ metingen.

- Om de gemiddelde ruimtelijke variatie van de hittestress over uitgestrekte gebieden zoals Vlaanderen te kunnen visualiseren, definiëren we de **'ruimtelijke'-indicator**. Hierbij wordt voor iedere gridcel van het modeldomein de HGD berekend voor zowel de versteende oppervlakken en de natuurlijke oppervlakken in het SKM. Vervolgens wordt een gewogen gemiddelde van de HGD berekend volgens de versteende en natuurlijke fractie voor elk van de gridcellen. Voor de ruimtelijke visualisatie gaat men voor iedere gridcel het 10-jarig gemiddelde nemen. Dit doet men voor zowel een tienjaarlijkse simulatie uit het recente verleden (Brisson et al 2014a,b), als voor de scenario's voor de toekomst m.b.t. mondiale klimaatsverandering (van Lipzig en Willems, 2015) en stedelijke expansie in termen van landgebruik (Acosta-Michlik et al., 2011) en energieverbruik (Flanner, 2009).
- De temperatuur en hittestress hangt sterk af van in welke soort omgeving men zich bevindt. Daarvoor zullen we een **'omgevings'-indicator** definiëren die de SKM gridcellen over het Vlaams grondgebied opdeelt volgens de huidige versteningsgraad van de omgevende 100 km². Hierbij beschouwen we drie omgevingscategorieën, nl. stedelijke (verstening groter of gelijk aan 50 %) licht-stedelijke (verstening tussen 25 % en 50 %) en natuurlijke gebieden (verstening lager dan 25 %). Voorts berekent men voor elk van de gridcellen de 'ruimtelijke' indicator voor ieder jaar apart. Vervolgens wordt voor elk van de categorieën de gemiddelde HGD over gridcellen heen berekend. Deze getallen worden voor elk van de categorieën (elk een andere kleur) samen in een grafiek gezet voor elk van de jaren (positie op de X-as). Zodoende komt de invloed van versteningsgraad op de hittestress tot uiting.
- De **'klimatologische' indicator** heeft als doel om voor langere periodes voor het heden en voor toekomstige scenario's de klimatologisch gemiddelde hittestress voor Vlaanderen te gaan beschouwen, alsook de variatie over de jaren heen. Hiervoor berekenen we eerst voor ieder jaar de 'omgevings'-indicator van hierboven, dus met dezelfde indeling van het Vlaams grondgebied volgens de versteningsgraad. Vervolgens berekenen we hieruit voor elk van de omgevingscategorieën apart de gemiddelde HGD over de jaren heen, alsook hun 16^e en 84^e percentielen. De gemiddelde (als bolletjes) en percentielen (als onder -en bovenzlaggen) worden op een grafiek uitgezet voor elk van de categorieën (elk een andere kleur), én voor elk van de klimatologische periodes (elk een andere plaats op de X-as). Zodoende verkrijgt men voor de verschillende mogelijke toekomstige scenario's een aantal klimatologische tendensen voor stedelijke hittestress in termen van gemiddelde jaarlijkse HGD en de variatie hierop.

KWALITEIT VAN DE INDICATOR

1 Verantwoording indicatorkeuze en mogelijke verbeteringen

De optimale indicator zou er één zijn die de actuele blootstelling van de bevolking weergeeft, rekening houdend met het dagelijkse verplaatsingspatroon van individuen doorheen de verschillende jaren heen, en die verder gebruik maakt van locatie-specifieke (binnen- en buitenshuis, versteende omgeving of natuurlijke omgeving ...) meteorologische informatie, waaronder temperatuur, vochtigheid, windsnelheid, kort- en langgolvlige stralingsbelasting. Om inzicht te krijgen in het stedelijk effect zou men dan met verschillende cohorten kunnen werken, bijvoorbeeld bestaande uit mensen die in de stad wonen, mensen die landelijk wonen, en pendelaars die overdag in de stad komen, maar buiten de stad wonen (en eventueel andersom), en andere groepen zoals toeristen. Echter, om tot zo'n indicator te komen is er nog veel onderzoek nodig; verder zijn er ook een hoop praktische belemmeringen om die te implementeren.

Omdat we weten dat in steden meer mensen wonen en vertoeven dan op het platteland, wordt in de 'omgevings'-indicator en de hierop gebaseerde 'klimatologische' indicator onderscheid gemaakt tussen stedelijke (waar dus veel mensen wonen), lichtstedelijke en natuurlijke gebieden (waar weinig mensen wonen).

Een mogelijke verbetering op de indicator is dat we effectief gaan rekening houden met hoeveel mensen er in iedere gridcel van het SKM-domein wonen en vertoeven. Voorts zouden we kunnen

bepalen welk deel van de mensen binnen een bepaalde gridcel zich in een al dan niet versteende omgeving wonen. Dat is nodig gezien de verschillen in temperaturen boven de versteende versus natuurlijke oppervlaktefracties van een bepaalde gridcel. Voor het berekenen van een hitte-stress indicator voor de hele Vlaamse bevolking zou men de uitmiddeling kunnen doen per fractie op gridcel niveau, en per gridcel op Vlaams niveau. Hiervoor moet een methode ontwikkeld worden om bevolkingskaarten met versteningskaarten te gaan combineren. Wat betreft de toekomstige scenario's bestaat het het bijkomend probleem dat we niet weten hoe de bevolking zich in de toekomst over het Vlaamse landschap zal verspreiden.

Er moet opgemerkt worden dat de hitte-stress indicator gebaseerd op hoe hittegolven in onze contreien binnen ons huidige klimaat een impact hebben op het welbehagen en gezondheid van de bevolking. Hiervoor werden vaste drempelwaarden van 18,2 °C (minimum temperatuur) en 29,6 °C (maximum temperatuur) volgens de FOD volksgezondheid. Enerzijds tonen onze toekomstige scenario's voor stedelijke uitbreiding en klimaatverandering aan dat met het gebruik van deze vaste drempelwaarden het aantal hittegolf graaddagen mogelijk veel hoger wordt in de toekomst dan momenteel het geval is. Anderzijds is het mogelijk dat hittegolven met de klimaatverandering anders zullen ervaren worden in de toekomst. Het aantal hittegolf graaddagen zal hierdoor mogelijks anders moeten berekend worden in de toekomst, bijvoorbeeld door hogere drempelwaarden in te stellen. Hierbij is het nuttig aan te halen dat de huidige drempelwaarden komen overeenkomen met de 95^e percentiel van de dagwaarden voor de maanden juni-juli-augustus van de periode 1975-2004, voor het KMI station van Ukkel (zie FOD Volksgezondheid (2014)). Voor een gelijkaardige periode in de toekomst zullen de 95^e percentielen voor de dagwaarden mogelijks tot hogere drempelwaarden leiden. Het is echter niet duidelijk in welke mate de bevolking in staat is om zich aan te passen aan het veranderende klimaat. Daarom werd gekozen voor voorlopig dezelfde huidige vaste drempelwaarden voor de indicator in te stellen, zowel voor heden en als voor de toekomst.

2 Datakwaliteit, methodekwaliteit en mogelijke verbeteringen

De SKM slechts een benadering is van de realiteit. De kwaliteit van de data hangt af van welke processen in rekening gebracht worden, en hoe deze worden geïmplementeerd in het SKM. Zo worden in-situ metingen gebruikt worden om de kwaliteit van het SKM te evalueren. Op basis van de in-situ metingen worden dan ook modelverbeteringen aangebracht voor een nog betere SKM. Hierbij kunnen in-situ metingen voor steden van verschillende grootte helpen om het effect van stadsgrootte op de stadklimaat in het SKM te gaan evalueren. Hoe groter het netwerk van in-situ metingen, des te groter de kwaliteit kan worden van het SKM.

Gezien de complexiteit van atmosferische modellen zoals het gebruikte SKM gebeuren zulke modelontwikkelingen en verbeteringen in een internationale context. Onder meer wordt momenteel gewerkt naar een 'standaard' stedelijke parameterisatie binnen het internationaal consortium van het gebruikte regionale klimaatmodel, wat zal gebaseerd zijn op de huidige stedelijke parameterisatie. Er wordt verwacht dat deze opdracht gepaard zal gaan met een aantal verbeteringen m.b.t. stedelijke klimaatmodellering.

3 Internationale vergelijkbaarheid

De voorgestelde stedelijke hitte-stress indicatoren worden niet internationaal gebruikt. Ze zijn immers gebaseerd op de definitie van een hittegolf van de FOD Volksgezondheid, en met name de drempelwaarden voor temperatuurminima en -maxima, uniek voor België. Omdat het echter om een officiële Belgische definitie gaat, lijkt het passend om deze drempelwaarden te gebruiken. Tegelijk zal op internationaal niveau moeten gestreefd worden naar een hitte-stress indicator die voor de verschillende regionen toepasbaar is voor zowel heden als de toekomst. Hierin zijn reeds internationale initiatieven ondernomen, bv. het opstellen van een indicator die op pan-Europees niveau toepasbaar is, zoals het EuroHEAT project (d'Ippoliti et al., 2010). Deze is echter verschillend voor zowel wat betreft de formule als de drempelwaarden. Het opstellen van specifieke regionale hitte-stress indicatoren zijn echter ook een belangrijke schakel. Dit geeft immers aan welke weersomstandigheden worden ervaren als hittegolven binnen een bepaalde socio-economische en klimatologische context. De analyse van de stedelijke hitte-stress indicatoren voor Vlaamse steden voor nu en de toekomst doet dan ook dienst binnen de internationale context.

Referenties

- Acosta-Michlik, L., B. Henry de Frahan, H. Brunke, K. Hansen, G. Engelen, I. Uljee, A. Van Herzele, M. Rounsevell, R. White, 2011. A Multiscalar and Multiagent Modelling Framework for Assessing Sustainable Futures in a Globalised Environment (MULTIMODE). Final Report. Brussels: Belgian Science Policy 2011 – 79 p. (Research Programme Science for a Sustainable Development).
- Brisson, E., Demuzere, M., van Lipzig, N.P.M., 2014a. A study on modelling strategies for performing convective permitting climate simulations using the COSMO-CLM over a mid-latitude coastal region. Minor review in *Meteorologische Zeitschrift*.
- Brisson, E., S. Saeed., N. P. M. van Lipzig, 2014b. How well can a convection permitting model reproduce decadal statistics of precipitation, temperature and cloud characteristics? (in voorbereiding).
- Engelen, G., Van Esch L., Uljee, I., De Kok, J-L., Poelmans L., Gobin, A., & van der Kwast, H. 2011b, 'RuimteModel: Ruimtelijk-Dynamisch landgebruikmodel voor Vlaanderen' Eindrapport december 2011, 256 p.
- Flanner, M. G. (2009) Integrating anthropogenic heat flux with global climate models, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L02801, doi:10.1029/2008GL036465.
- FOD Volksgezondheid (2014). Hittegolf- en ozonpiekenplan. Beschikbaar via http://www.health.belgium.be/filestore/8108413/plan%20HOP_NL2014.pdf (deze link was actief op 6 oktober 2014).
- Grasselt, R., 2008. Validation of TERRA-ML with discharge measurements. *Meteorologische Zeitschrift* 17 (6), 763–773.
- Rockel, B., A. Will, A. Hense, 2008. The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift* 17 (4), 347–348.
- van Lipzig, N. P. M. & P. Willems, 2015. Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, KU Leuven i.s.m. KMI. Dit rapport komt medio 2015 beschikbaar op www.milieurapport.be.
- Wouters, H., De Ridder, K., Demuzere, M., Lauwaet, D., & van Lipzig, N. P. M., 2013. The diurnal evolution of the urban heat island of Paris: a model-based case study during Summer 2006. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 8525–8541, doi:10.5194/acp-13-8525-2013.
- Wouters, H., M. Demuzere, K. De Ridder, N. P. M. van Lipzig, 2015a. The impact of impervious water-storage parametrization on urban-climate modelling. *Urban Climate* 11 (1), 24–50, doi:10.1016/j.uclim.2014.11.005.
- Wouters, H., M. Demuzere, K. De Ridder, U. Blahak, N. P. M. van Lipzig, 2015b. Modelling the seasonal dependency of the contributions to urban heat islands in Belgium (insturing voorzien begin 2015).

Verantwoordelijke MIRA: Johan Brouwers (j.brouwers@vmm.be)

Laatst gewijzigd: 12.1.2015, Hendrik Wouters