

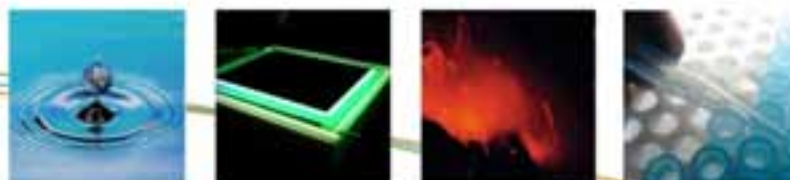
Eindrapport

Opmaak van een hittekaart en analyse van het stedelijk hitte-eiland effect voor Antwerpen

Dirk Lauwaet, Bino Maiheu, Joris Aertsens, Koen De Ridder

Studie uitgevoerd in opdracht van: Stad Antwerpen
2013/RMA/R/352

December 2013



VITO NV

Boeretang 200 - 2400 MOL - BELGIE
Tel. + 32 14 33 55 11 - Fax + 32 14 33 55 99
vito@vito.be - www.vito.be

BTW BE-0244.195.916 RPR (Turnhout)
Bank 375-1117354-90 ING
BE34 3751 1173 5490 - BBRUBEBB

RMA/N7817/2013

VERSPREIDINGSLIJST

Griet Lambrechts, Stad Antwerpen
Iris Gommers, Stad Antwerpen
Johan De Herdt, Stad Antwerpen
Pieter Beck, Stad Antwerpen
Gert Van Oost, Stad Antwerpen
Bino Maiheu, VITO
Koen De Ridder, VITO
Dirk Lauwaet, VITO
Stijn Janssen, VITO

WOORD VOORAF

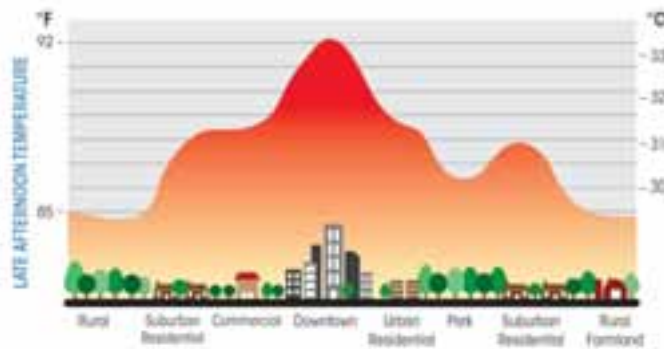
Dit rapport bevat de analyse van het stedelijk hitte-eiland effect en het voorkomen van hittestress in Antwerpen. De hoofdstukken 1 t.e.m. 5 beschrijven in detail een experimentele meetcampagne die heeft plaatsgevonden tijdens de zomer van 2013, een analyse van de oorzaken van de geobserveerde temperatuurpatronen, een modelleerstudie aan de hand van het URBCLIM stedelijk klimaatmodel en de verwerking van een aantal satellietopnames van de oppervlaktetemperatuur in en om de stad om het hitte-eilandeffect in Antwerpen in beeld te brengen. Verder bevat het rapport in de hoofdstukken 6 t.e.m. 8 een literatuurstudie over de potentiële impacten van het stedelijk warmte-eiland, een kwetsbaarheidsonderzoek en een toekomstprojectie. Hoofdstuk 9 tenslotte bevat onze beleidsaanbevelingen omtrend het stedelijk hitte-eiland in Antwerpen.

Gezien dit rapport relatief lijvig en de beschrijving technisch van aard is, is hierna eerst een samenvatting van het werk opgenomen met verwijzingen naar de relevante stukken in de uitgebreide rapportage.

SAMENVATTING

Dirk Lauwaet - VITO

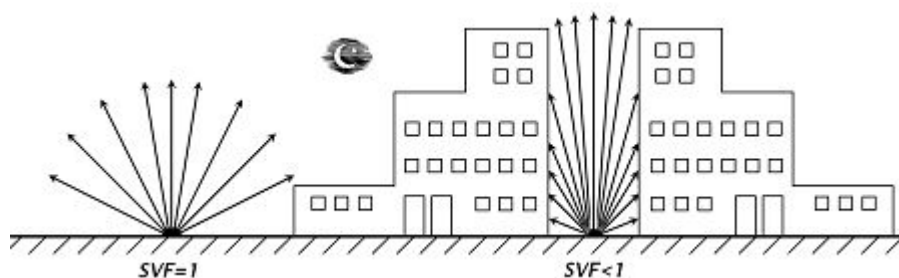
Het is gekend dat het in een stedelijke omgeving vooral 's avonds flink warmer kan zijn dan op het platteland. We spreken van een stedelijk hitte-eiland effect (SHE-effect). Aan de basis hiervan



Bron: <http://www.cleanairpartnership.org/files/urbanheatisland.jpg>

liggen een aantal oorzaken die goed gekend zijn in de literatuur. Allereerst is het zo dat steden gekenmerkt worden door een zeer groot aandeel aan beton, asfalt, natuursteen, Deze materialen hebben een hoge warmtecapaciteit en slaan dus meer warmte op die dan 's nachts terug wordt vrijgegeven. Maar niet alleen de karakteristieken van de bouwmaterialen spelen een rol. Een tweede belangrijke oorzaak is een

verlaagde aanwezigheid van vegetatie in de stedelijke omgeving en de grote hoeveelheid verharde oppervlakken. Hierdoor kan er veel minder water verdampen. De beschikbare energie voor het verdampen van water (waardoor de luchttemperatuur niet verhoogt), komt dus vrij voor het opwarmen van het oppervlak en de lucht erboven. Ook de stedelijke geometrie speelt een belangrijke rol. Doordat in een stedelijke omgeving de gebouwen het vrije zicht naar de hemel vanaf de grond blokkeren (men spreekt van een lage *sky view factor*), kan het oppervlak ook minder efficiënt energie verliezen door het uitzenden van thermische straling (Infra-Rood). De uitgezonden IR-straling blijft m.a.w. "gevangen" in het stedelijk weefsel en hierdoor koelt het minder vlug af 's avonds.



Bron : www.knmi.nl/klimatologie/weeramateurs/UHI/index.html

Maar niet alleen de geometrie hindert de uitgaande IR-straling, ook de verhoogde luchtverontreiniging (met name verhoogde CO₂ concentraties) kan bijdragen aan een soort van mini-broeikas-effect. De stedelijke geometrie op zich zorgt er dan ook nog voor dat minder zonnestraling gereflecteerd wordt. Het zonlicht verdwijnt als het ware in diepe street canyons, waaruit het minder makkelijk kan ontsnappen (en gereflecteerd worden m.a.w.). Diepe street canyons zien er dus van bovenaf gezien relatief donker uit. De gebouwen zorgen verder ook nog voor het afremmen van het windveld, waardoor er globaal gesproken minder ventilatie optreedt in stedelijk gebied. Ook dragen wij als mens bij tot het stedelijk hitte-eiland door onze activiteiten: verkeer (hete uitlaatgassen), airco, industrie etc...

Tijdens hittestress krijgt de volledige bevolking uiteraard te kampen met hittestress, een gevoel van onbehagen of gezondheidsproblemen met zelfs in extreme gevallen de dood tot gevolg. Het is

nu zo dat het stedelijk hitte-eiland effect die nefaste gevolgen van hittegolf episodes nog kan versterken doordat het minder afkoelt in steden. Dit surplus is voornamelijk voelbaar in de luchttemperatuur 's avonds en 's nachts. Maar ook de oppervlakte temperatuur, de temperatuur van de straatstenen, gevels etc... kent een duidelijk SHE – effect, weliswaar met een andere dynamiek.

In deze studie zullen beide vormen van het stedelijk hitte-eiland aan bod komen:

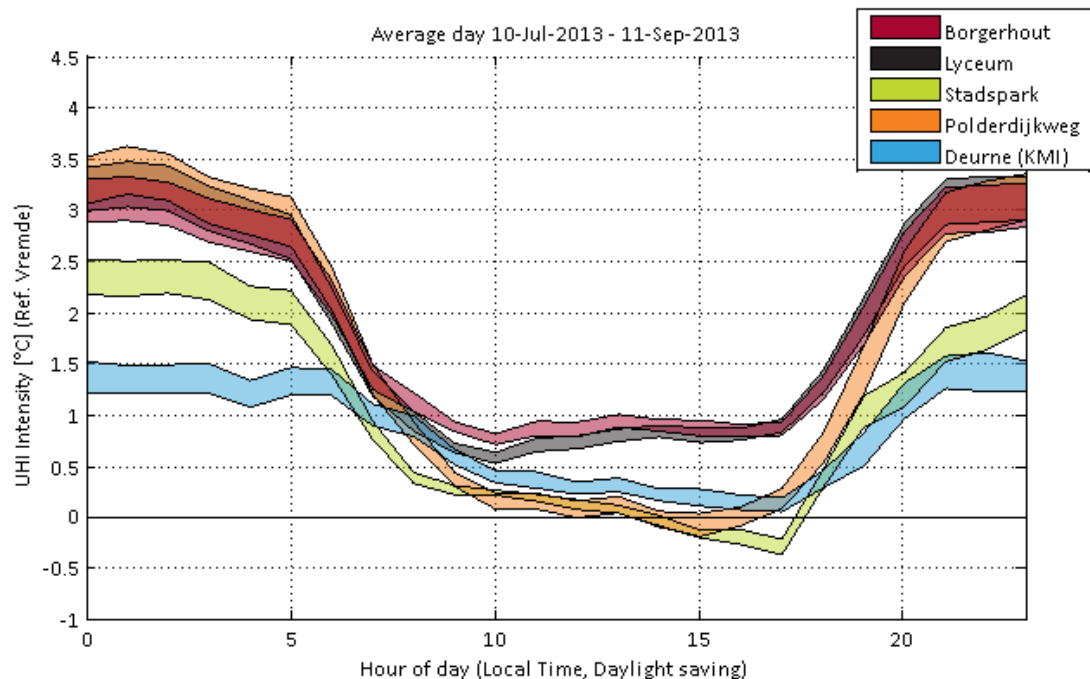
- het **Canopy Layer Urban Heat Island** (CLUHI), betreft het verschil in luchttemperatuur tussen de stad en het platteland nabij het oppervlak (typisch 2m hoogte) en is bepalend voor het thermisch welzijn van de bevolking: alle gebruikte indices (bv. van de Wereld Gezondheidsorganisatie WHO) die hitte linken aan gezondheidseffecten baseren zich hiervoor op de luchttemperaturen. Dit effect kent de grootste intensiteit 's avonds en 's nachts, en is klein of zelfs negatief overdag. Hoewel de opwarming van de oppervlaktematerialen aan de basis ligt van het CLUHI effect, kent dit laatste een beduidend minder uitgesproken ruimtelijke variatie door transport en menging in de atmosfeer. Het CLUHI effect wordt meestal door directe metingen vastgesteld, met name aan de hand van weerstations of mobiele metingen.
- het **Surface Urban Heat Island** (SUHI), met name de oppervlaktetemperatuur. Dit effect is direct gerelateerd aan de opwarming van de materialen in de stad door de zon en is het meest intens overdag. Afhankelijk van de warmtecapaciteit van de individuele gebruikte materialen in de stedelijke omgeving (beton, asfalt, roofing etc...) kunnen materialen sterk of minder sterk opwarmen, waardoor het SUHI een grote ruimtelijke variabiliteit vertoont. Het oppervlakte hitte eiland effect wordt meestal indirect via remote sensing (IR satellietsensoren) in kaart gebracht. De oppervlakte temperatuur kan gelinkt worden aan het thermisch comfort van de bevolking buitenshuis.

Experimentele meetcampagne – SHE effect luchttemperaturen in Antwerpen

Tijdens een experimentele meetcampagne werd in Antwerpen een duidelijk SHE effect vastgesteld. Op 2 locaties baat de VITO urban climate groep professionele meetstations uit: het Koninklijk lyceum in de Hertoginstraat (stedelijke locatie) en te Vremde op de bio-boerderij Van Leemputten (rurale locatie). Daarnaast werden er op 3 plaatsen bijkomende metingen verricht: in het stadspark naast de vijver (park locatie), aan de Plantin en Moretuslei te Borgerhout (een tweede binnenstedelijke locatie) en in de Antwerpse haven aan het einde van de Polderdijkweg (industriële locatie). Naast deze eigen metingen werd data aangekocht van externe partijen, ondermeer de metingen te Luchtbal en Zwijndrecht van de VMM en de KMI metingen op de luchthaven van Deurne. Op die manier hebben we betrouwbare data van 8 verschillende meetstations op diverse types van locaties in en om de stad.

A. Analyse eigen metingen

Onderstaande grafiek geeft het gemiddelde gemeten temperatuurverschil tussen de eigen stads- en havenmetingen en onze rurale meting aan de bio-boerderij te Vremde. Merk op dat het hier dus gaat om de gemiddelde zomerdag in 2013 (10 juli – 11 september).



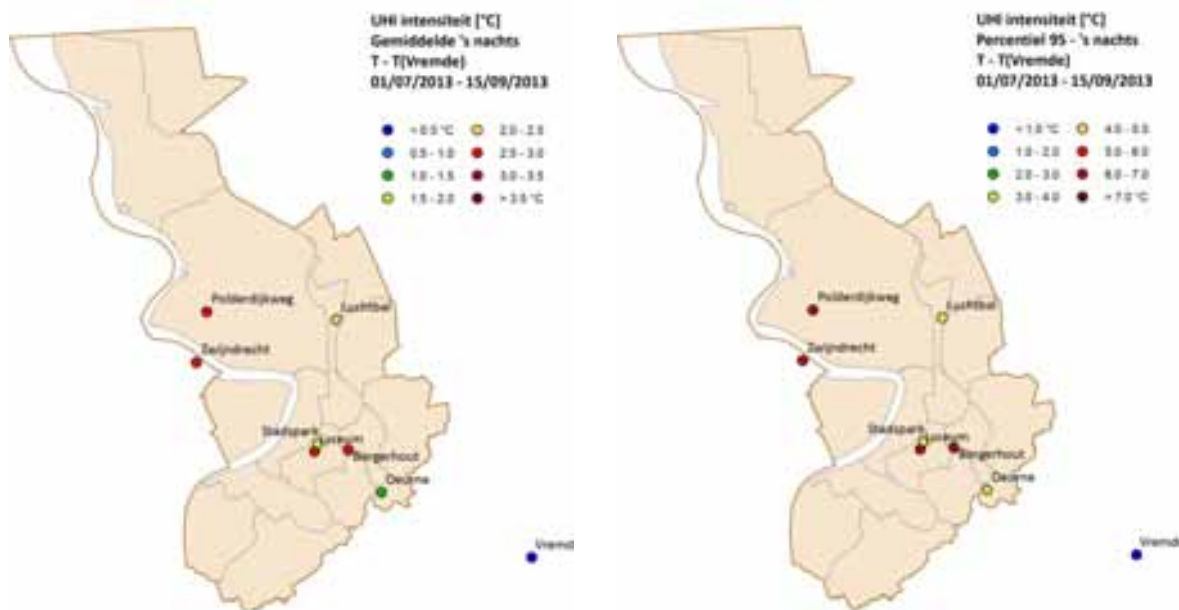
Voor zowel de typisch stedelijke stations in **Borgerhout** en het **Lyceum** als de meetsite in de haven zien we duidelijk een gemiddelde intensiteit van het SHE-effect, dat zijn maximum van **ongeveer 3.5 °C (gemiddeld over de zomerperiode)** kent rond middernacht. Het effect neemt af naar de ochtend toe en bereikt z'n minimum intensiteit in de voormiddag rond 10 h. De intensiteit blijft minimaal tot rond 18h, wanneer het warmte eiland effect opnieuw tot z'n volle ontwikkeling komt. Een analoog tijdsverloop zien we verder ook voor de metingen in het **Stadspark**, de intensiteit is weliswaar iets geringer, met een maximum in de gemiddelde dagcyclus van **2.5 °C (eveneens gemiddeld over de zomerperiode en rond middernacht)**. De luchthaven van **Deurne** is een meer open locatie, buiten de stad gelegen, en dat vertaalt zich in een veel kleiner SHE-effect, dat maximaal **1.5°C** bedraagt.

Naast deze gemiddelde dagcyclus werden duidelijk ook **enkele pieken tot meer dan 8°C** in de nachtelijke hitte-eiland intensiteit **tussen de boerderij in Vremde en Antwerpen-centrum** vastgesteld. Dergelijke pieken werden vastgesteld tijdens avonden en nachten met heldere open hemel en typisch heel lage windsnelheden.

B. Analyse alle metingen

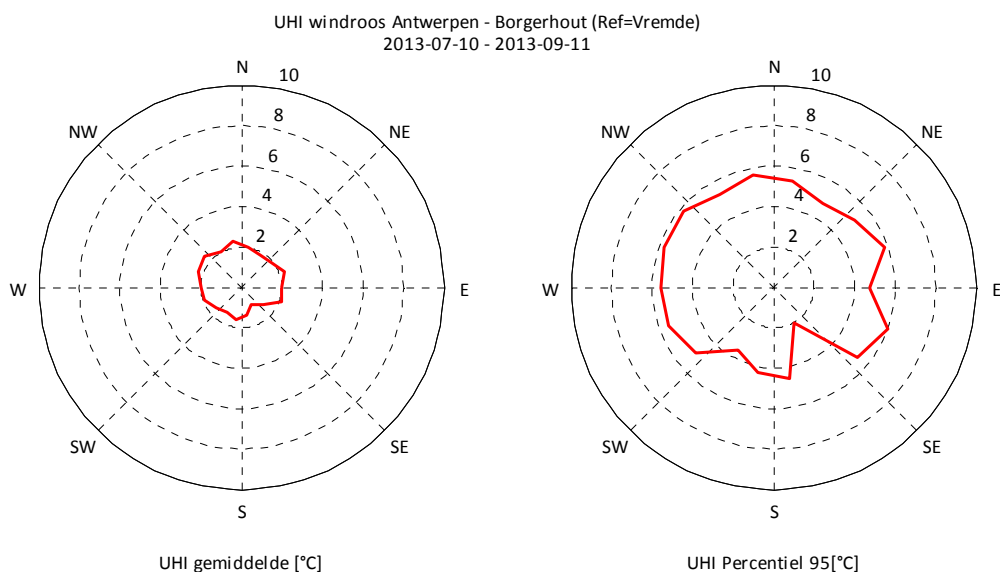
In onderstaande figuur worden alle meetlocaties met elkaar vergeleken voor de hele zomerperiode, en zien we dat de gemiddelde intensiteit voor alle stedelijke en industriële stations tussen de 2.0 en 3.5°C ligt. De piek intensiteit (95^{ste} percentiel waarde¹) 's nachts bedraagt voor deze stations zo'n goeie 6 °C. De hoge nachtelijke temperaturen in de haven lijken op het eerste zicht wat vreemd gezien het daar toch om een relatief open omgeving gaat. De sterke versterking en afwezigheid van vegetatie door de talrijke industrie terreinen is hier blijkbaar toch dominant in het bepalen van de luchttemperatuurdynamiek. Verder is het milderend effect van stedelijk groen duidelijk merkbaar in de figuur. We zien dat het nachtelijk SHE in het stadspark beduidend lager is dan in de versteende omgeving.

¹ Dit 95^{ste} percentiel of P95 betekent dat er slechts in 5 % van de uurlijkse metingen (overdag of s' nachts) nog grotere temperatuurverschillen zijn vastgesteld.



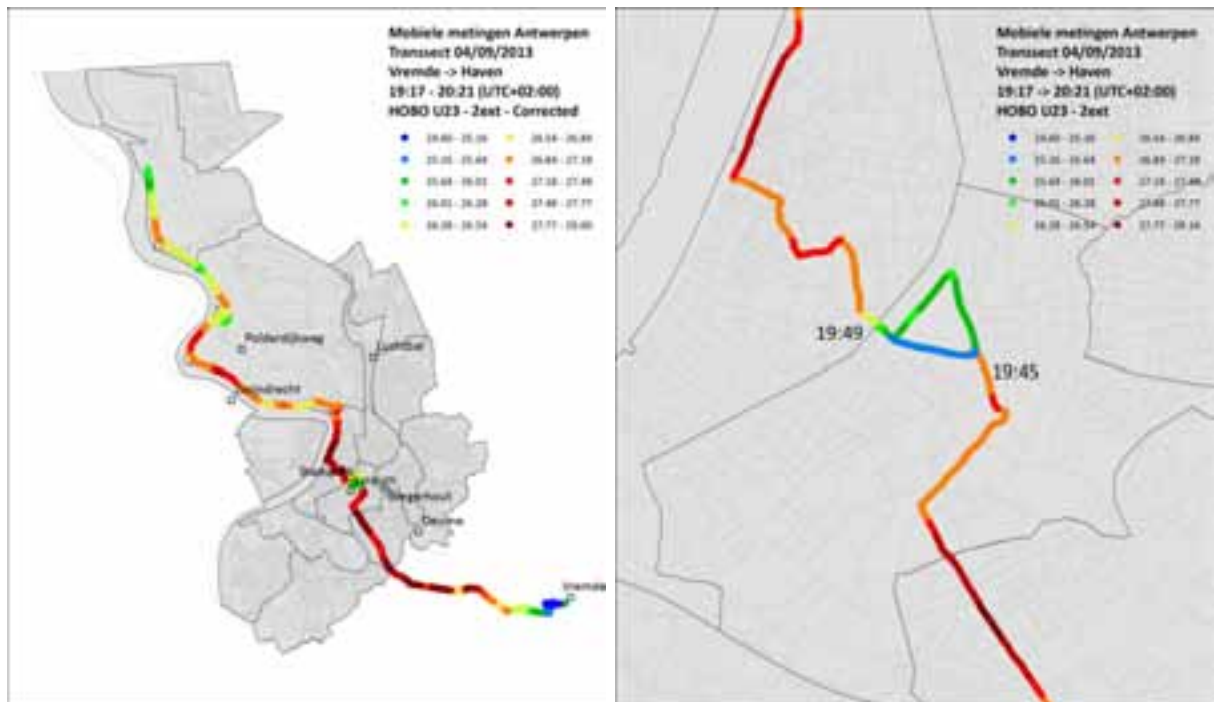
Na analyse van alle gemeten SHE-intensiteiten, blijkt het gemiddeld verschil in luchttemperatuur **overdag** voor alle meetlokaties kleiner dan 1 °C te zijn, met een piekintensiteit (95^{ste} percentiel waarde) voor de zomerperiode voor het Lyceum van slechts 1.5 °C.

Er is verder een analyse uitgevoerd van de directionaliteit van het SHE-effect. We zijn m.a.w. nagegaan voor welke windrichtingen het grootste SHE-effect optreedt. Verrassend genoeg blijkt dit voor een groot deel de noord-westelijke windrichting te zijn, hetgeen verklaard kan worden door het effect van de haven op het SHE in de stad. Er is ook een oostelijke tot zuidoostelijke component, typisch voor de aanwezigheid van een hoge-druk gebied dat gepaard gaat met mooi, helder en rustig weer, de ideale SHE condities. Onderstaande windrozen geven telkens het gemiddelde en het 95^{ste} percentiel voor de intensiteit van het SHE, gemeten te Borgerhout gedurende de zomer van 2013.



C. Analyse mobiele metingen

Naast een meetcampagne met vaste temperatuursensoren, zijn in de zomer van 2013 ook enkele auto-transsecten door Antwerpen gereden met een mobiel meettoestel. Een voorbeeld is hieronder opgenomen voor het transsect op 04-09-2013 tussen 19:17 en 20:21 h lokale tijd. Het stadspark komt hier opnieuw duidelijk als ‘koelte-eiland’ in de warme stad naar voor.



Deze transsecten stellen het gemeten stedelijk hitte-eiland in Antwerpen iets grafischer voor dan simpelweg de statische in-situ metingen. Deze data vormen ook de onafhankelijke dataset waarmee in Hoofdstuk 3 naar de oorzaken van het SHE zal worden gekeken.

Detectie van de oorzaken van het CLUHI effect in Antwerpen

Nu we het stedelijk hitte-eiland-effect door middel van metingen gekwantificeerd hebben, kunnen we overgaan tot de detectie van de oorzaken ervan. Hiervoor brachten we een aantal lokaal beschikbare databronnen in verband met de gemeten luchttemperatuurtranssecten (zie boven), een onafhankelijke dataset.

De gevolgde methodiek is die van een regressie analyse :

$$Y = \text{constante} + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n$$

waarbij Y de datasets van de gemeten transecten zijn op een bepaald moment en x_i de verschillende onafhankelijke variabelen zijn. Het is expliciet de bedoeling om te kijken welke parameters bijdragen/in relatie staan tot het CLUHI. Uit de literatuur is geweten welke zaken het SHE in het algemeen beïnvloeden, hier willen we echter bepalen wat de grootte-orde van hun invloed is in Antwerpen. Met name, wat is de belangrijkste parameter die in Antwerpen bijdraagt tot verhitte / verkoeling.

We beginnen hieronder kort met een toelichting van de gebruikte onafhankelijke variabelen en waarom ze relevant zijn in deze analyse:

- De **sky view factor** (SVF): de SVF geeft de fractie weer van het hemelgewelf dat zichtbaar is vanaf de grond, en waarvoor het zicht dus niet geblokkeerd is door gebouwen. Het is bekend dat hoe lager de SVF, hoe dieper de street canyon, of hoe meer ingesloten tussen de gebouwen men zich bevindt. Een lage SVF bemoeilijkt het verlies van thermische energie door IR uitstraling en zal dus bijdragen tot het SHE. Dit effect is enigszins verwant met het beperkt afkoelen 's nachts onder bewolkte hemel (waterdamp absorbeert de IR straling en bemoeilijkt dus het energieverlies door uitstraling) of het juist sterk afkoelen onder open hemel. De SVF werd op basis van het 3D model voor Antwerpen afgeleid. In Antwerpen komen de laagste SVF uiteraard voor in het historisch centrum van de stad en de dichte stadswijken zoals Borgerhout.
- De **fractie vegetatie**: de afwezigheid van evapotranspiratie (verdampen van water en de vochthuishouding in bladeren) is een bepalende parameter voor het SHE. De energie gebruikt voor het verdampen van water is niet meer beschikbaar voor het opwarmen van de lucht. Hoe minder evapotranspiratie, hoe meer energie beschikbaar is voor de opwarming van de lucht. Voor het in kaart brengen van de fractie vegetatie maakten we gebruik van satellietopnames van Landsat. Doordat vegetatie andere reflectie/absorptie karakteristieken vertoont voor zichtbaar licht en IR-straling kunnen we uit het verschil tussen beide signalen de hoeveelheid vegetatie afleiden. We dienen wel op te merken dat deze variabele een totale fractie groen voorstelt. Het is op basis van deze parameter niet mogelijk om onderscheid te maken tussen bepaalde vegetatietypologieën zoals grasveld of bos.
- De **fractie water**: de aanwezigheid van water is, analoog als hierboven beschreven, ook een potentieel belangrijk element in het verklaren van het SHE.
- De totale **fractie verharding** van de openbare ruimte geeft een indicatie van de hoeveelheid warmte die kan gestockeerd worden in het stedelijk weefsel. Gezien typische stedelijke constructiematerialen een relatief hoge warmtecapaciteit hebben, kunnen die veel langer 's nachts hun warmte afgeven en dus bijdragen tot een verhoogd SHE. Vanzelfsprekend is de verharding het grootst in het stadscentrum en de haven. Het dient wel gezegd te worden dat de materialiteit van de verharding ook belangrijk is, in die zin dat zij bepaalt in welke mate invallende zonnestraling gereflecteerd wordt (men spreekt van albedo). Oppervlakten met een lage albedowaarde absorberen meer zonnestraling en worden daarom sneller warm dan oppervlakten met een hoge albedowaarde. Het verschil in oppervlaktetemperatuur tussen het donkere² asfalt en lichtere beton oppervlakten (met een iets hogere albedo) kan oplopen tot 32 °C. Wij hadden echter geen gegevens tot onze beschikking wat betreft het type verharding in Antwerpen, en kunnen dit dan ook niet meenemen in onze analyses.

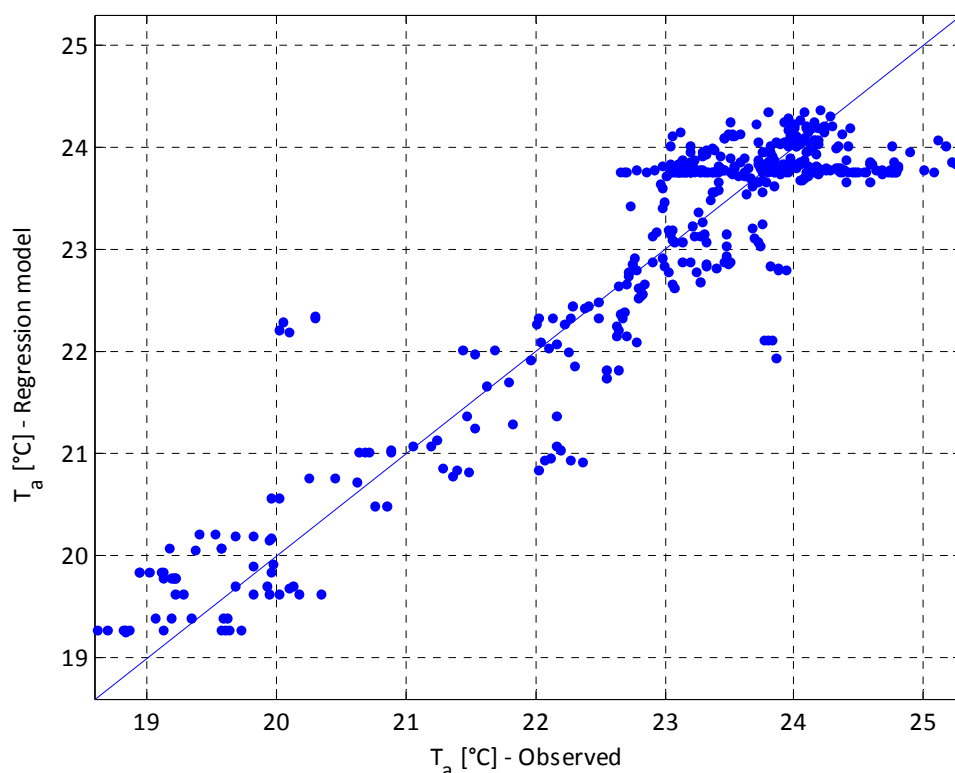
Wanneer we deze proxy variabelen in verband brengen met de gecorrigeerde mobiele metingen, dan geeft onderstaande tabel de resultaten van de correlatie analyse. De luchttemperatuur op dit

² Vers asfalt heeft een albedo (α) van 0.04 (<http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/Pavements/Albedo/>), wat betekent dat slechts 4 % van het invallende zonlicht weerkaatst wordt, voor gebruikt asfalt is $\alpha \sim 0.12$. Voor nieuw beton kan de albedo 0.55 (Markvart et al, 2003) bedragen. Merk op dat ook vegetatie een gevoelig hogere albedo heeft dan artificiële constructie materialen (zie onder meer ook de UrbClim modelbeschrijving in Hoofdstuk 4)

transect vertoont een zeer sterke negatieve correlatie met de vegetatie fractie, die bijna 62% van de ruimtelijke variantie verklaard. Ook voor de sky view factor zien we een duidelijk negatieve correlatie. Er geldt dus m.a.w. hoe hoger de SVF, hoe lager de temperatuur. Inderdaad, hoe meer open het stedelijk weefsel, hoe efficiënter het warmte kan verliezen en dus afkoelen. De fractie water heeft hier weinig tot geen verklarende kracht. Voor de fractie verzegeld gebied zien we een duidelijk positieve correlatie, hoe hoger de graad van verzegeling, hoe hoger de luchttemperatuur. Logisch, maar we merken wel dat de verklaarde variantie relatief beperkt is, slechts 7%. We dienen hier echter op te merken dat de fractie verzegeld gebied en de fractie vegetatie zeker geen onafhankelijke variabelen zijn. Doordat het grootste deel van de ruimtelijke variantie door de fractie vegetatie verklaard wordt impliceert dit dat een even groot deel van de variantie door de afwezigheid van vegetatie verklaard wordt (i.e. verzegeld gebied, de fractie naakte grond in Antwerpen zal naar alle waarschijnlijkheid relatief beperkt zijn). We merken echter wel duidelijk een niet-lineaire afhankelijkheid van de fractie vegetatie in deze analyse. Wanneer we een correlatie analyse uitvoeren met de fractie vegetatie in het kwadraat, dan slagen we er zelfs in om 75 % van de ruimtelijke variabiliteit te verklaren (zie tabel).

	Constante	SVF	Fractie verzegeld	Fractie Water	Fractie Vegetatie	Fractie Vegetatie ²
Pearson correlatie coëfficiënt	-	-0.36	0.26	-0.05	-0.79	-0.86
R ²	-	0.13	0.07	0.00	0.62	0.75
β_i	24.31	-0.55	-0.17	0.29	3.58	-8.07

We kunnen dit alles nu in een regressie model gieten, waarvan de coëfficiënten ook in de tabel zijn weergegeven. Dit regressie model slaagt erin om in totaal 86 % van de ruimtelijke variantie van de gemeten luchttemperaturen te verklaren voor het gereden transect. Een vergelijking tussen de regressie resultaten en de originele gemeten luchttemperaturen is in onderstaande figuur opgenomen.



Met deze oefening willen we enkel het belang van de verschillende variabelen voor het SHE-effect aantonen. We zullen in Hoofdstuk 5 met een gesofisticeerd en state-of-the-art model de luchttemperaturen en het CLUHI van Antwerpen in kaart brengen.

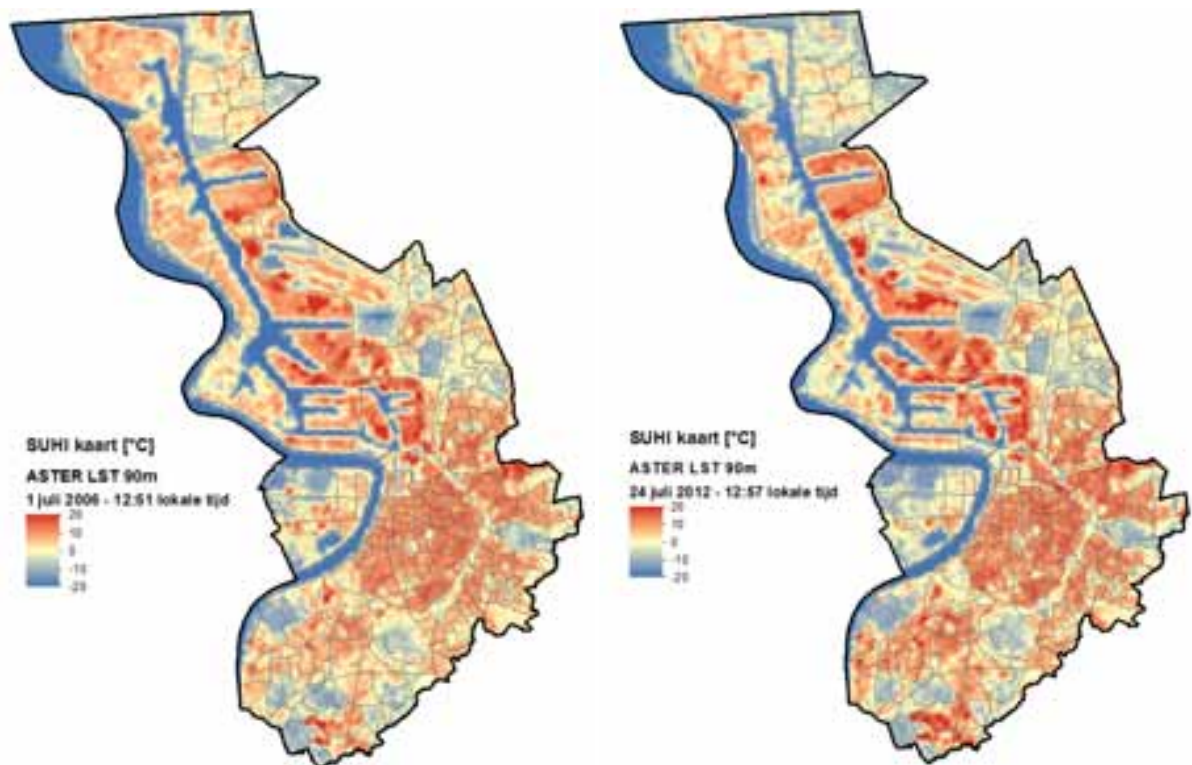
Ruimtelijk zicht op het oppervlakte SHE in Antwerpen door middel van satellietdata

Uit de puntmetingen en de mobiele metingen kunnen we afleiden dat het SHE effect op sommige plaatsen in Antwerpen sterker is dan op andere plaatsen. Hoe die ruimtelijke indeling eruit ziet kunnen we achterhalen aan de hand van satellietbeelden. We moeten echter duidelijk stellen dat we aan de hand van een satelliet informatie over de oppervlaktetemperatuur verkrijgen (Surface Urban Heat Island of SUHI), m.a.w. de temperatuur van de straatstenen, het asfalt, de daken en het bladerdek. Om een ruimtelijk beeld te krijgen van de luchttemperatuur (Canopy Layer Urban Heat Island of CLUHI) zullen we gebruik maken van een model, maar daarover later meer.

Voor de oppervlaktetemperatuur werden enkele beelden van het ASTER instrument aangekocht, die heel geschikt zijn voor het in kaart brengen van stedelijke oppervlaktetemperatuur. We zijn hier echter beperkt tot slechts een handvol bruikbare beelden die dan nog telkens om 13u 's middags genomen zijn, wanneer de satelliet overvliegt.

A. Oppervlakte hitte-eiland (SUHI)

De figuren hieronder geven twee satellietopnames weer van de oppervlaktetemperatuur voor Antwerpen. Om de temperatuurverschillen duidelijk te maken geven we de temperatuur weer t.o.v. de gemiddelde temperatuur voor het gehele beeld. We merken duidelijk het oppervlakte warmte eiland of SUHI van de Antwerpse binnenstad en het havengebied. We zien op het eerste zicht ook enkele "hotspots" opduiken, voornamelijk in het havengebied (bv. de terreinen rond het Albertdok en het Churchilldok, het stuk industrieterrein aan de Noorderlaan ten zuiden van de Tijsmanstunnel, het industrieterrein van Deurne tegen de oostelijke grens van Antwerpen en enkele terreinen in Wilrijk langs de Boomsesteenweg in het zuiden). Deze locaties worden stevast gekenmerkt door grote, open industriële terreinen, met asfalt (of steenslag/kolen) als bodembedekking. De dakbedekking van grote fabriekshallen bestaat veelal uit donker, weinig reflecterend roofing materiaal dat heel sterk kan opwarmen en dus voor hoge oppervlaktetemperaturen kan zorgen. Bij de grote container terminals kunnen ook het grote aantal metalen containers een belangrijke oorzaak zijn voor de verhoogde oppervlaktetemperatuur, zoals gezien vanuit de ruimte. Het belang van die hotspots is echter relatief. Dergelijke industriële sites warmen weliswaar snel op, maar kunnen ook snel afkoelen en het blijft uiteraard zo dat bij grote industriële complexen we voornamelijk de dak-temperatuur zien vanuit de ruimte. Desalniettemin zal bij een grote geasfalteerde vlakte, typisch voor industrie gebied, de hogere oppervlakte temperaturen aanleiding geven tot een verhoogde stralingsbelasting overdag.



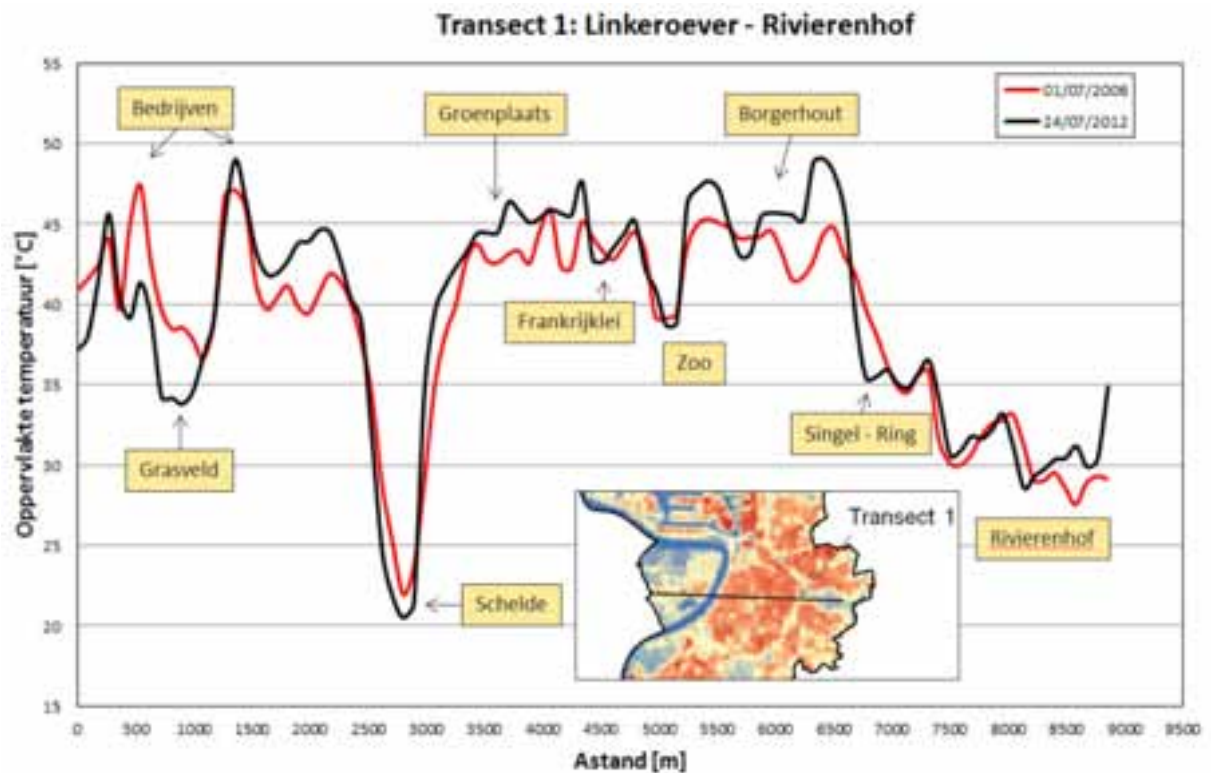
Om met nog meer detail de situatie te kunnen analyseren, met name voor de binnenstad, hebben we bovenstaande kaarten verfijnd naar een horizontale resolutie van 30m, gebaseerd op een vegetatiebeeld van de Landsat satelliet. Vegetatiehoeveelheden zijn namelijk erg sterk gecorreleerd aan de oppervlaktetemperaturen. De gebruikte methode wordt in detail beschreven in Hoofdstuk 4. In onderstaande figuur kunnen we het resultaat van deze oefening zien, waarbij ingezoomd is op het centrum van Antwerpen. De gebruikte kleurenschaal is dezelfde als in bovenstaande beelden.

Het beeld laat duidelijk zien dat de Antwerpse binnenstad in feite één grote hotspot is, enkel onderbroken door plaatsen met veel groen of water. Het stadspark, en dan vooral de zuidkant waar de vijvers gelegen zijn, komt duidelijk naar voren als koelste locatie binnen het centrum. Ook de zoo en de grotere parken in het zuiden van de stad zijn frissere plaatsen wat betreft de oppervlaktetemperatuur. De warmste plaatsen vinden we in het historisch centrum tegen de Schelde, het noorden en oosten van de stad waar de huizen dicht op elkaar staan en er weinig groen is. Ook de buurt rond de Bell in het zuiden komt als erg warm naar voren. Ook de rol van water voor het oppervlakte hitte-eiland is heel nadrukkelijk aanwezig. De Schelde en de havendokken zijn de koudste plaatsen qua oppervlaktetemperatuur.



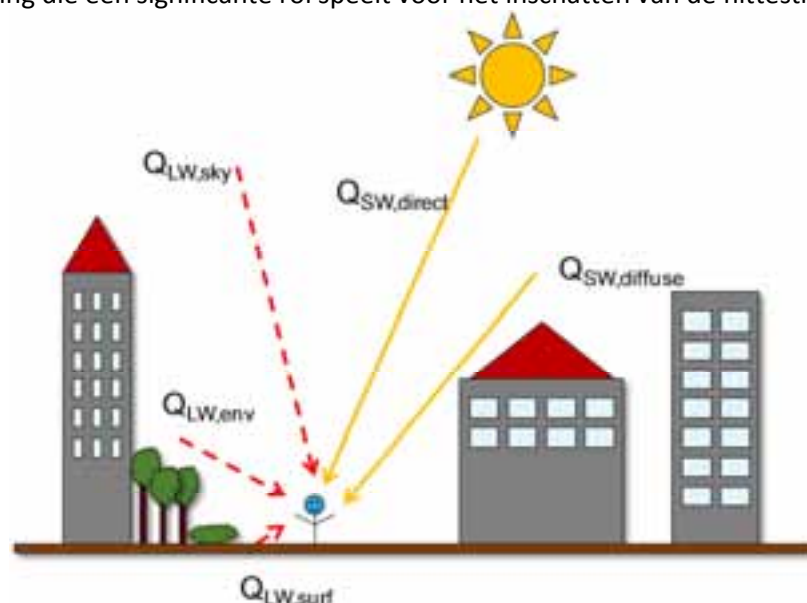
Tijdens de verdere analyse van de beelden in Hoofdstuk 4 is ook gekeken naar de evolutie van het oppervlakte SHE in Antwerpen gedurende de afgelopen 6 jaar. Daarbij viel op dat er weinig evolutie was waar te nemen in de sterkte van het SUHI. Enkele locaties in de haven en op linkeroever zijn kouder geworden in die periode, allicht omdat de vegetatie er is gegroeid of uitgebreid. De grootste opwarming viel te noteren in het zuiden van de stad, waar de urbanisatie van Wilrijk en Hoboken een duidelijk en grootschalig opwarmend effect heeft.

Vervolgens zijn er enkele transect analyses opgenomen, waarbij we de oppervlaktetemperaturen grafisch weergeven op een rechte. Je kan dit zien als een soort van 'blote voeten' pad, m.a.w. welke temperatuur zouden je voeten ervaren wanneer je dit transect zou afstappen. Op die manier kunnen we duidelijker de effecten van bvb. parken of industrie terreinen weergeven. Onderstaand transect van Linkeroever naar het Rivierenhof toont duidelijk aan dat de oppervlakte temperatuur van een park zoals de zoo een significant verschil van een 7-tal °C kent met bvb. Borgerhout. De oppervlaktetemperatuur van industriële terreinen met grote asfaltvlaktes kan dan weer makkelijk nog een aantal °C hoger liggen dan in het centrum. We zien ook dat een locatie met veel vegetatie en water zoals het Rivierenhof significant koeler is (15 °C in oppervlakte temperatuur t.o.v. het stadscentrum). Meer details zijn terug te vinden in Hoofdstuk 4.



B. Afleiding van de potentiële dagstress

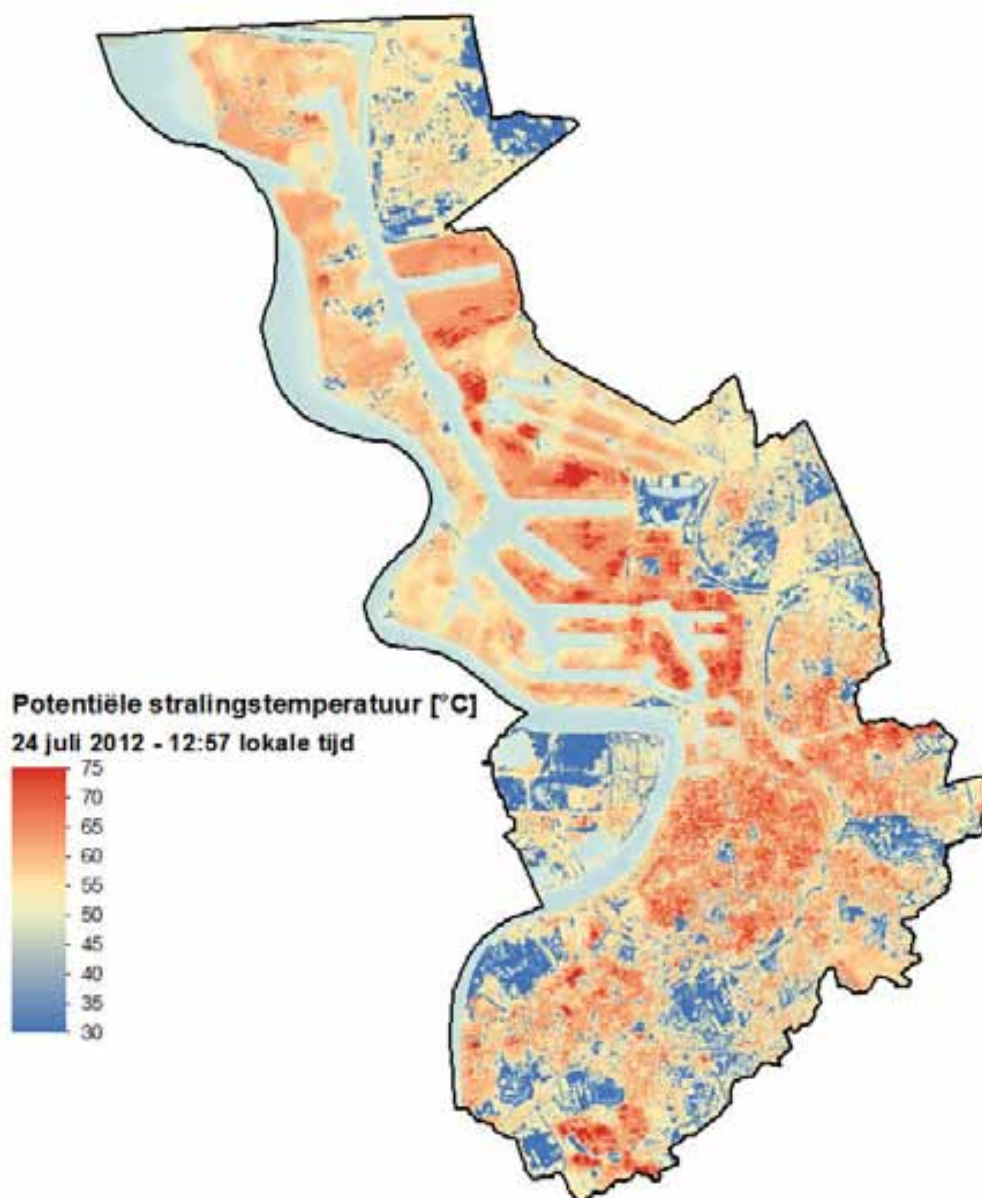
Nu we de oppervlaktetemperatuur in Antwerpen in kaart hebben gebracht, kunnen we proberen om nog een stapje verder te gaan en deze kaart te gebruiken om de hittestress die mensen buitenshuis ondervinden expliciet te berekenen. Want door de opwarming van de materialen en dus de hogere oppervlaktetemperatuur komt er in een stedelijke omgeving meer warmte-straling³ vrij, waardoor de stralingsbelasting van mensen in de stad hoger ligt. Het is net die stralingsbelasting die een significante rol speelt voor het inschatten van de hittestress overdag.



Vereenvoudigd schema van de stralingsbelasting op een menselijk lichaam in stedelijke omgeving.

³ Immers, warmte kan op 2 manieren worden doorgegeven : door warmte straling (infra-rode straling) of door botsing van lucht moleculen (convectie).

Voor het inschatten van de directe en diffuse componenten van de invallende zonnestraling gebruiken we het ter beschikking gestelde 3D model van Antwerpen. De resultaten zijn hierdoor beperkt tot het grondgebied van de stad Antwerpen. Op basis van een GIS rekenprogramma werd de potentiële invallende directe en diffuse zonnestraling berekend op het overeenkomstige tijdstip van de ASTER oppervlaktetemperatuuropname, waardoor we een inschatting kunnen maken van de potentiële gemiddelde stralingstemperatuur, die een directere maat is voor potentiële hittestress overdag dan de oppervlaktetemperatuur. We kunnen immers direct de link maken met de Universal Thermal Climate Index (utci.org) en voor deze specifieke situatie kunnen we stellen dat voor alle waarden boven 60 °C (de rode gebieden in onderstaande figuur) er sprake is van 'sterke hittestress'. De gebieden tussen 40 en 60 °C hebben af te rekenen met 'matige hittestress', en enkel in de donkerblauwe gebieden onder de 40 °C is er geen sprake van hittestress. Het zijn uiteraard de meest kwetsbare bevolkingsgroepen die hier het meeste last van kunnen ondervinden, daarover verderop meer.



Een aantal zaken vallen op in de figuur. Zo zien we dat de zones met de allerhoogste potentiële MRT zich niet direct in de stadskern bevinden, maar vooral in grote open industrieterreinen in de haven. We zien in feite een relatief gelijkaardig beeld ontstaan als voor de SUHI kaarten (zie hiervoor), maar met dat verschil dat de stadskern iets beter gespaard blijft door de verhoogde schaduwvorming en beschutting voor directe zonnestraling die we in deze berekening hebben meegenomen. Door het in rekening brengen van de gebouwen en de vegetatie zit er wel duidelijke meer detail en structuur in dit beeld.

We hebben bovenstaande kaart ook op Google maps gelegd, waardoor het mogelijk is om de details per buurt te bestuderen. Het is duidelijk dat bomen, zelfs in kleinere parkjes en tuintjes, een groot effect hebben op de stralingstemperatuur, zowel door hun schaduwvorming als hun effect op de oppervlaktetemperatuur. En zelfs grote open grasvelden zoals ten zuiden van het gerechtsgebouw, die gevoelig zijn aan directe zonnestraling, hebben toch een duidelijk lagere MRT dan de meer bebouwde delen van Antwerpen.



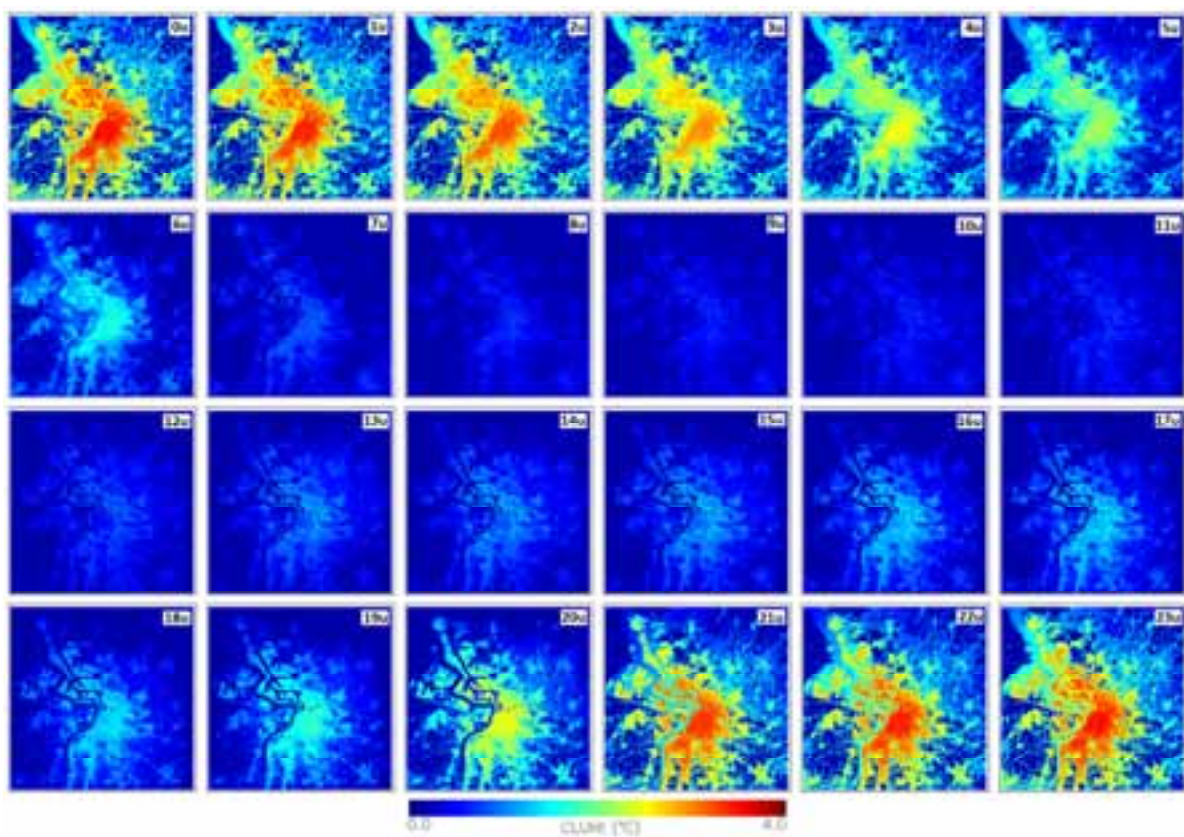
Modelberekeningen luchttemperatuur

A. Luchttemperatuur hitte-eiland (CLUHI)

Nu we een goed beeld hebben van de potentiële hittestress overdag in Antwerpen, kunnen we ook de nachtelijke hittestress in kaart brengen. Deze wordt in grote mate bepaald door de luchttemperatuur en m.a.w. hoe sterk het in de stad afkoelt. Voor het in kaart brengen van de oppervlaktetemperatuur konden we ons eenvoudig beroepen op satellietgegevens. Er bestaan echter geen universeel geldende relaties om satellietbeelden van oppervlaktetemperatuur te vertalen in luchttemperatuur. En ook de resultaten van de meetcampagne geven slechts een heel gelokaliseerd beeld van het CLUHI, zodat modellering noodzakelijk wordt om tot gebiedsdekkende informatie inzake de luchttemperatuur te komen.

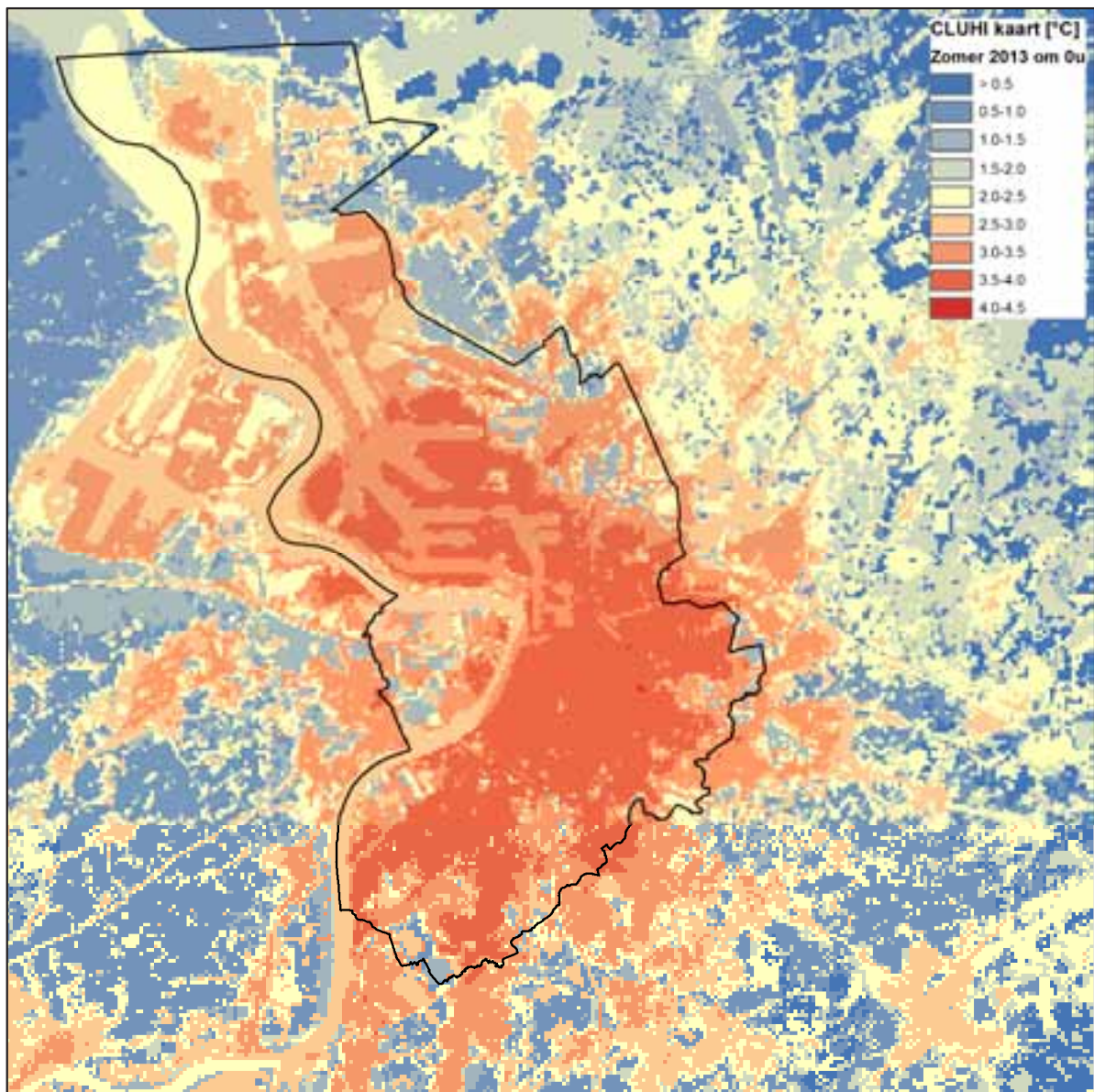
Voor de luchttemperatuurmodellering kozen we voor een modelconcept dat zowel de grootschalige meteorologische condities als de lokale stedelijke effecten in vereenvoudigde vorm in rekening brengt. Dit modelconcept, UrbClim, is gedetailleerd beschreven in Hoofdstuk 5 en vormt een compromis tussen rekentijd, ruimtelijk detail en complexiteit. UrbClim stelt ons in staat de uurlijkse luchttemperatuur te berekenen voor een volledige stad met een horizontale resolutie van 100 m en met een nauwkeurigheid die vergelijkbaar is met complexere klimaatmodellen. Naast landgebruiksinformatie en een globaal meteorologisch model⁴ maakt UrbClim ook gebruik van satellietopnames van de vegetatie-index.

In onderstaande figuur is het temperatuurverschil tussen de stad en het rurale gebied rond Antwerpen weergegeven per uur van de dag, **gemiddeld over de periode juli-augustus 2013**. Dit wil zeggen dat we in elk van de 24 afbeeldingen telkens het CLUHI effect tonen gemiddeld over de hele zomerperiode voor het afgebeeld uur van de dag, **beginnende om middernacht**.



We merken duidelijk dat, net als bij de metingen, ook uit de modellering volgt dat het SHE-effect het meest uitgesproken is rond middernacht (eerste beeld) met een intensiteit in het centrum van Antwerpen van gemiddeld zo'n 3 à 4°C. Heel vergelijkbaar dus met wat gemeten is in het Lyceum en Borgerhout (zie hoger). Gedurende de nacht verliest de stad geleidelijk aan haar warmte, en het CLUHI bereikt een minimum rond 9 à 10u 's morgens. Onder invloed van de zon warmt de stad overdag terug op. Naar mate de namiddag vordert wordt de opgeslagen warmte in de stad afgegeven aan de lucht en vergroot opnieuw het verschil met de omliggende rurale gebieden en rond 21u lokale tijd bereikt het CLUHI terug z'n volledige intensiteit. Hoewel deze temperatuurverschillen een heel stuk kleiner zijn dan de verschillen in stralingstemperatuur, hebben ze toch een groter effect op de menselijke gezondheid, waarover later meer.

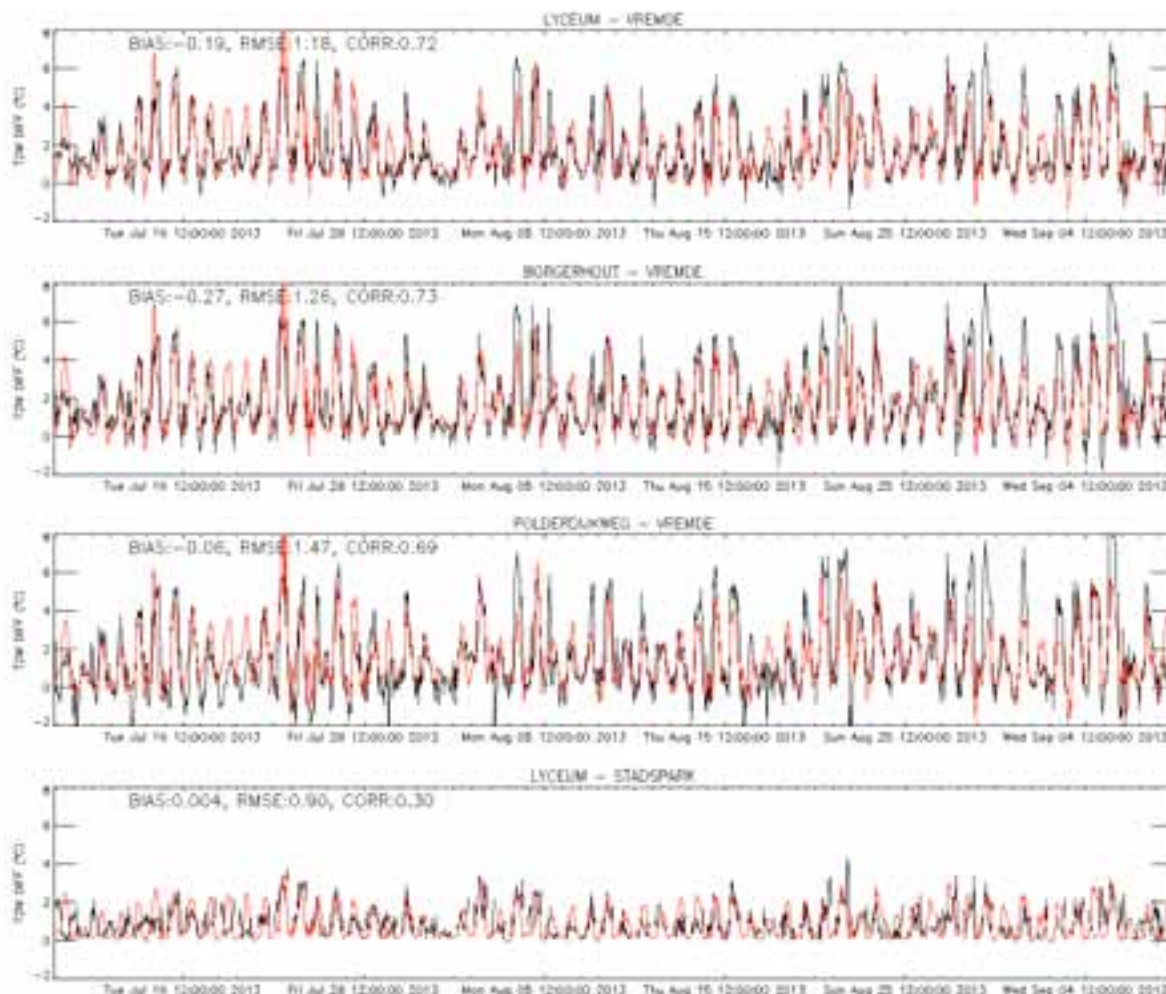
⁴ We gebruiken het model van het Europees weersvoorspellingcentrum te Reading, UK (ECMWF)



Hier zien we dan finaal het gedetailleerde CLUHI beeld van Antwerpen op basis van ons model: de gemiddelde luchttemperatuur gedurende de maanden juli en augustus om middernacht lokale tijd.

B. Validatie modelresultaten

Het model slaagt er dus in de grootte orde van het gemiddeld CLUHI-effect in Antwerpen (met name een kleine 4 °C in de binnenstad) correct te reproduceren. De modelresultaten werden echter aan een uitgebreide validatie onderworpen door ze te vergelijken met de gemeten tijdsreeksen. We zien hieronder een tijdsreeks van het verschil in luchttemperatuur zoals gemeten (**zwart**) en gemodelleerd met UrbClim (**rood**) tussen onze 4 stedelijke stations en het rurale station in Vremde. Op de figuren staan ook enkele foutstatistieken weergegeven: de bias (verschil tussen de gemiddeldes), de Root Mean Square Error (RMSE) en de correlatie coëfficiënt.



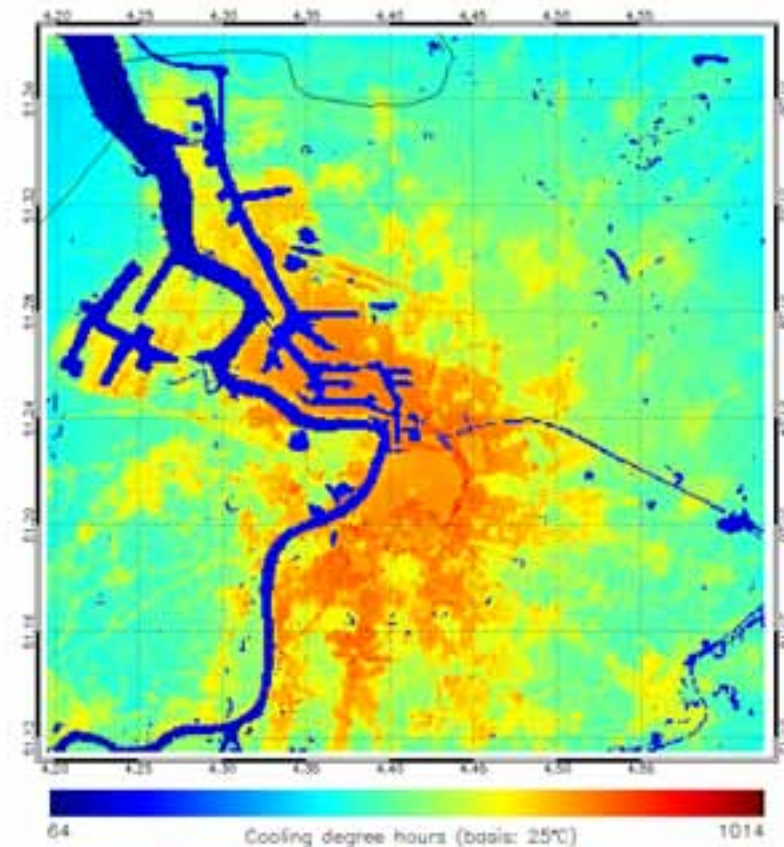
De overeenkomst tussen model en metingen is zeer bevredigend. Het UrbClim model is in staat om de temporele evolutie van de temperatuurverschillen correct te reproduceren. Het dient gezegd dat dit een heel stuk moeilijker is dan het reproduceren van de temperatuur op één locatie, hetgeen het model quasi foutloos kan. In het stadspark zijn er problemen geweest met de ventilator van het meetinstrument, waardoor de resultaten overdag niet betrouwbaar zijn en uit deze analyse zijn weggelaten. De gedetailleerde validatie resultaten worden besproken in Hoofdstuk 5, waar respectievelijk de capaciteit van het model bekeken werd om de evolutie van het CLUHI-effect in de tijd te reproduceren en in het tweede geval de capaciteit van het model om het ruimtelijk patroon van het CLUHI-effect weer te geven. Samengevat kunnen we stellen dat UrbClim er voor de beschouwde dataset in slaagt om 50 % van de variabiliteit⁵ als functie van de tijd van het CLUHI effect te verklaren, wat aanvaardbaar is voor dergelijke modellering, en een 75 % van het ruimtelijk patroon van het CLUHI effect s' nachts.

C. Afgeleide grootheden

Op basis van deze uurlijkse luchttemperaturen bespreken we nog enkele afgeleide grootheden zoals de maximale CLUHI-intensiteit, die in het model zo'n 6-7°C bedraagt, iets minder dan gemeten, wat doet vermoeden dat het model iets minder getrouw de pieken in de CLUHI-intensiteit kan reproduceren, zoals ook te zien is in bovenstaande figuur. Verder hebben we de

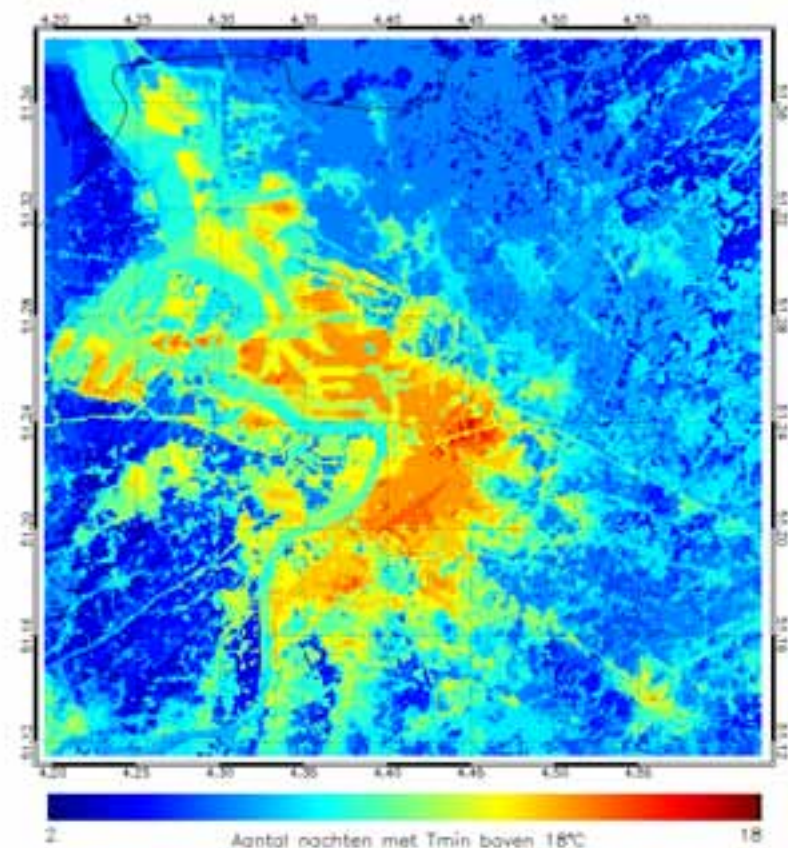
⁵ Gemeten als het kwadraat van de temporele correlatie coëfficiënt R^2

zogenoeten cooling degree hours⁶ berekend, die direct gelinkt zijn aan energieconsumptie. Het onderstaande beeld toont het resultaat van deze berekening. In het stadcentrum is het aantal uren dat de airco installaties zeker gebruikt zullen worden maar liefst dubbel zo groot als in het omliggende platteland. Dit betekent dus een enorme meerkost aan energie.



Een ander effect van het SHE blijkt uit het aantal dagen waar de minimum temperatuur 's nachts niet onder de 18 °C zakt. Daar zien we in het centrum tot meer dan twee weken langer "terrasjesweer" in de zomer dan in het platteland errond. We dienen er wel bij te vermelden dat dergelijke overschrijdingsindicatoren relatief gevoelig zijn en dat dit resultaat met enige voorzichtigheid dient benaderd te worden.

⁶ Het totaal aantal graad-uren dat de buitentemperatuur boven de 25 °C is, en wanneer de energievraag dus typisch gaat toenemen door het gebruik van airco installaties. Bv. een buitentemperatuur van 28 °C gedurende 3 uren komt overeen met 9 graad-uren.



Potentiële impact - literatuurstudie

In dit hoofdstuk geven we een overzicht van de mogelijke gevolgen van het SHE. Aangezien we niet beschikken over specifieke data voor de stad Antwerpen en er ook geen onderzoek is verricht specifiek voor Antwerpen, kunnen we ons enkel baseren op de beschikbare wetenschappelijke literatuur en een algemeen overzicht geven. In eerste instantie denken velen vooral aan de negatieve impact op gezondheid en zelfs het verband met (voortijdige) overlijdens, waaraan we hier ook het meeste aandacht besteden. Er zijn echter nog andere effecten waar we korter op ingaan.

A. Gezondheid en welzijn

De omgevingstemperatuur is één van de belangrijkste factoren die de **nachtrust** beïnvloeden. Hitte kan het slaappatroon verstoren en aangezien alle mensen nood hebben aan slaap, kan de totale negatieve impact hiervan groot zijn. Op basis van de huidige onvolledige kennis van de invloed van hitte op slaap en de economische impact van slaapte kort, kan echter geen onderbouwde inschatting gemaakt worden over de grootteorde van de maatschappelijke kost van deze oorzaak-gevolg keten.

In het algemeen zijn er meer **ziekenhuisopnames** gedurende hitte golven en dit zowel bij oudere als jongere volwassenen. De meeste opnames zijn te wijten aan directe hitte-gerelateerde verschijnselen zoals “uitputting door hitte” en hitte-slag, dehydratatie, verstoring van de elektrolytenbalans (zouten) en acuut nierfalen. Sommige opnames zijn te wijten aan neurologische problemen, psychologische problemen of geweld-gerelateerde oorzaken. Het opwarmen van het

menselijk lichaam bij hitte wordt aangeduid als hyperthermie. Vooral wanneer deze opwarming langdurig is, kan dit leiden tot hitte gerelateerde ziekten zoals krampen, flauwtes, beroertes en zelfs de dood.

Liefst 95 procent van de geregistreerde **sterftegevallen** als gevolg van natuurlijke rampen in postindustriële samenlevingen, is gelinkt aan extreme temperaturen. De relatie tussen een bepaalde stijging in temperatuur en de daaruit volgende stijging in menselijk onbehagen en in sterfte varieert sterk naargelang de breedtegraad en de klimatologische zone. Voor België betekent dit dat mensen meer kwetsbaar zijn voor hittegolven dan bijvoorbeeld mensen uit Zuid-Europa, waar men meer gewend is aan hitte(golven). Deze kwetsbaarheid is des te groter in stedelijke omgevingen, zoals Antwerpen, waar het effect van hittegolven versterkt wordt door het optreden van het SHE effect.

Echter het achterhalen van wie er nu meer of minder gevoelig is aan een bepaalde stijging in temperatuur is verre van eenvoudig, elke persoon ervaart een hittegolf anders, het is een combinatie van fysiologische, sociale en ecologische variabelen. Een belangrijke factor kan **voorafgaande ziekte** zijn, bijvoorbeeld personen met cardiovasculaire problemen en een slechtere werking van de nierfunctie zijn extra kwetsbaar voor hitte. Verder kan geconstateerd worden dat vooral leeftijd een rol speelt en dan vooral in de leeftijdsgroepen **tot 4 jaar en boven 65 jaar**. Dit is omdat ouderen en jonge kinderen minder hitte-regulerende mechanismen hebben.

Ook op sociaal vlak zijn er enkele algemene vaststellingen te maken. Allereerst is **sociale isolatie**, waarmee bedoeld wordt dat deze personen weinig contact hebben met anderen, een significante voorspeller voor personen die lijden onder de hitte. Ook taal-onkundigen, in het geval van Antwerpen **niet-Nederlandstaligen**, zijn meer vatbaar voor de gevolgen van hitte omdat ze minder kennis hebben van de lokale taal wat ervoor zorgt dat communicatie met overheid en hulpverleners minder goed verloopt. Tenslotte zijn **lage inkomensgroepen** meestal meer vatbaar voor hitte door een combinatie van: (1) een grotere blootstelling door het wonen in de delen van de stad waar het SHE het grootst is; (2) een lagere adaptieve capaciteit (dit is bijvoorbeeld het verhuizen naar beter geïsoleerde huizen of het aanpassen van die huizen); (3) een lagere graad van bescherming (fysiologisch, door onbekendheid, maar ook minder afgesloten verzekeringen etc.).

De negatieve impact van het milieu op ziektelast en voortijdige overlijdens wordt vaak uitgedrukt in DALY (*Disability Adjusted Life Year*). DALYs staan voor de potentieel verloren gezonde levensjaren door ziekte (morbiditeit) of voortijdige overlijdens (mortaliteit). Op basis van cijfers voor Vlaanderen die we extrapoleren naar Antwerpen, kunnen we het **jaarlijks gemiddeld verlies aan verloren levensjaren ten gevolge van hitte in Antwerpen ramen op minimaal een 80-tal DALYS per jaar**. De details van deze inschatting zijn terug te vinden in Hoofdstuk 6.

B. Energieverbruik

Om op warme dagen het microklimaat te reguleren en een aangename temperatuur te bereiken, wordt vaak veel energie verbruikt. Het aantal nachten waar de minimumtemperatuur 's nachts niet onder de 18 °C zakt en het aantal uren dat de temperatuur boven de 25°C ligt (zie boven), geven een goede indicatie van de vraag naar het gebruik van airco-installatie. Het SHE leidt dus ongeveer tot een verdubbeling van het aantal uren waarop mensen geneigd zijn om hun airco op te zetten. Deze gegevens geven duidelijk aan dat het SHE een belangrijke invloed zal hebben op de vraag naar energie voor koeling. Op basis van resultaten van steden in gelijkaardige klimaatzones verkregen

we een indicatie van het effect van (het temperen van) het SHE op het energieverbruik in zulke steden. De waarde hiervan blijkt in de grootteorde van 5 tot 20 euro per inwoner te liggen.

C. Faling van infrastructuur

Overmatige hitte kan leiden tot het (tijdelijk) falen van bepaalde infrastructuren, zoals (spoor)wegen en elektriciteitscentrales. Uit de literatuurstudie blijkt dat hogere temperaturen zullen leiden tot snellere achteruitgang van bepaalde basismaterialen (bvb. asfalt, betonklinkers, ...) van (spoor)weginfrastructuren en bruggen. Sterkere thermische expansie en contractie kan resulteren in meer problemen. De hittegolf van 2003 resulteerde in het Verenigd Koninkrijk tot heel wat vervormde sporen met belangrijke vertragingen tot gevolg met een totale geschatte kost van meer dan £3.5 miljoen. Een recente studie rapporteert dat de degradatie van voetpaden ten gevolge van klimaatverandering tegen 2050 drie keer sneller zou gaan dan vandaag door de toegenomen temperaturen. In het voorbije decennium waren er in Europa regelmatig periodes met tekorten aan “koelwater” voor nucleaire energiecentrales. In de warme zomer van 2003 moesten 30 energiecentrales daardoor hun productie verlagen. Dit kan in de toekomst een belangrijke issue worden, ook voor Antwerpen, dat afhankelijk is van de productie in Doel.

D. Positieve effecten

Op basis van satellietbeelden van 70 steden is ontdekt dat het groeiseizoen van planten tot op een afstand van 10 kilometer van de stadsrand verlengd is. Het groeiseizoen is daar ongeveer 15 dagen langer dan in de landelijke zone verderaf van de steden. In de lente is er ook eerder bloei, ongeveer 3 dagen eerder per graad Celsius temperatuurverschil met de landelijke omgeving buiten de invloedzone. Zoals eerder aangegeven betekent het SHE vooral dat het 's avonds trager afkoelt in de stad dan in de landelijke omgeving. Dit doet vermoeden dat het SHE een positieve invloed heeft op de omzet van horecazaken met terras. Hoewel dit een leuk onderzoeksthema lijkt, vonden we hierover geen cijfermateriaal terug in de wetenschappelijke literatuur.

Kwetsbaarheidsanalyse

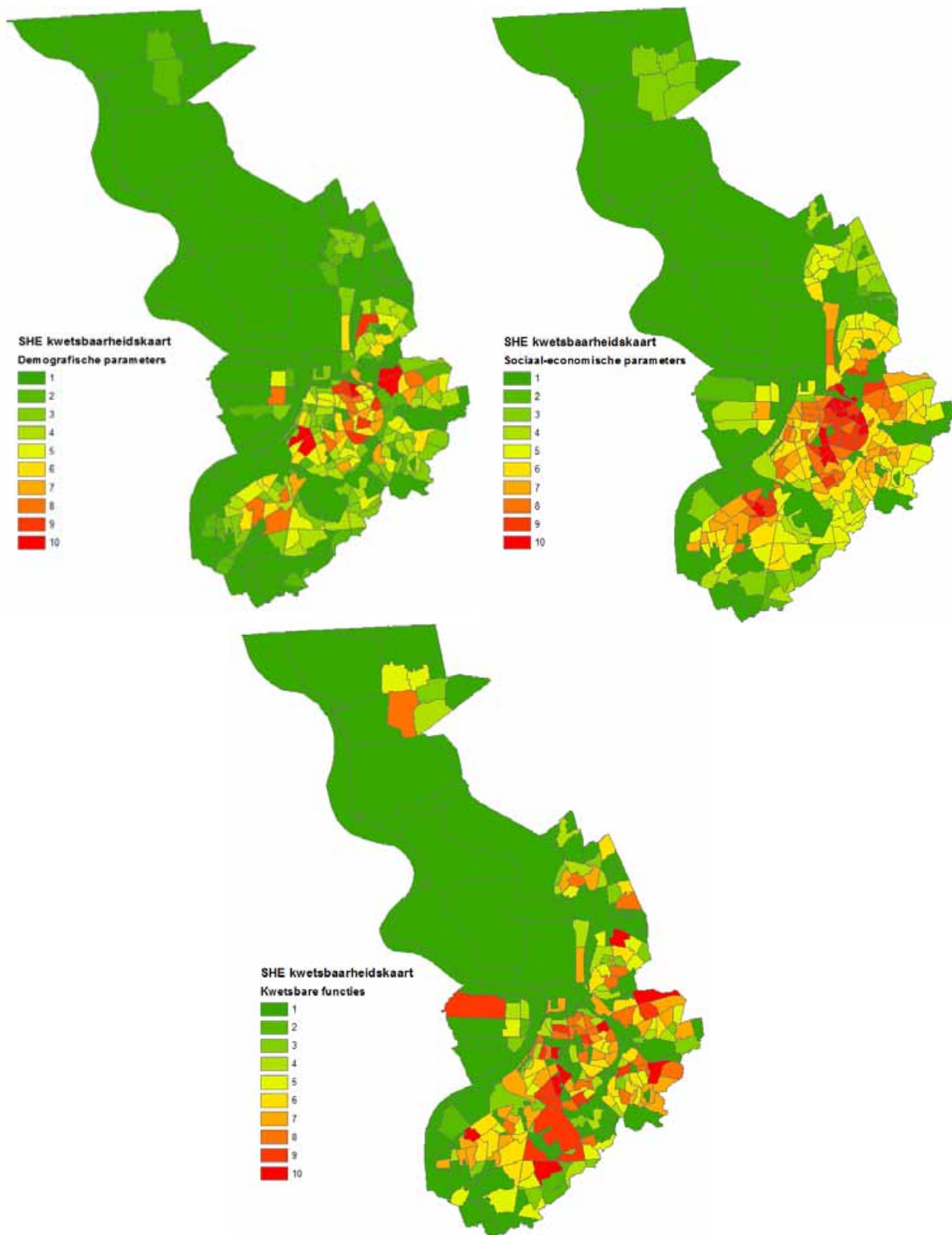
Vervolgens is er een kwetsbaarheidsanalyse uitgevoerd om naast het voordoen van het SHE (zowel CLUHI als SUHI) de gevoeligheid van de bevolking hieraan te onderzoeken. Dit gebeurt door de resultaten van het SHE in verband te brengen met de karakteristieken van de bevolking. In het vorige hoofdstuk is reeds dieper ingegaan op het bepalen van welke bevolkingsgroepen meer of minder gevoelig zijn aan een stijging van de temperatuur. We willen hierbij opmerken dat we geen cijfers tot onze beschikking hadden wat betreft de niet-Nederlandstaligen in Antwerpen, voor de analyse hebben we daarom gebruik gemaakt van het aantal vreemdelingen per buurt, zoals ter beschikking op de online Antwerpse buurtmonitor.

De centrale vraag in dit hoofdstuk was nu: welke buurt(en) in Antwerpen is(zijn) het meest gevoelig voor het hitte-eiland effect in relatie tot de voornoemde fysiologische, sociologische en economische factoren, zowel op het gebied van de dagstress (SUHI-waarden), als de nachtstress (CLUHI-waarden). De parameters die voor deze kwetsbaarheidsanalyse zijn gebruikt, zijn onderverdeeld naar demografische factoren, sociaal-economische factoren en kwetsbare functies (zie onderstaande tabel).

		CLUHI (nachtstress)	SUHI (dagstress)
Demografie	Gevoelige leeftijd (0-9 jaar)	x	x
	Gevoelige leeftijd (> 65 jaar)	x	x
	Totaal aantal inwoners	x	x
	Aantal alleenstaanden	x	x
	Aantal vreemdelingen	x	x
Sociaal-economisch	Ondermodaal inkomen	x	x
	Werkloosheidsgraad	x	x
Kwetsbare functies	Ziekenhuis	x	x
	Rusthuis	x	x
	Dagzorg		x
	Kinderopvang		x
	Kleuteronderwijs		x

Er is hierna door ons een methode uitgewerkt om de verschillende statistische sectoren in Antwerpen met elkaar te kunnen vergelijken wat betreft hun SHE-kwetsbaarheid, zowel per parameter als voor de overkoepelende indeling. De details van deze analyse zijn terug te vinden in Hoofdstuk 7. Onderstaande figuren geven de gecombineerde kwetsbaarheid voor alle parameters weer, zowel voor dag- als nachtstress, geschaald van 1 (weinig kwetsbaar) tot 10 (erg kwetsbaar).

Wat opviel in de analyse is dat de SHE-gevoeligheden van iedere buurt sterk verschillen naar gelang de parameter die beschouwd werd. De algemene rangorde is sterk gerelateerd aan het totaal aantal inwoners, hetgeen vrij logisch is. De sterkste gevoeligheden wat betreft de kinderen, ouderen en vreemdelingen zijn telkens in andere buurten terug te vinden hetgeen aangeeft dat er een sterke segregatie is van leeftijd en origine in de verschillende Antwerpen buurten. Dit biedt uiteraard ook kansen naar een gerichte aanpak van de SHE-problematiek op buurtniveau, aangezien ouderen andere noden en zorgen nodig hebben dan jonge kinderen tijdens een hittegolf.



Op basis van de bekomen tabellen en kaarten is er vervolgens een selectie gemaakt van 5 'case studies', kwetsbare buurten wat betreft het stedelijke warmte-eiland, waar we in meer detail zijn gaan kijken naar de lokale situatie. Als **voorbeeld** bespreken we hier de situatie in de Noordwijk, een cluster van buurten rond het Stuivenberg ziekenhuis, die uit de SHE-kaarten en de kwetsbaarheidsanalyse duidelijk naar voren komt als belangrijke 'hotspot' en aandachtsgebied van Antwerpen. De sociaal-economische situatie is er het slechtst naar SHE-kwetsbaarheid, met hoge

werkloosheidscijfers en lage inkomens, er wonen bovengemiddeld veel vreemdelingen, het totaal aantal inwoners is er erg hoog, waarbij er ook veel jonge kinderen zijn. Het luchtbeeld hieronder brengt de problematiek in beeld: de wijk bestaat uit een aaneenschakeling van volgebouwde, kleine straatjes en grote betonnen woonblokken. Buiten een aantal verspreide bomen rond het ziekenhuis is er van groen weinig sprake.



Om het visuele beeld van de wijk te versterken, werd er ook een kwantitatieve analyse uitgevoerd, waarbij de score van alle buurten berekend werd voor de verklarende variabelen van het SHE-effect (zie Hoofdstuk 3). Om te kunnen vergelijken met de standaardwaarden voor Antwerpen zijn in onderstaande tabel ook de gemiddelde waarden voor alle statistische sectoren van Antwerpen toegevoegd. De cijfers in de tabel bevestigen duidelijk het visuele beeld: deze wijk scoort voor alle verklarende variabelen een heel stuk slechter dan het Antwerpse gemiddelde. Er is geen open water aanwezig in de hele wijk. De fractie vegetatie, zelfs in de buurt van het ziekenhuis, is slechts half zo hoog als het Antwerpse gemiddelde. De belangrijkste factor lijkt hier de versteningsgraad, die quasi maximaal is. De weinige bomen die er zijn staan duidelijk apart of in verhardingen en grasveldjes of groene tuinen met doorlaatbare bodem zijn er niet of nauwelijks. Ook de sky view factor is hier erg laag door de vele kleine straatjes met hoge gebouwen, waardoor de invallende en uitgaande straling efficiënt ingevangen wordt. Er is in deze wijk duidelijk nood aan - en heel veel opportuniteiten voor - beleidsmaatregelen, die uitgewerkt worden in Hoofdstuk 9.

Buurt	Fractie water [%]	Fractie vegetatie [%]	Versteningsgraad [%]	Sky view factor [%]
STUIVENBERG ZIEKENHUIS (NOORDWIJK)	0,0	25,4	92,2	47,4
DE ZAVEL (NOORDWIJK)	0,0	17,0	99,8	38,2
ST.-ANNA	0,0	20,1	98,0	46,8
STUIVENBERG - WEST	0,0	19,6	98,2	47,2
Gemiddelde	0,0	20,5	97,0	44,9
Gemiddelde Antwerpen	3,3	38,2	61,2	73,7

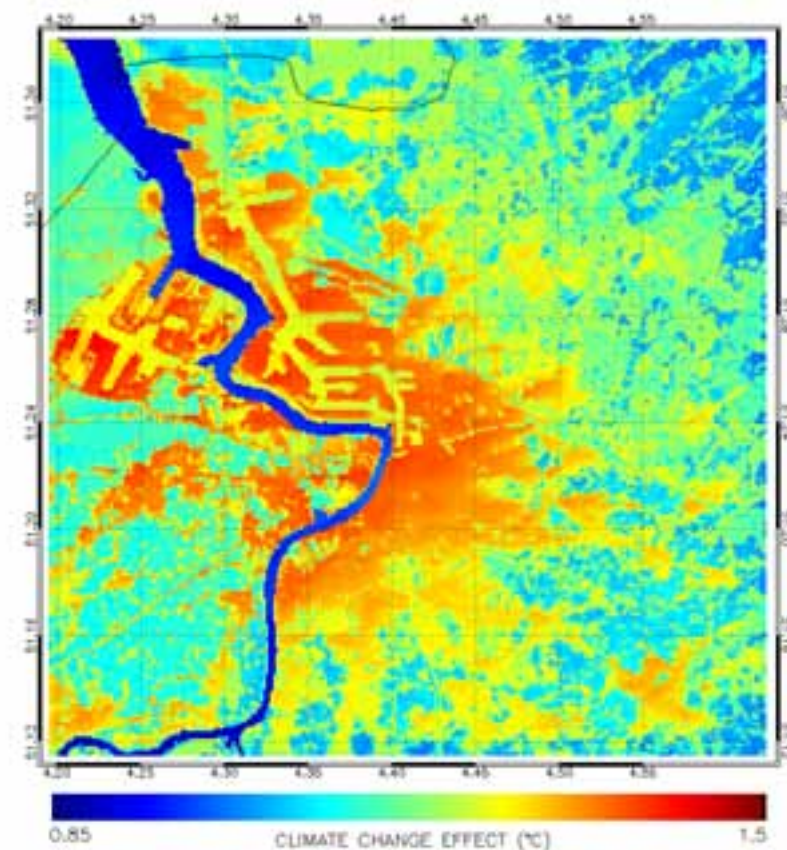
Toekomstprojectie

In een volgend onderdeel van de studie werd een inschatting gemaakt van hoe het SHE in Antwerpen zal evolueren in de toekomst. Twee zaken spelen hier een rol:

- **Klimaatverandering**: Uit de IPCC (2013) rapporten en de literatuur blijkt dat de huidige concentratie broeikasgassen in de atmosfeer zal leiden tot een geschatte temperatuurstijging van bijna 2 °C in de komende decennia. Eind 2012 werden door VMM-MIRA een aantal klimaatindicatoren geactualiseerd, waaruit bleek dat het in ons land al gemiddelde 2.3 °C warmer is dan de pre-industriële periode. Klimaatonderzoekers verwachten ook dat het aantal hittegolven en zeer warme dagen nog verder toeneemt. Onderzoek toont daarbij ook aan dat de intensiteit van het hitte-eiland effect toeneemt bij hogere temperaturen, m.a.w. hoe warmer, hoe intenser het hitte-eiland effect. Ook hier blijkt uit analyse van VMM-MIRA dat er een zekere trend aanwezig is in ons land met een verdubbeling van het aantal hittegolven sinds 1990 t.o.v. het gemiddelde van de 20^e eeuw.
- Een tweede facet aan dergelijke toekomstprognose dat we dienen in rekening te brengen is het veranderende **landgebruik**. Een stad is uiteraard geen statisch gegeven en zal zich deels afhankelijk van de macro-economische toestand gaan ontwikkelen. We beroepen ons hiervoor op de resultaten van de landgebruiksmodellering in het kader van de LNE studie “De Vlaamse Ruimte in 4 Wereldbeelden” en meer bepaald kiezen we voor een business-as-usual scenario gezien dit momenteel nog altijd als het meest waarschijnlijke geacht wordt. In de studie wordt rekening gehouden met een bevolkingstoename op basis van cijfers van het Federaal planbureau per arrondissement. In dit dynamisch landgebruiksmodel wordt de toekomstige invulling voor een bepaalde cel bepaald op basis van een aantal beslissingsregels die rekening houden met de *functionele omgeving* (i.e. het landgebruik in de onmiddellijke omgeving van de cel), de *bio-fysische geschiktheid* (kan een bepaalde cel weldegelijk een bepaald type landgebruik ondersteunen), de *beleidsstatus* (legale toestand, bestaande gewestplannen, beschermingszones etc...) en tenslotte de *ontsluiting* van de cel waarmee we de bereikbaarheid via verkeersinfrastructuur bedoelen. We zien in dit landgebruiksmodel in het centrum van Antwerpen een status quo naar 2030 toe, maar ook een verdere verdichting in de omliggende gemeenten rond Antwerpen.

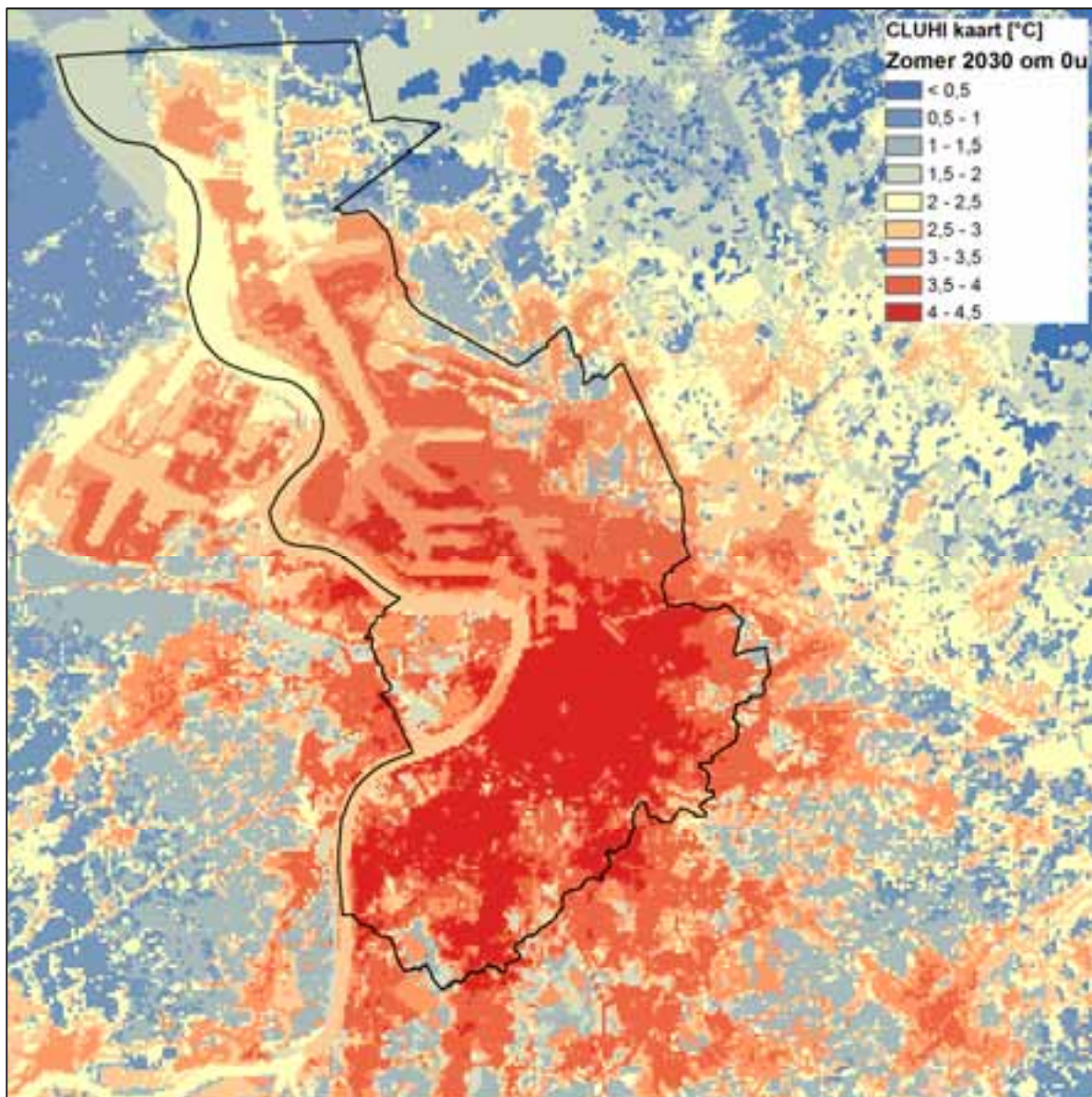
A. Toekomstprojectie stedelijk hitte-eiland effect omwille van klimaatverandering

Voor deze toekomstprojectie werd een doorrekening gedaan aan de hand van de meteorologische condities van één enkele zomerperiode, nl. de hete zomer van 2003, als representatief jaar voor een verwachte toekomstige zomer. Dit is uiteraard een significante simplificatie, maar gezien de beperkte beschikbare tijd voor deze studie hebben we geopteerd voor een pragmatische aanpak. Het is uiteraard niet voor niets dat men in klimaatscenarios typisch periodes van 10-30 jaar doorrekent. We kunnen echter wel op basis hiervan een inschatting doen van de impact van de klimaatverandering op het stedelijk hitte-eiland-effect voor Antwerpen.



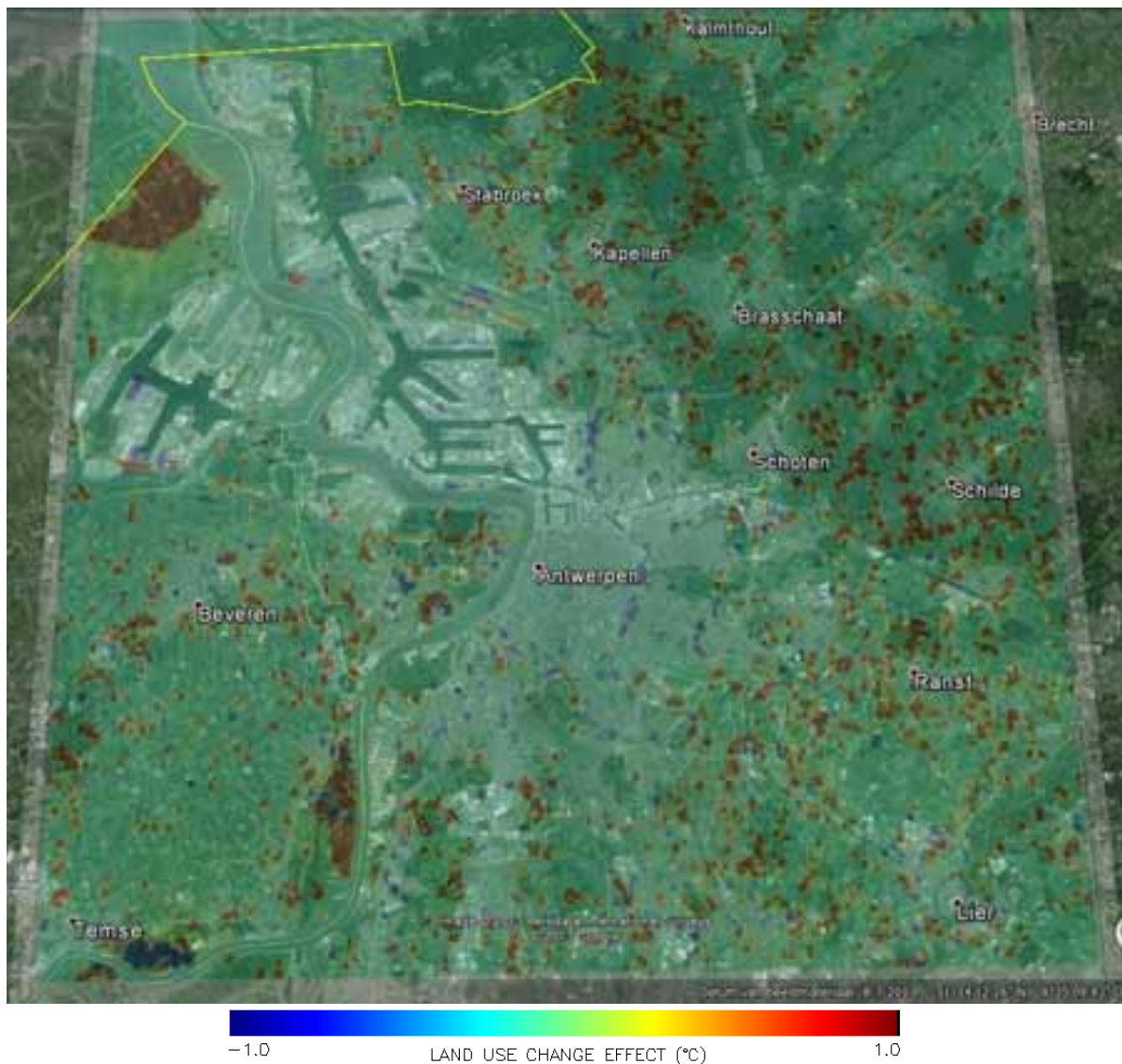
Bovenstaande figuur geeft het **gemiddeld** temperatuurverschil weer tussen de zomer van 2003 (onze proxy voor het toekomstig klimaat) en de zomer van 2013. We zien dat de temperatuur globaal gezien toeneemt met ongeveer 1°C, maar ook dat de stad en het havengebied nog een iets sterkere toename kennen tot 1.5°C. Het stedelijk warmte-eiland zorgt er dus voor dat de temperatuurstijging als gevolg van de klimaatverandering nog met ongeveer 50% wordt verhoogd in de stad. Ook bleek dat de binnenstad een 6-tal extra dagen met een nachtelijke minimum temperatuur boven de 18 °C ondervond, en een dubbel zo hoge stijging van de cooling degree hours dan het omringende platteland. Verder kon er een duidelijke toename van de pieken in SHE intensiteit vastgesteld worden.

De resulterende CLUHI kaart is in onderstaande figuur weergegeven. In vergelijking met de kaart voor de huidige situatie (zie boven) zien we dat de **maximale waarden** in de verstedelijkte zones van Antwerpen verder toenemen van 4 tot 4.5 °C. Gezien het hier gaat om een gemiddelde waarde voor de volledige zomer is dit toch een aanzienlijke stijging, en dat voor een erg groot gedeelte van het Antwerpse grondgebied.



B. Toekomstprojectie stedelijk hitte-eiland effect op basis van landgebruik in 2030

In onderstaande figuur is het model resultaat weergegeven van het effect van de toegepaste landgebruiksveranderingen op de gemiddelde temperatuur van de volledige zomer. We zien dat de effecten beperkt zijn, zowel in grootte als in hun ruimtelijke omvang. Lokaal ondervinden verstedelijkte zones een temperatuurstijging van maximaal 1 °C, maar er zijn ook zones waar er door bebossing of uitbreiding van natuurgebied een temperatuurdaling kan verwacht worden. We dienen hierbij wel op te merken dat deze geïdentificeerde zones het resultaat zijn van een landgebruiksprojectie aan de hand van een dynamisch landgebruiksmodel, er is m.a.w. enige onzekerheid voor wat betreft de locatie van de individuele zones van sterke verstedelijking. De landgebruiksprojecties bevatten met name geen directe informatie afkomstig van concrete beleidsplannen van de Stad Antwerpen. De grote trends die we hieruit echter kunnen halen lijken wel relevant, nl. een toename van het SHE-effect t.g.v. verstedelijking vooral in de buurgemeenten van Antwerpen, en niet zozeer in Antwerpen zelf, met een lokale toename van ongeveer 0.5 °C tot in bepaalde gevallen 1 °C gemiddeld.



Algemene conclusies en beleidsaanbevelingen

Tenslotte worden de voornaamste conclusies uit dit onderzoek samengevat in Hoofdstuk 9. Op basis hiervan kan dan worden ingegaan op een aantal aanbevelingen en potentiële beleidsmaatregelen om het effect van hittestress voor de gezondheid van de bevolking te beperken, en het algemene welzijn in de stad te bevorderen. Dit betreffen zowel ruimtelijke, sociaal-economische, sensibiliserende, als andere organisatorische maatregelen. Daarbij bevelen wij aan zowel een generiek, als een gebiedspecifiek deel te onderscheiden. Het generieke deel betreft daarbij de algemene beleidsmaatregelen die men kan voorstellen om hitte-stress in Antwerpen te voorkomen; de gebiedspecifieke delen de meer concrete maatregelen die ook sterk context gevoelig zijn. Vanuit de algemene lijnen die uit het onderzoek naar voren komen kan men bijvoorbeeld denken aan de volgende generieke beleidslijnen:

- Uitbreiding en verdichting van opgaand groen (dus bomen en struiken) en gevelgroen. Idealiter wordt dit groen niet alleen geconcentreerd op enkele plekken, maar gespreid langs 'klimaatassen' vanuit de stad richting het meer koele ommeland. "Groene straten"-

projecten kunnen mogelijk ook de sociale cohesie versterken tussen de buurtbewoners, op basis van een gemeenschappelijk project en de contacten die dat meebrengt.

- De doorstroming van water doorheen de stad te bevorderen gezien stromend water minder vlug zal opwarmen.
- Tegelijkertijd is het gewenst om tijdens natte dagen zoveel mogelijk water vast te houden, waar mogelijk natuurlijk te zuiveren, om deze waterreservoirs in droge dagen weer te gebruiken.
- De koppeling van vegetatie en waterelementen resulteert in een koelend “oase”-effect. Deze koppeling kan eventueel geïntegreerd worden in een groen-blauw-route-netwerk met inbegrip van de hierboven vermelde ‘klimaatassen’. Best is om zoveel als mogelijk groene oevers en bomenaanplant langs de rivier- en kanaallopen te bevorderen, teneinde het verkoelend effect van water zoveel mogelijk te benutten.
- Voorzien van voldoende verkoelende plekken, badhuizen, watertappunten per buurt.
- Specifiek in het streven naar een ruimte neutrale ontwikkeling van de stad is nader ontwerpend onderzoek op microschaal aan te raden om een optimale combinatie van verdere verdichting te combineren met een beperking van het SHE. Enkele voorbeelden hiervan worden in Hoofdstuk 9 gegeven.
- Een verdere sensibilisering van de bevolking, werkers en bezoekers zal uiteraard de impact van het SHE reduceren. Periodieke en ook op hittedagen toegespitste communicatie en informatie is hiertoe nodig; met name ook richting kansarmen, Belgen van vreemde afkomst/niet-Belgen en (onvermoede) bezoekers aan de stad. Daarnaast is het gewenst te komen tot een flankerende programmering ter versterking van de onderlinge sociale controle, met name ook bij alleenstaanden en bejaarden. Dat geldt tevens voor een aangepaste zomerse sport-, recreatie- en eventprogrammering, en een aangepast openlucht speelpleinprogramma op hittedagen. Gratis verlening van drinkwater (op deze dagen) kan helpen.

Naast deze generieke maatregelen is het gewenst om meer gebiedsgerichte maatregelen te overwegen. Als voorbeeld zullen we hier ingaan op de hierboven besproken Noordwijk, andere voorbeelden zijn terug te vinden in Hoofdstuk 9. Om de situatie te verbeteren en de Noordwijk binnen de gegeven beperkingen meer robuust te maken, kan gedacht worden aan de volgende mogelijkheden:

- Een zoveel mogelijk SHE-neutrale aanleg binnenstedelijke verdichting; waaronder:
 - o Het zoveel mogelijk gebruik van reflecterende, lichte bouwmaterialen;
 - o Gebruik groene daken, bevordering groene gevels, schaduwplekken en pergola's;
 - o Zoveel mogelijk voorkoming asfalt in de buitenruimte, waar mogelijk herstel met licht gekleurde betonplaten en/of grassteen;
 - o Het opzetten van collectieve ontwerpende verkenning voor een klimaat robuuste opzet, waarin ook de informatie, kennisuitwisseling met en zelfinitiatief van de (aangrenzende) bevolking zoveel mogelijk wordt gestimuleerd.
- Een consequente uitvoering van alle openlucht parkeerplaatsen met grasbeton en/of open groene tegels (reductie fractie verharding met 40-70%), ook ter bevordering van de waterinlaat in de ondergrond.
- Aangepast binnenblok beleid, door het afbreken of beperken van bebouwing en/of bevordering van een groene daken programma waar mogelijk.
- Bevordering van nieuwe buurtgebonden collectieve parkeerruimten en/of deel autogebruik, in combinatie met een bomen voor parkeren programma in de buurtstraten; mogelijk naar voorbeeld van de woonerven in Nederland.
- Sociaalgroene dooradering van de wijk naar voorbeeld van bijv. De Venning Kortrijk of de Foodscape Schilderswijk Den Haag (zie Hoofdstuk 9).

- Bevordering schaduwrijke speelterreinen voor jonge kinderen en bij de betreffende peuter- en kleuteropvang; vergroening kleine pleintjes
- In alle geval een op hitte dagen toegespitst informatie- en communicatieprogramma voor de niet-Belgen in de wijk. Dit kan via in taal aangepaste brochures, informatieavonden in koffie-, buurt-, badhuizen e.d. of via de reguliere kanalen bij de school en moskee.

INHOUD

Verspreidingslijst	I
Woord vooraf	II
Samenvatting	III
Inhoud	XXXII
Lijst van tabellen	XXXV
Lijst van figuren	XXXVII
Lijst van afkortingen	XLIII
Lijst van symbolen	XLIV
HOOFDSTUK 1. Inleiding	1
1.1. <i>Inleidende begrippen en doel van de studie</i>	1
1.2. <i>Opbouw van de studie</i>	4
HOOFDSTUK 2. Meetcampagne	6
2.1. <i>Meetcampagne vaste sensoren</i>	6
2.1.1. Beschrijving sensoren	6
2.1.2. Keuze van de meet-locaties	8
2.1.3. Verwerking en analyse van de resultaten	10
2.2. <i>Mobiele meetcampagne</i>	21
2.2.1. Beschrijving meetmethode	21
2.2.2. Analyse resultaten	23
HOOFDSTUK 3. Detectie van de oorzaken	32
3.1. <i>De onafhankelijke variabelen</i>	33
3.1.1. De sky view factor	33
3.1.2. De fractie vegetatie	34
3.1.3. De fractie water	36
3.1.4. De fractie verharding	37
3.2. <i>Resultaten</i>	38
HOOFDSTUK 4. Analyse van het Oppervlakte Hitte-eiland effect in Antwerpen	42
4.1. <i>Inleiding</i>	42
4.1.1. Afleiden van oppervlakte temperatuur op basis van satelliet gegevens	43
4.1.2. Effect van geometrie en schaal op de oppervlakte temperatuur	46
4.2. <i>Beschrijving opgevraagde ASTER beelden</i>	47
4.2.1. Kwalitatieve beschrijving	47
4.2.2. Analyse van enkele transecten	52
4.2.3. Detectie van trends in de oppervlakte temperaturen	55

4.2.4.	SUHI voor een winter-situatie _____	56
4.3.	<i>Downscaling SUHI kaart naar 30m</i>	58
4.3.1.	Methodiek _____	58
4.3.2.	Toepassing en analyse downscaling _____	63
4.4.	<i>Vertaling naar potentiële dagstress</i>	66
4.4.1.	Ter inleiding : de stralingsbalans _____	66
4.4.2.	Afleiden van de Sky View Factor uit het 3D hoogtemodel van Antwerpen _____	69
4.4.3.	Potentiële bezonning in Antwerpen _____	70
4.4.4.	Mean Radiant Temperature _____	71
HOOFDSTUK 5.	Analyse Canopy Layer Urban Heat Island _____	77
5.1.	<i>Modelberekeningen aan de hand van URBCLIM</i>	77
5.1.1.	Woord vooraf _____	77
5.1.2.	Beschrijving URBCLIM _____	78
5.1.3.	Resultaten van de luchttemperatuur modellering _____	88
5.2.	<i>Validatie van de modelberekeningen</i>	91
5.2.1.	Temporele validatie luchttemperatuur en CLUHI effect _____	91
5.2.2.	Ruimtelijke validatie luchttemperatuur en CLUHI effect _____	94
5.3.	<i>Bespreking afgeleide grootheden</i>	96
HOOFDSTUK 6.	Potentiële impact _____	101
6.1.	<i>Inleiding</i>	101
6.2.	<i>Gezondheid en welzijn</i>	101
6.2.1.	Nachtrust _____	101
6.2.2.	Hitte en gerelateerde ziektebeelden (morbiditeit) _____	102
6.2.3.	Voortijdige overlijdens (mortaliteit) _____	105
6.3.	<i>Energieverbruik</i>	108
6.4.	<i>Faling van infrastructuur</i>	109
6.4.1.	Snellere degradatie van wegen en vervorming van treinsporen _____	109
6.4.2.	Tekorten aan koelcapaciteit zullen vaker leiden tot elektriciteitspannes _____	109
6.5.	<i>Positieve effecten van het SHE</i>	110
6.5.1.	Groeiseizoen 10 km rond steden verlengd met 2 weken _____	110
6.5.2.	Terrasjesweer _____	110
6.6.	<i>Conclusie</i>	110
HOOFDSTUK 7.	Kwetsbaarheidsanalyse _____	111
7.1.	<i>Inleiding</i>	111
7.2.	<i>Kwetsbaarheid op buurtniveau in Antwerpen</i>	111
7.2.1.	Demografische parameters _____	116
7.2.2.	Sociaal-economische factoren _____	118
7.2.3.	Kwetsbare functies _____	120
7.3.	<i>Analyse kwetsbaarheid voor enkele case studies</i>	123
7.3.1.	Noordwijk _____	124
7.3.2.	Museumwijk _____	125
7.3.3.	Harmonie _____	127

7.3.4.	Ten Eekhave	128
7.3.5.	Lambrechtschoeken	130
HOOFDSTUK 8.	Toekomstprojectie	132
8.1.	<i>Inleiding</i>	132
8.1.1.	klimaatverandering	132
8.1.2.	Evolutie van het landgebruik in en om Antwerpen	133
8.2.	<i>Analyse toekomst scenario</i>	137
8.2.1.	Effect van de klimaatverandering	137
8.2.2.	Effect van de verdere verstedelijking	141
HOOFDSTUK 9.	Conclusies en Beleidsaanbevelingen	144
9.1.	<i>Conclusies</i>	144
9.1.1.	Doet het Stedelijk Hitte Eiland (SHE) effect zich in Antwerpen voor en waar dan het meest?	144
9.1.2.	Wat zijn de meest relevante fysische oorzaken voor dit SHE-effect?	145
9.1.3.	Welke buurten zijn het meest SHE stressgevoelig en kwetsbaar?	145
9.1.4.	Neemt de SHE-gevoeligheid in Antwerpen naar verwachting in de nabije toekomst toe of af?	146
9.2.	<i>Beleidsaanbevelingen</i>	147
9.2.1.	Generieke aanbevelingen	147
9.2.2.	Specifieke aanbevelingen	151
Bijlage A :	Tijdsreeksen voor volledige zomerperiode voor in-situ metingen	156
Bijlage B :	SHE kwetsbaarheidskaarten	161
Literatuurlijst		182

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1 : Korte beschrijving van de verschillende meetlokaties door VITO geïnstalleerd en uitgebaat. In de eerste twee stations worden zowel luchttemperatuur (actief & passief), vochtigheid, invallende zonnestraling en windsnelheid/richting gemeten. In de laatste drie enkel luchttemperatuur en relatieve vochtigheid. Van de eerste twee meetstations hebben we een gemiddelde meetwaarde elke 15 minuten van de afgelopen 15 minuten (waarbij het gemiddelde berekend is aan de hand van samples genomen elke 5 seconden), voor de laatste 3 sensoren slaan we telkens een sample op om de 10 minuten.	9
Tabel 2 : Tabel met gemiddelde, maximale en 95 percentiel waarden van de intensiteit van het UHI effect voor de zomer van 2013. Merk op dat de waarden in het stadspark gecorrigeerd zijn voor het wegvallen van de ventilatie.	15
Tabel 3 : Tabel die aangeeft hoeveel nachten de temperatuur niet onder de 18 of 20 °C zakte. Onderaan zijn de waarden voor Vremde aangegeven. In deze analyse bekeken we in totaal 63 dagen (Juli/Augustus).	15
Tabel 4 : Geanalyseerde transecten gereden 's avonds op 04/09/2013	23
Tabel 5 : Temperatuurwaarden gemeten door de in-situ metingen te Vremde, KLA en aan de Polderdijkweg op het start en eindpunt van de mobiele transecten.	28
Tabel 6 : Gemeten temperatuursafname (helling van de luchttemperatuurgrafiek voor de gegeven transecten gemeten op 3 verschillende lokaties en de gemiddelde waarde.	29
Tabel 7: Onafhankelijke variabelen van het regressiemodel.	32
Tabel 14: Resultaten individuele correlatie analyse van de gecorrigeerde luchttemperaturen langs transect 3.1 en de 4 proxy variabelen.	39
Tabel 7: Basis karakteristieken van oppervlakte en atmosferische hitte-eilanden. Naar (US-EPA, 2013), zie ook http://www.epa.gov/heatid/	42
Tabel 8: Tabel met de aangekochte ASTER beelden boven Antwerpen. De linker kolom geeft het identificatienummer van de scene, waarmee het beeld makkelijk teruggevonden kan worden op de zoekmachine http://ims.aster.ersdac.jspacesystems.or.jp/ims/html/MainMenu/MainMenu.html	47
Tabel 9: In-situ meteorologische condities voor de ASTER beelden. Bron : http://meteo.infospace.ru/ , station Deurne (51°12'NB, 4°28'OL) voor Antwerp – Belgium. De tijdstippen voor de LST opnames zijn in lokale tijd weergegeven. Het tijdstip van de waarnemingen afkomstig van de vermelde site is telkens 13:00 lokale tijd.	49
Tabel 10: Tabel met gebruikte waarden in de URBCLIM modellering voor albedo, emissiviteit en ruwheidslengte (voor momentum). Voor albedo en emissiviteit wordt telkens een waarde opgegeven voor vegetatie en voor afwezigheid van vegetatie. Deze waarden zijn representatief voor gridcellen van de desbetreffende LAICa klasse in de veronderstelling dat die volledig door vegetatie bedekt is, of anderzijds er geen vegetatie aanwezig is. De in het model gebruikte waarde zal dan het aan de hand van de voorkomende fractie vegetatie gewogen gemiddelde tussen beide zijn.	83
Tabel 11: Mapping van de klassen tussen het dynamisch landgebruiksmodel van Engelen et al. (2011) en de LAICa landgebruiksklassen in de URBCLIM modellering.	86
Tabel 12: Validatie statistieken voor de ruimtelijke validatie van het CLUHI.	96
Tabel 15: Relatief risico voor 4 "ziektepatronen" in Californië tijdens de hitte golf van 15 Juli tot 1 Augustus 2006 (versus de referentie periode (8–14 Juli en 12–22 Augustus 2006)	103
Tabel 16: Parameters SHE kwetsbaarheid naar dag- en nachtstress. Bron: Buurtmonitor Antwerpen - http://www.antwerpen.buurtmonitor.be/	114
Tabel 17: Statistische analyse op buurtniveau in Antwerpen, naar demografische gevoeligheid SHE116	
Tabel 18: Statistische analyse op buurtniveau in Antwerpen, naar sociaaleconomische gevoeligheid SHE	118

Tabel 19: Statistische analyse op buurtniveau in Antwerpen, naar SHE gevoeligheid kwetsbare functies. _____	120
Tabel 20: Analyse van Noordwijk voor de verschillende SHE-verklarende variabelen. _____	125
Tabel 21: Analyse van de Museumwijk voor de verschillende SHE-verklarende variabelen. _____	126
Tabel 22: Analyse van Harmonie voor de verschillende SHE-verklarende variabelen. _____	128
Tabel 23: Analyse van Ten Eekhave voor de verschillende SHE-verklarende variabelen. _____	129
Tabel 24: Analyse van Lambrechtshoeken voor de verschillende SHE-verklarende variabelen. _____	131

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: De verschillende UHI types (Voogt en Oke, 2003)	2
Figuur 2 : De symbolen geven de gemiddelde intensiteit (en standaardafwijking) van het CLUHI effect in Parijs op de luchttemperatuur telkens om 22:00 UT gedurende mei - september 2003. De waarden zijn weergegeven in intervallen van 2°C van de gemiddelde luchttemperatuur.	3
Figuur 3 : Afbeelding van de sensoren op de 2 professionele VITO urban climate meetstations. De verschillende aanwezige sensoren worden besproken in de tekst.	7
Figuur 4 : Afbeelding van de Onset HOBO U23-002 Pro v2 logger met externe voeler voor temperatuur en vochtigheid.	7
Figuur 5 : Locatie van de verschillende meetsites in en om antwerpen. De rode pins zijn de HOBO loggers (zie hoger), de blauwe pins de externe databronnen en de gele pins de urban climate meetstations.	8
Figuur 6 : Tijdsreeksen van gemeten luchttemperatuur, het verschil van de stedelijke stations met de rurale referentie en de windsnelheid. De afgebeelde periode hier is 01/07/2013 tot 15/07/2013. Hier werd de geen correctie doorgevoerd of rekening gehouden met de stilgevallen ventilatie in het stadspark. We merken dan ook dan voor een aantal dagen (zoals duidelijk op 22/07) overdag de temperatuur gemeten in het stadspark het hoogst is.	11
Figuur 7 : Weergaven van de gemiddelde dag cyclus van het luchttemperatuurverschil tussen de stedelijke lokaties en de rurale referentie te Vremde. Voor elk uur van de dag (horizontale as, in lokale zomer-tijd) is de gemiddelde intensiteit van het UHI effect weergegeven voor dat uur. M.a.w. de waarde om 20h 's avonds is het gemiddelde temperatuursverschil om 20h 's avonds overheen alle dagen van de zomerperiode. We beelden m.a.w. een soort "gemiddelde" dag af. In deze figuur is geen correctie doorgevoerd voor de ontbrekende ventilatie van de meting in het stadspark. De breedte van de band geeft de statistische onzekerheid op dit gemiddelde en is een maat voor de variabiliteit van het effect voor dat uur.	12
Figuur 8 : In deze figuur wordt dezelfde informatie afgebeeld als hierboven, maar dan wel met correctie voor de metingen in het stadspark, waarbij de periode waarbinnen de ventilatie niet actief was is weggelaten.	13
Figuur 9 : Gemiddelde dag cyclus van de stations in de haven : Polderdijkweg, Luchtbal (VMM) en Zwijndrecht - 8m (VMM) t.o.v. de rurale referentie te Vremde en vergeleken met de dag cyclus gemeten in brogerhout.	14
Figuur 10 : Geografische weergave van het gemeten gemiddelde UHI effect overdag (links) en 's nachts (rechts) gedurende de zomer van 2013.	16
Figuur 11 : Geografische weergave van de 95 ^{ste} percentiel waarde van het UHI effect overdag (links) en 's nachts (rechts) gedurende de zomer van 2013, berekend op de uurlijkse waarden.	16
Figuur 12 : Geografische weergave van het aantal nachten waarop de luchttemperatuur niet onder de 20 °C (links) of niet onder de 18°C zakt (rechts) gedurende de zomer maanden juli en augustus. Voor deze analyse werden de gecompromitteerde metingen in het stadspark ook meegenomen omdat de nachtelijke minimum temperatuur uiteraard weinig beïnvloed wordt door de invallende zonnestraling overdag en de metingen hiervoor dus wel bruikbaar zijn.	17
Figuur 13 : UHI windroos voor het Lyceum, links voor het gemiddelde UHI effect, rechts voor het 95 ^{ste} percentiel.	18
Figuur 14 : UHI windroos voor Borgerhout, links voor het gemiddelde UHI effect, rechts voor het 95 ^{ste} percentiel.	18
Figuur 15 :UHI windroos voor het Deurne, links voor het gemiddelde UHI effect, rechts voor het 95 ^{ste} percentiel.	19
Figuur 16 :UHI windroos voor de Polderdijkweg, links voor het gemiddelde UHI effect, rechts voor het 95 ^{ste} percentiel.	19

Figuur 17 :UHI windroos voor Zwijndrecht, links voor het gemiddelde UHI effect, rechts voor het 95 ^{ste} percentiel.	20
Figuur 18 : UHI windroos voor Luchtbal, links voor het gemiddelde UHI effect, rechts voor het 95 ^{ste} percentiel.	20
Figuur 19 : Actief en passief geventileerde luchttemperatuursensoren, gemonteerd op een voertuig. Als sensoren zelf maakten we telkens gebruik van dezelfde HOBO U23-002 loggers die we (1) onderbrachten in een actief geventileerd stralingsschild dat via de 12V aansluiting van de auto van stroom voorzien werd en (2) een passief geventileerde stralingsbehuizing.	21
Figuur 20 : Samenvattend schema voor de meetopstelling van de mobiele metingen.	22
Figuur 21 : Ruwe luchttemperatuur metingen van het transect 2.2, gemeten vanaf Vremde (19:17) tot ver in de haven, ter hoogte van de kerncentrale in Doel (20:21).	24
Figuur 22 : Ruwe luchttemperatuur metingen van het transect 3.1, gemeten vanaf Vremde (22:10) tot ver in de haven (23:04), ter hoogte van de kerncentrale in Doel.	25
Figuur 23 : Ruwe luchttemperatuur metingen van het transect 3.2, gemeten vanaf de Haven (23:04), via het Centrum en borgerhout tot aan de scheldekaai (23:52).	26
Figuur 24 : Enkele uitvergrotingen van transecten 2.2 ter hoogte van het stadspark en 3.2 ter hoogte van de Scheldelaan in de haven van Antwerpen.	27
Figuur 25 : Grafiek van de gemeten transecten 2.2, 3.1 en 3.2 (van boven naar onder) met tijdsaanduiding.	28
Figuur 26 :Afkoeltempo voor vrijdagnamiddag 04/09/2013 berekend als een verschil in °C/sec, gemiddeld tussen 18:00 en 01:00 (volgende dag) lokale tijd. Op de figuur zijn de meetlokaties voor Vremde, Lyceum en Polderdijkweg aangegeven met de o. Op de originele 100m urbcim berekeningen is een 2D gaussische filter toegepast met breedte 15 pixels en sigma 5 pixels om de helling ruimtelijk iets homogener te maken.	29
Figuur 27 : Gecorrigeerde luchttemperatuurprofielen.	30
Figuur 28 : Transect 2.2 (zie hogerstaande figuur), maar ditmaal rechts met correctie voor de grootschalige temperatuurgradiënt.	31
Figuur 29: De sky view factor (Bron: Oke, 1982)	33
Figuur 30: De Sky View Factor in Antwerpen, herschaald naar het 100m UrbClim grid.	34
Figuur 31: De meting van NDVI aan de hand van het nabije infrarood (near infrared) en het zichtbare rood (visible) op een boom tijdens de lente en herfst (Bron: (NASA, 2013)).	35
Figuur 81: De fractie vegetatie per gridcel van 100 m voor Antwerpen.	36
Figuur 82: De fractie water per gridcel van 100 m voor Antwerpen.	37
Figuur 83: De fractie verharding per gridcel van 100 m voor Antwerpen.	38
Figuur 84: Correlatie analyse tussen de verschillende proxy variabelen in de gemeten, gecorrigeerde luchttemperatuur langs transect 3.1	39
Figuur 85: Vergelijking tussen de originele (gecorrigeerde) luchttemperaturen op transect 3.1 en de resultaten van het regressiemodel op basis van de proxy parameters.	40
Figuur 86: Resultaat van het toepassen van het regressie model op Antwerpen. Dit geeft een ruimtelijke expliciete inschatting weer van de luchttemperatuur 's avonds op 04.09.2013 omstreeks 22:00h. Dit is een eenvoudige inschatting van de CLUHI-situatie, voor een meer accurate weergave verwijzen we naar het hoofdstuk over de modellering.	41
Figuur 29: Schematische voorstelling van het elektromagnetisch spectrum.(Bron: http://nl.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisch_spectrum)	44
Figuur 30: Absorptie karakteristiek van de aardatmosfeer het infrarode deel van het EM spectrum. De grafiek toont het percentage van de IR straling dat bij een bepaalde golflengte door de atmosfeer wordt doorgelaten. De verschillende absorptiebanden, veroorzaakt voornamelijk door waterdamp (H ₂ O) en het broeikasgas CO ₂ zijn onderaan weergegeven. (Bron: http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared)	44
Figuur 31: Illustratie van het effect van de waarnemingshoek voor satelliet gebaseerde observaties van oppervlakte temperatuur.	46

Figuur 32: Enkele 'quicklooks' van de ASTER oppervlakte temperatuurdata. Alle opnames zijn op dezelfde schaal afgebeeld (onderaan), eenheden in °C.	48
Figuur 33: Correlatie analyse tussen de gemeten luchttemperatuur (zie Tabel 9) en de mediaan voor elk oppervlakte temperatuurbeeld (per beeld een datapunt). De correlatie tussen beiden is uitgedrukt in de R^2 coëfficiënt en het lineaire verband door de rechte in rood.	49
Figuur 34: Genormeerde SUHI kaarten voor de twee ASTER LST beelden met het meest uitgesproken SUHI effect. De kaarten geven telkens het temperatuurverschil in de pixel t.o.v. de mediaan temperatuur van het beeld.	50
Figuur 35: Detail van de SUHI kaart van 24 juli 2012.	51
Figuur 36: Locatie van de gekozen transecten.	52
Figuur 37: Transect 1 : Linkeroever – historisch centrum – Zoo – Rivierenhof.	53
Figuur 38: Transect 2 : Albertkanaal – Zoo – Stadspark – Ring (zuid).	54
Figuur 39: Transect 3 : Havenweg – dokken – historisch centrum.	55
Figuur 40: Google earth overlay van de SUHI verschilkaart tussen 2006 en 2012 op basis van de genormaliseerde SUHI kaarten van 1 juli 2006 en 24 juli 2012.	56
Figuur 41: SUHI kaart voor een winter situatie op basis van het ASTER LST beeld van 2006-11-29.	57
Figuur 42: Typische spectrale reflectantie van Vegetatie (groene cirkels) en gewone grond (blauwe cirkels). In deze figuur zijn de banden van het SPOT-VEGETATION instrument weergegeven, de rode en NIR band van de TM/ETM+ instrumenten aan boord van Landsat zijn heel gelijk aardig (Rood : 0.63-0.69 μm , NIR : 0.76-0.90 μm). Bron: VITO (www.spot-vegetation.com).	58
Figuur 43: Landsat NDVI beeld op 16 juli 2006. De kleurschaal gaat van paars (geen vegetatie) tot donkergroen (100% vegetatie).	59
Figuur 44: Schematisch overzicht van de downscaling procedure voor een ASTER LST beeld aan de hand van Landsat NDVI.	61
Figuur 45: Grafische voorstelling van het downscaling algoritme gebaseerd op een lokale regressie tussen hersampled NDVI en ASTER LST.	62
Figuur 46: Vergelijking tussen de ruwe ASTER 90 m SUHI kaart (rechts), en de gedownscalede versie op basis van Landsat NDVI (links).	63
Figuur 47: Uitvergroting van de (op basis van de NDVI) gedownscalede ASTER oppervlaktetemperatuur.	64
Figuur 48: Vergelijking tussen de originele ASTER (kader) en de adhv NDVI gedownscalede oppervlakte temperatuur voor een gebied in de haven.	65
Figuur 49: Controle van de downscaling : vergelijking tussen de originele LST waarden van ASTER en de geaggregeerde, gedownscalede LST waarden.	66
Figuur 50: Schematische afbeelden van de verschillende stralingsfluxen (W/m^2) die invallen op een menselijk lichaam in het stedelijk gebied. Merk op dat we de gereflecteerde kort en langgolvlige straling hebben weggelaten als mede de warmtestraling (IR of langgolvlige straling) die een persoon zelf uitzendt.	67
Figuur 51: Illustratie van de sky view factor, bron : www.knmi.nl/klimatologie/weeramateurs/UHI/index.html	69
Figuur 52: Illustratie van bepaling van SVF met zogeheten fish-eye lenzen (Chapman and Thornes, 2004).	69
Figuur 53: Voorbeeld van de afgeleide sky view factor voor een uitvergroting van het centrum van Antwerpen. Men kan duidelijk de smalle straatjes met een lagere sky view factor zien en de eerder open pleinen met een hogere SVF.	70
Figuur 54: Detail afbeelding in het centrum van Antwerpen van de totale potentiële bezonning over een zomer seizoen van mei tot september, onder heldere hemel.	71
Figuur 55: Grafiek van de area projected factor. Er worden een aantal verschillende parameterisaties afgebeeld met name afkomstig van www.utci.org en de parameterisatie gebruikt in het ENVI-met model (www.envi-met.com).	72
Figuur 65: Potentiële MRT op basis van het gedownscalede ASTER beeld van 2012-07-24.	74

Figuur 57: Detail van de potentiële MRT voor het centrum van Antwerpen. _____	75
Figuur 58: Detail van de potentiële MRT voor een gebied in de haven. _____	75
Figuur 59: Google-Earth Screenshot van de MRT kaart zoals hoger beschreven. _____	76
Figuur 60: Schematische voorstelling en trade-off inzake complexiteit, rekentijd en rooster cel grootte van stedelijke klimaatmodellen. _____	79
Figuur 61: Schets van de deterministische modellering van stedelijke luchttemperatuur aan de hand van URBCLIM. _____	81
Figuur 62: Afbeelding van het model grid gebruikt voor de modellering in Antwerpen. Het grid telt 301 x 301 rooster cellen van 100m. Het model bevat voorts ook 20 verticale niveaus gaande van 10 m tot 3 km hoogte. Het model werkt in Belgische Lambert 72 coördinaten. _____	82
Figuur 63: Schematische voorstelling van de verlaagde effectieve albedo in stedelijke omgeving. _____	84
Figuur 64: Afbeelding van de landgebruiksklassen in Vlaanderen van Engelen et al. (2011). _____	85
Figuur 65 : Karakterisatie van het oppervlak voor de URBCLIM modellering. _____	87
Figuur 66: Gemiddelde luchttemperatuur per uur van de dag over de zomer van 2013 (juli en augustus) in Antwerpen. De figuren starten om middernacht. _____	88
Figuur 67: Gemiddeld CLUHI(als temperatuurverschil tussen de stad en de mediane temperatuur van het omliggende platteland) per uur van de dag over de zomer van 2013 (juli en augustus) in Antwerpen. De figuren starten om middernacht. _____	89
Figuur 68: Uitvergroting van de gemiddelde CLUHI intensiteit voor Antwerpen voor de zomer van 2013 (juli en augustus) om 00:00h lokale tijd op basis van de URBCLIM modellering op 100 m. _____	90
Figuur 69: Vergelijking van de tijdsreeksen van de gemeten en gemodelleerde luchttemperatuur. _____	92
Figuur 70: Analoge figuur als hierboven, maar ditmaal vergelijken we de tijdsreeksen van de temperatuurverschillen (CLUHI effect) t.o.v. de rurale locatie aan de bioboerderij in Vremde. _____	93
Figuur 71: Illustratie van de locatie van alle meetstations met als achtergrond de gemiddelde luchttemperatuur voor de validatieperiode (9 juli – 9 september 2013). _____	94
Figuur 72: Vergelijking van het gemiddelde CLUHI effect (t.o.v. Vremde) tijdens de zomer van 2013, onafhankelijk van het moment van de dag. De symbolen stellen telkens per meetlocatie de gemiddelde CLUHI intensiteit voor. De linkse figuur bevat het datapunt van het stadspark, de rechtse figuur niet. _____	95
Figuur 73: Analooq als hierboven, maar ditmaal beperken we ons tot het nachtelijk CLUHI effect alleen. _____	95
Figuur 74: 95 ^{ste} percentiel van de UHI intensiteit voor Antwerpen gedurende de zomer 2013 (Juli - Augustus). _____	97
Figuur 75: Berekeningen omtrent de nachtelijke minimum temperatuur gedurende de zomermaanden van 2012. _____	98
Figuur 76: Cooling degree hours en heating degree hours : Het totaal aantal graad-uren boven de 25 °C , gelinkt aan energieverbruik voor koeling (airco) , en het aantal graad-uren onder de 16 °C, gelinkt aan energieverbruik voor verwarming. _____	99
Figuur 77: Links: Grafische voorstelling van cooling en heating degree days. Bron: http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/temperature , rechts: energie verbruik als functie van de dagelijkse maximum temperatuur in New Orleans (Sailor en Muñoz, 1997). _____	100
Figuur 87: Temperatuur-mortaliteit relatieve risico functies voor 11 steden in de V.S.A.. Veertig graden Fahrenheit (°F) komt overeen met 4 graden Celcius (°C), 60°F met 16°C en 80°F met 27°C. Noordelijke steden: Boston, Massachusetts; Chicago, Illinois; New York, New York; Philadelphia, Pennsylvania; Baltimore, Maryland; Washington, DC; Zuidelijke steden: Charlotte, North Carolina; Atlanta, Georgia; Jacksonville, Florida; Tampa, Florida; Miami, Florida. Graden Celcius = 5/9 x (°F-32). Figuur uit Curriero et al. (2002). _____	106

Figuur 88: SUHI op 24 Juli 2012 om 12u per statistische sector in Antwerpen. Deze kaart is een indicatie voor de dagstress die mensen buiten ondervinden op een hete zomerdag. _____	112
Figuur 89: CLUHI om 0u, gemiddeld voor de hele zomer van 2013, per statistische sector in Antwerpen. Deze kaart is een indicatie voor de nachtstress die mensen ondervinden. _____	113
Figuur 90: SHE kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen voor de combinatie van alle demografische parameters, zowel voor dag- als nachtstress. _____	117
Figuur 91: SHE kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen voor de combinatie van alle sociaal-economische parameters, zowel voor dag- als nachtstress. _____	119
Figuur 92: SHE kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen voor de combinatie van alle kwetsbare functies, zowel voor dag- als nachtstress. _____	122
Figuur 93: Keuze buurten Antwerpen. _____	123
Figuur 94: Visueel beeld van de Noordwijk. Bron: Google Earth. _____	124
Figuur 95: Visueel beeld van de Museumwijk. Bron: Google Earth. _____	126
Figuur 96: Visueel beeld van de Harmonie. Bron: Google Earth. _____	128
Figuur 97: Visueel beeld van Ten Eekhave. Bron: Google Earth en gva.be. _____	129
Figuur 98: Visueel beeld van Lambrechtshoeken. Bron: Google Earth en antwerpen.be. _____	130
Figuur 99: De symbolen geven de gemiddelde intensiteit (en standaardafwijking) van het UHI effect in Parijs op de luchttemperatuur telkens om 22:00 UT gedurende mei - september 2003. De waarden zijn weergegeven in intervallen van 2°C van de gemiddelde luchttemperatuur. Bron: VITO – Urban Heat Islands project (ESA-DUE). _____	133
Figuur 100: Dynamische landgebruiksmodellering voor Vlaanderen : basis jaar anno 2010 (boven), business as usual scenario 2050 (onder). _____	135
Figuur 101: Landgebruikskaarten in de LAICa klassen afgeleid op basis van de landgebruiksprojecties van (Engelen et al., 2011). Boven links: situatie in 2010, rechts : verwachte situatie in 2030 volgens business as usual scenario. Onder links: Lokalisatie van alle verschillen tussen beide kaarten, rechts: de verstedelijkte gebieden. _____	136
Figuur 102: Verschil in de gemiddelde temperatuur in Antwerpen als gevolg van de opgelegde klimaatverandering. _____	138
Figuur 103: De gemiddelde CLUHI intensiteit voor Antwerpen voor de zomer van 2003 (juli en augustus) om 00:00h lokale tijd. _____	139
Figuur 104: Vergelijking tussen de P95 van de CLUHI intensiteit voor het basis scenario (links) en rechts de P95 intensiteit voor het toekomst scenario. _____	140
Figuur 104: Vergelijking tussen het aantal dagen met een nachtelijke minimum temperatuur boven de 18 °C voor het basis scenario links en het toekomst scenario rechts. _____	140
Figuur 105: Verschil in de gemiddelde temperatuur voor het BAU landgebruik scenario in 2030 ten opzichte van het landgebruik in 2010. _____	141
Figuur 106: Google-earth overlay van de bovenstaande figuur. _____	142
Figuur 107 : Tijdsreeksen van gemeten luchttemperatuur, het verschil van de stedelijke stations met de rurale referentie en de windsnelheid. _____	157
Figuur 108 : Tijdsreeksen van gemeten luchttemperatuur, het verschil van de stedelijke stations met de rurale referentie en de windsnelheid. De afgebeelde periode hier is 01/07/2013 tot 15/07/2013. _____	157
Figuur 109 : Tijdsreeksen van gemeten luchttemperatuur, het verschil van de stedelijke stations met de rurale referentie en de windsnelheid. De afgebeelde periode hier is 15/07/2013 tot 31/07/2013. _____	158
Figuur 110 : Tijdsreeksen van gemeten luchttemperatuur, het verschil van de stedelijke stations met de rurale referentie en de windsnelheid. De afgebeelde periode hier is 01/08/2013 tot 15/08/2013. _____	159
Figuur 111 : Tijdsreeksen van gemeten luchttemperatuur, het verschil van de stedelijke stations met de rurale referentie en de windsnelheid. De afgebeelde periode hier is 15/07/2013 tot 31/08/2013. _____	159

Figuur 112 : Tijdsreeksen van gemeten luchttemperatuur, het verschil van de stedelijke stations met de rurale referentie en de windsnelheid. De afgebeelde periode hier is 01/09/2013 tot 15/09/2013.	160
Figuur 113: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft jonge kinderen (0-9 jaar).	161
Figuur 114: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft jonge kinderen (0-9 jaar).	162
Figuur 115: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft ouderen (>65 jaar).	163
Figuur 116: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft ouderen (>65 jaar).	164
Figuur 117: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft het totaal aantal inwoners.	165
Figuur 118: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft het totaal aantal inwoners.	166
Figuur 119: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft het aantal alleenstaanden.	167
Figuur 120: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft het aantal alleenstaanden.	168
Figuur 121: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft het aantal allochtonen.	169
Figuur 122: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft het aantal allochtonen.	170
Figuur 123: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft ondermodaal inkomen.	171
Figuur 124: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft ondermodaal inkomen.	172
Figuur 125: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft werkloosheid.	173
Figuur 126: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft werkloosheid.	174
Figuur 127: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft de aanwezigheid van ziekenhuizen. De indeling in categorieën is hier gebeurd op basis van een exponentiële schaal omwille van de grote onderlinge verschillen.	175
Figuur 128: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft de aanwezigheid van ziekenhuizen. De indeling in categorieën is hier gebeurd op basis van een exponentiële schaal omwille van de grote onderlinge verschillen.	176
Figuur 129: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft de aanwezigheid van rusthuizen.	177
Figuur 130: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft de aanwezigheid van rusthuizen.	178
Figuur 131: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft de aanwezigheid van dagzorgcentra.	179
Figuur 132: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft de aanwezigheid van kleuterscholen.	180
Figuur 133: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft de aanwezigheid van kinderopvang.	181

LIJST VAN AFKORTINGEN

LST	Land Surface Temperature (oppervlakte temperatuur)
RH	Relative Humidity (relatieve vochtigheid)
SVF	Sky View Factor (zichtbare fractie van de hemel vanaf de grond)
EOS	Earth Observing System
EM	Elektro - magnetisch
IR	Infra rood, deel van het EM met golflengte tussen 780 nm en 1 mm
TIR	Thermisch InfraRood, deel van het IR spectrum tussen 8 en 14 μ m
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PAR	Photosynthetically Active Radiation
LAICa	Land Atmosphere Interaction Calculation (bodemmodel voor URBCLIM)
URBCLIM	Naam voor het VITO Urban Climate model, gebruikt voor de berekening van stedelijke luchttemperatuur
MRT	Mean Radiant Temperature
UTCI	Universal Thermal Climate Index
SHE	Stedelijk-Hitte-Eiland (eng: UHI : urban heat island)
CLUHI	Canopy Layer Urban Heat Island (lucht temperatuur hitte eiland)
SUHI	Surface Urban Heat Island (oppervlakte temperatuur hitte eiland)
RMSE	Root Mean Square Error (gemiddeld kwadratisch verschil tussen model en observatie)
BIAS	BIAS (gemiddeld verschil tussen model en observatie)
R ²	Verklaarde variantie, ook wel correlatie coëfficiënt genoemd, geeft aan in welke mate model en observatie samen variëren (kan zowel in de tijd als ruimtelijk zijn).
P95 / percentiel	De 95 ^{ste} percentiel waarde van een getallenreeks is die waarde uit de reeks waarvoor slechts 5% van de waarden hoger zijn. M.a.w. het P95 van een UHI tijdsreeks geeft aan dat slechts 5% van de UHI intensiteiten hoger zijn dan de gegeven waarde.

LIJST VAN SYMBOLEN

k_B	Constante van Boltzmann (= $1.3806488 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)
λ	Golflengte [m]
T	Temperatuur boven het absolute nulpunt [K], temperatuur in °C : $T - 273.15$
h	Constante van Planck (= $6.62606957 \times 10^{-34} \text{ J.s}$)
C	Lichtsnelheid (= $2.99792458 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$)
ε_λ	Spectrale emissiviteit [-]
b	Constante van Wien (= $2.89777 \times 10^3 \text{ K.m}$)
ψ_{sky}	Sky view factor [-]

HOOFDSTUK 1. INLEIDING

Bino Maiheu, VITO

1.1. INLEIDENDE BEGRIPPEN EN DOEL VAN DE STUDIE

Het is een gekend fenomeen dat de stedelijke omgeving een andere temperatuurdynamiek kent t.o.v. de omliggende landelijke gebieden. Het zogenaamde stedelijk warmte eiland effect (SHE) (Eng: Urban Heat Island of UHI) zorgt ervoor dat de luchttemperatuur in steden over het algemeen hoger is dan op het platteland. Dit effect is het sterkst uitgesproken 's avonds en 's nachts, typisch ~22:00 lokale tijd als maximum, terwijl het overdag veel geringer is of zelfs negatief. De belangrijkste oorzaken hiervan zijn (Oke, 1991) :

- De **thermische eigenschappen** van de **bouw materialen** gebruikt in stedelijke omgeving zorgen ervoor dat er meer warmte wordt opgeslagen. Materialen met een hoge warmte capaciteit (zoals beton) warmen weliswaar trager op, maar zorgen er ook voor dat er meer én langer warmte wordt afgegeven aan de atmosfeer. Stedelijke oppervlakken weerkaatsen verder ook effectief minder zonlicht in vergelijking met de rurale omgeving.
- Steden kennen een sterke **reductie van natuurlijke oppervlakken (minder vegetatie, meer verharding)**: boven natuurlijke oppervlakken met een niet gering percentage aan bodemvocht zal een deel van de beschikbare warmte gebruikt worden voor de verdamping van water i.p.v. de opwarming van de atmosfeer.
- Door de **geometrie van steden**, met soms hele diepe street canyons⁷, kan het stedelijk oppervlak minder snel warmte verliezen door uitstraling. Onder heldere (wolkenloze) atmosferische condities is het zo dat in open ruraal gebied deze uitstraling heel sterk is, waardoor het 's nachts aan de grond sterk kan afkoelen.
- Vervolgens dragen ook de mensen en menselijke activiteiten bij tot het warmte-eiland effect. Deze **antropogene warmte** is naast het menselijk metabolisme ondermeer afkomstig van air conditioning installaties, warme uitlaatgassen van voertuigen en industriële installaties.

Het SHE kan zich voordoen in kleine steden, maar het effect neemt toe wanneer de omvang van het bebouwde gebied toeneemt (Oke, 1982). Verschillende studies toonden aan dat dit effect zich ook voordoet in Europese steden (Kolokotroni en Giridharan, 2008). Een stad wordt gekenmerkt door heterogene stadslandschappen (Arnfield, 2003; Oke, 1982). Het is dit specifieke ruimtelijke stadspatroon dat verschillende microklimaten creëert en bijgevolg leidt tot intra-stedelijke temperatuurverschillen (Buyantuyev en Wu, 2010; Oke, 1982).

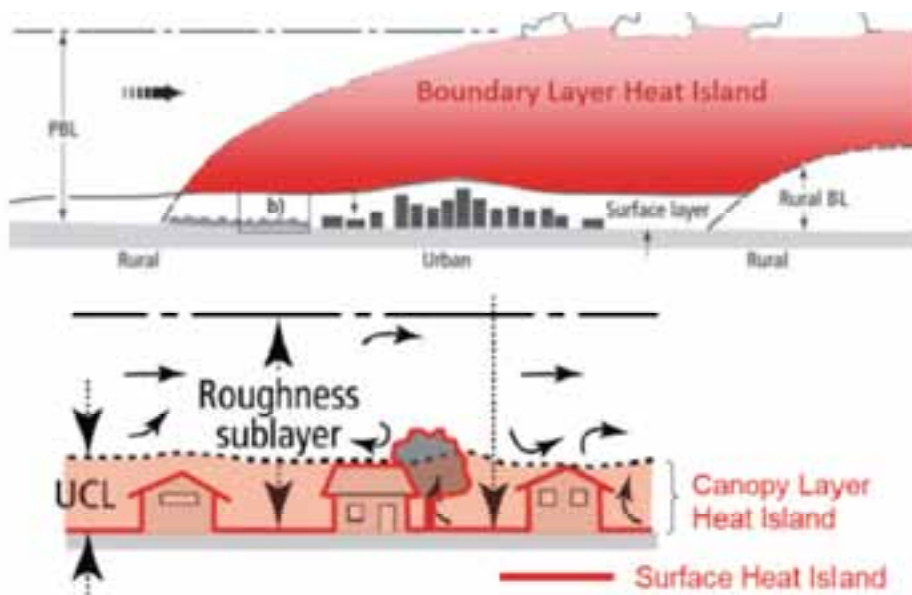
Het Urban Heat Island effect vindt plaats op drie niveaus (Figuur 1, zie ook verder in Tabel 9). Dit zijn:

- het **Surface Urban Heat Island (SUHI)**, met name de oppervlaktetemperatuur. Dit effect is direct gerelateerd aan de opwarming van de materialen in de stad door de zon en is het

⁷ Hiermee bedoelen we straten die typisch aan 2 kanten geflankeerd zijn door een aaneengesloten gebouwenrij.

meest intens gedurende de dag. Afhankelijk van de warmtecapaciteit van de individuele gebruikte materialen in de stedelijke omgeving (beton, asfalt, roofing etc...) kunnen materialen sterk of minder sterk opwarmen, waardoor het SUHI een grote ruimtelijke variabiliteit vertoont. Het oppervlakte hitte eiland effect wordt meestal indirect via remote sensing (IR satellietsensoren) in kaart gebracht. De oppervlaktetemperatuur kan gelinkt worden aan het thermisch comfort van de bevolking buitenshuis.

- het **Canopy Layer Urban Heat Island (CLUHI)**, betreft het verschil in luchttemperatuur tussen de stad en het platteland nabij het oppervlak (typisch 2m hoogte) en is bepalend voor het thermisch welzijn van de bevolking: alle gebruikte indices (bv. van de Wereld Gezondheidsorganisatie WHO) die hitte linken aan gezondheidseffecten baseren zich hiervoor op de luchttemperaturen. Dit effect kent de grootste intensiteit 's avonds en 's nachts, en is klein of zelfs negatief overdag. Hoewel de opwarming van de materialen, en dus het SUHI ondermeer aan de basis liggen van het CLUHI effect, kent dit laatste een beduidend minder uitgesproken ruimtelijke variatie door transport en menging in de atmosfeer. Het CLUHI effect wordt meestal door directe metingen vastgesteld, met name aan de hand van weerstations of mobiele metingen. Tussen het CLUHI en het SUHI kan geen eenduidige relatie gelegd worden (Arnfield, 2003).
- het **Boundary Layer Urban Heat Island (BLUHI)**, wat de temperatuur is in de hogere luchtlagen (Voogt en Oke, 2003). Dit effect ligt aan de basis van de zogeheten "urban plume", waarbij weersystemen windafwaarts van een stad kunnen beïnvloed worden met bijvoorbeeld meer neerslag tot gevolg (Baik et al., 2001; Hoffmann et al., 2009; Mote et al., 2007).



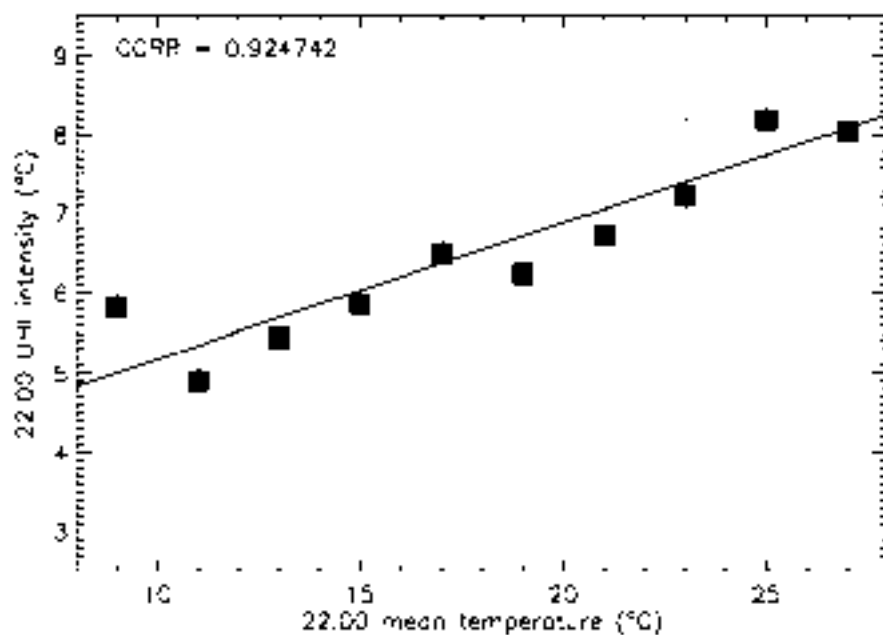
Figuur 1: De verschillende UHI types (Voogt en Oke, 2003)

De huidige concentratie broeikasgassen in de atmosfeer leidt de komende decennia tot een geschatte wereldgemiddelde temperatuurstijging van bijna 2 °C. Modelmatige inschatting variëren van 1.8 °C toename in 2090-2099 t.o.v. 1980-1999 tot zelfs 4.0°C (IPCC, 2007) voor bepaalde broeikasgas emissie scenario's. Klimaatonderzoekers verwachten ook dat het aantal hittegolven en zeer warme dagen nog verder toeneemt. Op de MIRA-website van VMM

(<http://www.milieurapport.be/nl/nieuws/archiefnieuwsberichten/duidelijke-tekenen-van-klimaatverandering/>) werden eind 2012 verschillende klimaatindicatoren geactualiseerd met nieuwe data en de resultaten van een uitgebreide statistische analyse. Nieuw sinds 2012 is dat ook de data voor extreme weerfenomenen zijn meegenomen (extreme neerslag, extreme droogte, hittegolven).

Een greep uit de indicatoren:

- Het is in ons land **al gemiddeld 2,3°C warmer** dan in de pre-industriële periode. De temperatuurstijging bedraagt 0,4 °C per decennium. De temperatuur stijgt het meest in de lente. 2011 is het warmste jaar sinds de metingen startten in 1833. Ten opzichte van 1850 steeg de temperatuur wereldwijd gemiddeld met 0,8 °C en in Europa met 1,3 °C. België warmt dus sneller op dan andere landen.
- Buiten een sterk gestegen gemiddelde temperatuur is ook het aantal hittegolven aan een sterke opmars bezig. Tijdens de twintigste eeuw kregen we gemiddeld een hittegolf om de twee jaar te verwerken. Sinds de jaren negentig is dit verdubbeld tot een hittegolf per jaar. Hittegolven duren langer en leiden ook bij ons tot extra sterfgevallen in de zomermaanden.
- Per decennium komen er drie zomerdagen (> 25 °C) bij en per twee decennia komt er een hittedag (> 30 °C) bij.



Figuur 2 : De symbolen geven de gemiddelde intensiteit (en standaardafwijking) van het CLUHI effect in Parijs op de luchttemperatuur telkens om 22:00 UT gedurende mei - september 2003. De waarden zijn weergegeven in intervallen van 2°C van de gemiddelde luchttemperatuur.

Uit een preliminaire analyse van de resultaten van het ESA Urban Heat Island project⁸, waarin lange historische tijdreeksen van stedelijke luchttemperatuur door VITO zijn doorgerekend aan de hand van satelliet observaties van de oppervlaktetemperatuur (LST of Land Surface Temperature), blijkt dat de intensiteit van het hitte-eiland effect toeneemt bij hogere temperaturen, m.a.w. hoe warmer, hoe intenser het hitte-eiland effect (Figuur 2).

⁸ <http://www.urbanheatisland.info>

Blootstelling aan deze (extreme) hitte is een bedreiging voor de menselijke gezondheid en in het algemeen voor het menselijke welzijn (Patz et al., 2005). De gezondheidseffecten van hittestress zijn goed gekend (Basu en Samet, 2002). Chicago onderging in 1995 een hittegolf die resulteerde in meer dan 600 extra overlijdens en 3300 extra spoedopnames (Dematte et al., 1998). Tijdens de week van de hittegolf noteerden Semenza et al. (1999) een toename van 11% in ziekenhuis opnames. Tijdens en net na de hittegolf in Europa van 2003 werden zoveel als 22080 extra overlijdens genoteerd in Engeland, Wales, Frankrijk, Italië en Portugal (Kostasky, 2005). En meer recent stelde men vast dat de dagelijkse mortaliteit in Moskou verdubbeld was tijdens de hittegolf en smog episode in 2010 (Ferris-Rotman, 2010)⁹. Voor België noteren we 1226 (zomer 1994), 2052 (volledige zomer 2003), 1263 (2006) en 967 in 2010 (eind juni-juli) extra overlijdens toe te schrijven aan hittegolven, met telkens 40 – 50 % van de slachtoffers > 85 jaar.

Het is zo dat ook tijdens niet-extreme hitte golven de effecten op het sterftecijfer onmiskenbaar zijn (D'Ippoliti, 2010). De relatie tussen een bepaalde stijging in temperatuur en de daaruit volgende stijging in menselijk onbehagen en stijging in sterfte, is sterker in meer noordelijkere gematigde klimaatgebieden, zoals België, dan in zuidere warmere klimaatgebieden (Kalkstein en Greene, 1997). In deze noordelijke gebieden zijn daarenboven vooral de stedelijke regio's gevoelig voor een stijging in temperatuur.

Deze opdracht beoogt de kennis over het stedelijk hitte-eiland effect in Antwerpen te verhogen door

1. het voorkomen (geografische verspreiding) en de ernst van het hitte-eiland effect op Antwerpens grondgebied in kaart te brengen;
2. de evolutie van het stedelijk hitte-eiland effect onder invloed van de verdere verstedelijking en klimaatverandering in kaart te brengen (toekomstscenario's m.b.t. klimaatverandering en socio-economische trends)
3. inzicht te verwerven in de oorzaken van de huidige probleemlocaties;
4. mogelijkheden te leren kennen om bestaande probleemlocaties te remediëren en om nieuwe hitte-eilanden te voorkomen

Op die manier vormt dit onderzoek een beleidsinstrument om bij te dragen aan de realisatie van een leefbaar stedelijk klimaat in Antwerpen.

1.2. OPBOUW VAN DE STUDIE

Het vervolg van dit document reflecteert hoe de studie is opgebouwd :

- In Hoofdstuk 2 beschrijven we een experimentele meetcampagne van de stedelijke luchttemperaturen en het CLUHI effect. Het betreft hier zowel een meetcampagne met vaste sensoren als mobiele transect-metingen uitgevoerd op een warme zomernacht in 2013.
- In Hoofdstuk 3 brengen we een aantal ruimtelijk expliciete data lagen (GIS-lagen) in verband met de CLUHI resultaten van de gemeten mobiele transecten. Zodoende kunnen we vaststellen welke ruimtelijke parameters aan de basis liggen van het CLUHI effect in Antwerpen.
- Hoofdstuk 4 brengt vervolgens het SUHI effect in Antwerpen in kaart aan de hand van satellietbeelden, waarna

⁹ Available on : <http://www.reuters.com/article/2010/08/09/us-russia-heat-idUSTRE6751T820100809>

- Hoofdstuk 5 een ruimtelijk expliciete modelstudie bevat van het CLUHI effect aan de hand van het UrbClim model (De Ridder et al, 2013). De meetgegevens uit Hoofdstuk 2 worden hier gebruikt ter validatie van deze modelstudie.

Deze bovenstaande hoofdstukken brengen met andere woorden het stedelijk hitte-eiland effect (zowel CLUHI als SUHI) in Antwerpen in kaart. In een tweede deel van deze studie opdracht zullen we dieper ingaan op de kwetsbaarheid van de bevolking voor deze effecten :

- Hoofdstuk 6 verkent de internationale literatuur om een zicht te krijgen op de impact van het SHE naar gezondheid en andere parameters toe, en om de kwetsbare bevolkingsgroepen te identificeren.
- In Hoofdstuk 7 wordt deze kennis toegepast om de kwetsbaarheid van Antwerpen voor het CLUHI en het SUHI effect in kaart te brengen.
- Hoofdstuk 8 neemt een kijkje in de toekomst naar de verwachte evolutie van het stedelijk hitte eiland effect (CLUHI) onder het veranderde klimaat en rekening houdend met de expansie van de stad en het veranderende landgebruik.

Tenslotte worden in Hoofdstuk 9 enkele samenvattende conclusies met bijhorende beleidsaanbevelingen geformuleerd.

Zoals hoger reeds is aangegeven bevatten de volgende hoofdstukken een uitgebreide beschrijving van de uitgevoerde analyses. Een uitgebreide samenvatting is aan het begin van dit document opgenomen.

HOOFDSTUK 2. MEETCAMPAGNE

Bino Maiheu, VITO

In dit hoofdstuk beschrijven we de resultaten van de experimentele meetcampagne gedurende de zomer van 2013. Op een aantal plaatsen in en om Antwerpen werden door VITO vaste luchttemperatuur en vochtigheidssensoren uitgezet. We beschrijven in een eerste onderdeel de installatie, verwerking en resultaten hiervan. In een tweede subsectie beschrijven we de resultaten van een mobiele meetcampagne.

2.1. MEETCAMPAGNE VASTE SENSOREN

2.1.1. BESCHRIJVING SENSOREN

Sinds begin van de zomer van 2012 baat de VITO urban climate groep 2 professionele Campbell Scientific meteostations uit, gesitueerd in het Koninklijk lyceum in de Hertoginstraat (stedelijk station) en te Vremde op de bio boerderij Van Leemputten (ruraal station). Deze stations, waarvan hieronder in Figuur 3 een afbeelding, bevatten volgende sensoren :

1. Luchttemperatuursensor van het zeer nauwkeurige RTD-type (PT1000), ondergebracht in een actief geventileerde stralingsbehuizing (type Young Aspirated Radiation Shield, Model 43502). Dit stralingsschild zuigt actief de lucht aan over de sensor waardoor die zich altijd in evenwicht bevindt met de luchttemperatuur. Onder maximale stralingsbelasting (1000 W/m² invallende zonnestraling), blijft het verschil tussen luchttemperatuur in de behuizing en erbuiten beperkt tot maximaal 0.2 °C met een reproduceerbaarheid van 0.05 °C tussen verschillende behuizingen van dit type onder gelijke stralingsbelasting.
2. Een Campbell CS215 luchttemperatuur en vochtigheidssensor, ondergebracht in een niet-actief geventileerd stralingsschild.
3. Een Windsonic (<http://www.gillinstruments.com/products/anemometer/windsonic.htm>) 2D sonische anemometer voor het meten van de lokale windsnelheid. Merk wel op dat deze windmeter telkens op de hoogte van de temperatuurmetingen opgesteld staat en het niet de ambitie van deze urban climate stations is om een representatieve windsnelheid voor de omgeving te meten, waarvoor een meethoogte van typisch 10 m noodzakelijk is (cfr. WMO richtlijnen).
4. Een Campbell CS300 pyranometer voor het meten van de invallende zonnestraling in W/m².
5. Een GPRS antenne voor het doorsturen van de data via het GSM netwerk.



Figuur 3 : Afbeelding van de sensoren op de 2 professionele VITO urban climate meetstations. De verschillende aanwezige sensoren worden besproken in de tekst.

Als aanvulling op deze vaste stations werden een aantal Onset HOB0 U23-002 Pro v2 sensoren uitgezet, waarvoor hieronder een afbeelding is opgenomen.



Figuur 4 : Afbeelding van de Onset HOB0 U23-002 Pro v2 logger met externe voeler voor temperatuur en vochtigheid.

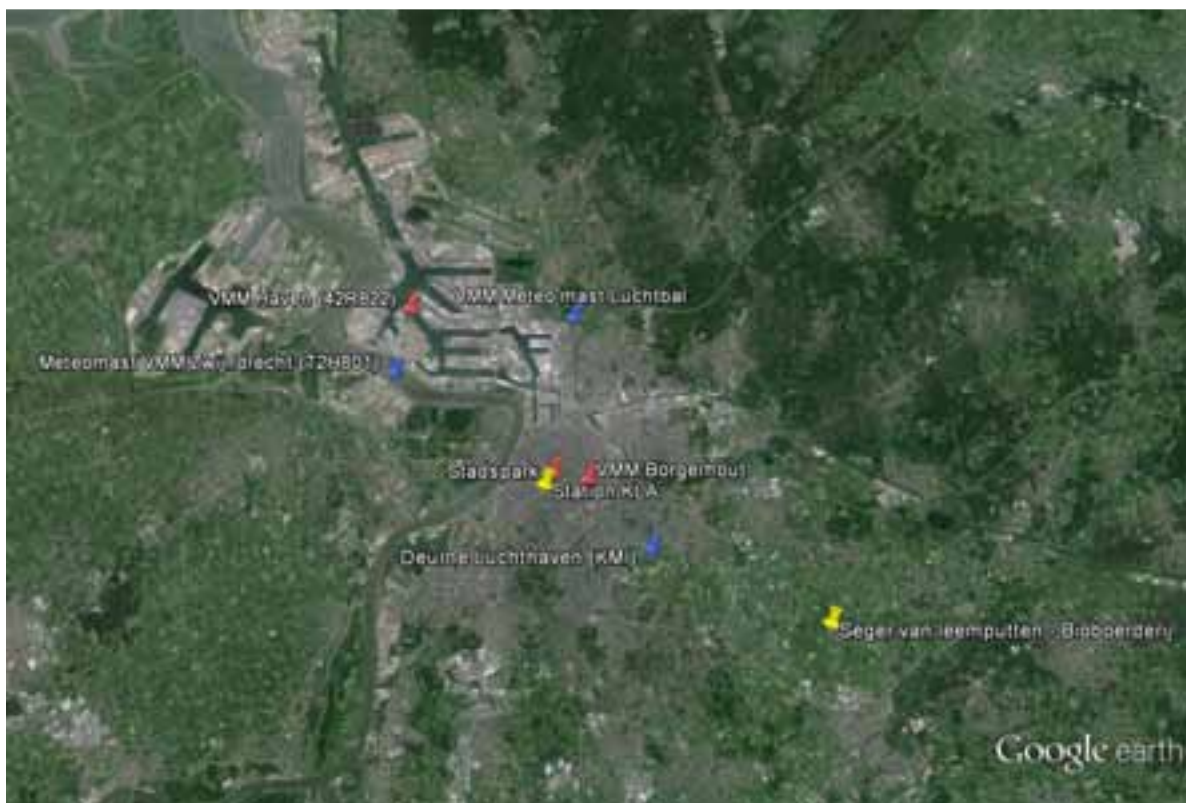
Deze autonome data loggers bevatten een externe voeler voor luchttemperatuur en relatieve vochtigheid en zijn in de opstelling ook ondergebracht in een actief geventileerd stralingsschild (zie Figuur 3 - 1). De nauwkeurigheid van deze sensoren t.o.v. de PT1000 sensor van de urban climate meetstations werd reeds uitvoerig onderzocht in Maiheu et al, (2013). Uit de validatie statistieken van die vernoemde studie bleek een RMSE van typisch 0.03 °C tot maximaal 0.06 °C tussen de PT1000 meting en de HOB0 metingen op dezelfde locatie. Voor deze studie werden de sensoren onderling nogmaals vergeleken, met gelijkaardige resultaten¹⁰, waardoor we kunnen besluiten dat ondanks de verschillende meetmethoden, we de luchttemperatuurmetingen direct met elkaar kunnen vergelijken.

¹⁰ Uit cross-validatie van de 3 loggers bleek een maximaal RMS verschil van 0.052°C voor de luchttemperatuur en een maximaal RMS verschil van 1.6% in relatieve vochtigheid en tijdens een kalibratie periode van 01-07-2013 om 21:00 tot 03-07-2013 om 19:00 waarbij de sensoren naast elkaar op een open plaats te Lochristi nabij Gent werden opgehangen.

Naast de eigen sensoren hebben we voor deze studie data verkregen van een aantal externe partijen, zo konden we gebruik maken van de VMM luchttemperatuur metingen te Luchtbal en Zwijndrecht en de KMI metingen op de luchthaven van Deurne. Van metingen afkomstig van hobby meteorologen is in deze studie geen gebruik gemaakt. Voor beide meetlocaties uitgebaat door de VMM (met dank aan Christine Matheussen en Daniel Tielemans) werd telkens ook gebruik gemaakt van actief geventileerde stralingsbehuizingen, voor de metingen op de luchthaven van Deurne wordt een traditionele weerhut gebruikt (Stevenson-schermer).

2.1.2. KEUZE VAN DE MEET-LOCATIES

Op onderstaande screenshot zijn de meetlocaties voor de verschillende in-situ metingen weergegeven.



Figuur 5 : Locatie van de verschillende meetsites in en om antwerpen. De rode pins zijn de HOBOLoggers (zie hoger), de blauwe pins de externe databronnen en de gele pins de urban climate meetstations.

Hieronder geven we kort enkele afbeeldingen van de verschillende eigen meetlocaties met telkens de exacte coördinaten van de metingen en een korte beschrijving van de onmiddellijke omgeving.

Tabel 1 : Korte beschrijving van de verschillende meetlokaties door VITO geïnstalleerd en uitgebaat. In de eerste twee stations worden zowel luchttemperatuur (actief & passief), vochtigheid, invallende zonnestraling en windsnelheid/richting gemeten. In de laatste drie enkel luchttemperatuur en relatieve vochtigheid. Van de eerste twee meetstations hebben we een gemiddelde meetwaarde elke 15 minuten van de afgelopen 15 minuten (waarbij het gemiddelde berekend is aan de hand van samples genomen elke 5 seconden), voor de laatste 3 sensoren slaan we telkens een sample op om de 10 minuten.

1.		Bioboerderij van Leemputten – Vremde (UCMCS002) 51.16600833 NB; 4.54864722 OL Het station staat centraal opgesteld op een door schapen begraasd weiland op 150 m van de dichtste bebouwing. Op een 90-tal m naar het oosten en een 130 m naar het westen zijn bomenrijen aanwezig en enkele individuele bomen op een 55 – 60 tal m ten noorden en zuiden. De sensoren bevinden zich op een hoogte van +/- 180 cm boven de grond.
2.		Koninklijk Lyceum Antwerpen (UCMCS001) 51.208525 NB; 4.41022778 OL Het station bevindt zich op het dak van een laag gebouw dat zich centraal op de speelplaats van het Lyceum bevindt. De sensoren zijn opgehangen op +/- 180 cm boven het dak van dit gebouwtje, en ongeveer een 4-tal meter boven de begane grond. De afstand tot de dichtstbij gelegen muur is minstens 10 m. Het dak is bedekt met een roofing materiaal, maar uit gemeten temperatuurverschillen overdag blijkt dat het effect daarvan voor de actief geventileerde meting van weinig belang is.
3.		Stadspark 51.21164444 NB; 4.412361111 OL De sensor & behuizing zijn vastgemaakt aan een paaltje dat zich in de zuid-westelijke hoek van het stadspark bevindt op een relatief open plaats (althans naar het zuiden toe) op een afstand van een 2-tal meter naast het water. Op een paar meter ten noordoosten van de meetlokatie zijn bomen aanwezig, alsook ten noordwesten (~10 m afstand). Naar het zuiden toe is de vrije ruimte (vijver) een 30-40 tal meter. De sensoren hangen ook hier op +/- 180 cm boven de grond.

4.		Borgerhout 51.209425 NB; 4.4316666 OL De sensor is vastgemaakt aan het reling van het VMM 42R802 luchtkwaliteitsmeetstation aan de Plantin en Moretuslei. Op het dak van een metalen kabine is een paal vastgemaakt (zie afbeelding links) met de sensor op een 180 cm boven het dakniveau. In totaal hangt de sensor een 4-5 tal meter boven de grond. Naar het zuiden is de lokatie heel open (enkel de PM-lei zelf), ten noorden bevindt zich een groot gebouw (afstand 7m) met enkele hoge bomen.
5.		Polderdijkweg 51.26428333 NB; 4.341258333 OL Ook hier is de sensor vastgemaakt aan de reling van een VMM luchtkwaliteitsstation (42R822) op het einde van de Polderdijkweg in de Antwerpse haven. De opstelling is analoog met die in Borgerhout. Ten noordwesten van de meetsite bevindt zich een klein stukje vegetatie met enkele hoge bomen, de rest is verhard : de polderdijkweg zelf, de brandstof silo's ten noorden en het rangeerstation en seinhuis ten oost-zuidoosten. Ten noordoosten op een 120 m bevindt zich Hansadok en het Marshall dok ten zuidwesten op een 400 tal m.

In de aanvangsfase van het project was de bedoeling om een nog grotere diversiteit van meetlocaties te kunnen bemonsteren. De bestelde extra sensoren lieten echter te lang op zich wachten om nog nuttige te kunnen inzetten tijdens de zomer van 2013. Desalniettemin beschikken we hier over een 8-tal kwalitatieve, intra-stedelijke meetlocaties, waarmee we ruim voldoende hebben voor het bestuderen van het hitte-eiland effect in Antwerpen.

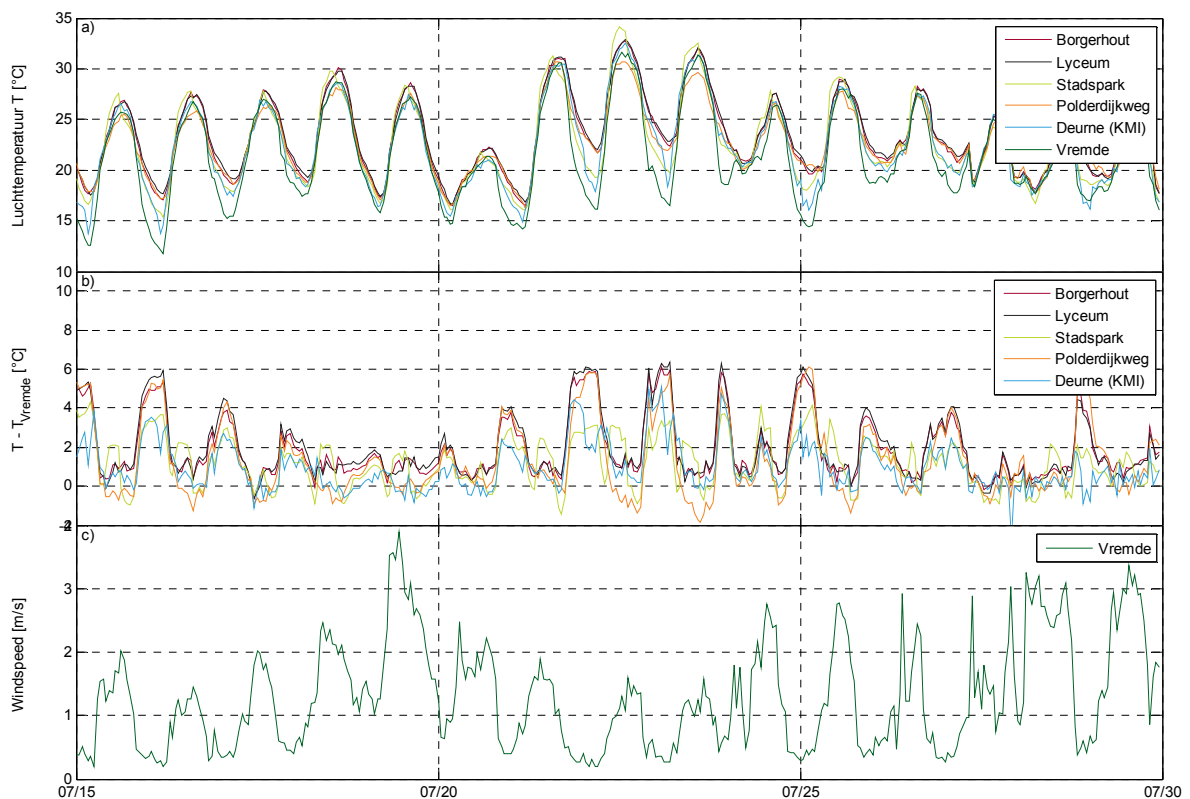
We dienen hier echter wel te vermelden dat tijdens de periode 15/07/2013 vanaf 11:00h 's ochtends tot 04/09/2013 vanaf 15:00h 's namiddags de ventilator van de meting in het stadspark heeft stilgelegen door een gesprongen zekering in een van de schakelkasten die rond de vijver verspreid staan in het Stadspark. Dit feit bemoeilijkt uiteraard de interpretatie van de luchttemperatuurmetingen overdag gezien een hoge stralingsbelasting van de behuizing kan aanleiding geven tot hogere gemeten luchttemperaturen in de orde van 1.5 – 2.0°C. In de verdere verwerking van de data werd hier uiteraard rekening mee gehouden, tenzij expliciet vermeld.

2.1.3. VERWERKING EN ANALYSE VAN DE RESULTATEN

Na het verzamelen van alle data werd in eerste instantie een data-archief in de vorm van een HDF5¹¹ bestand gecompileerd, waardoor het uitwisselen van de metingen uit deze meetcampagne makkelijker wordt.

¹¹ Een wetenschappelijk binair dataformaat, zie www.hdfgroup.org. Data uit dergelijk bestand kan makkelijk gevisualiseerd worden via HDFVIEW <http://www.hdfgroup.org/hdf-java-html/hdfview/>, of men kan dit tool ook gebruiken om te exporteren naar een tekstbestand, waarna men het verder in excel kan verwerken.

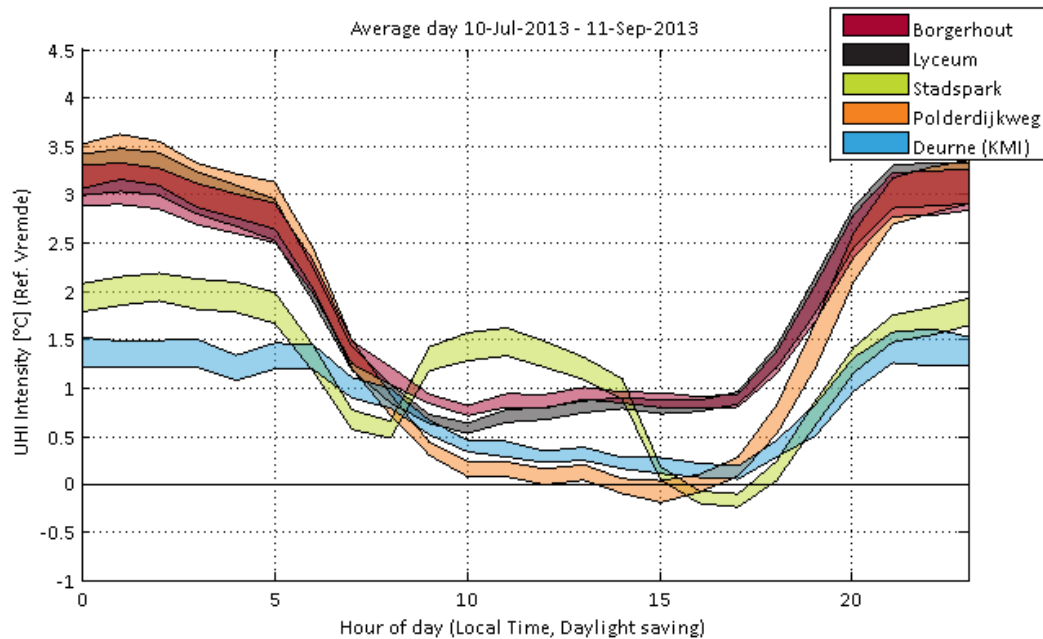
In onderstaande figuren tonen we een voorbeeld van de tijdsreeksen van de gemeten luchttemperatuur. In Bijlage A geven we de tijdreeksen voor de volledige zomer periode.



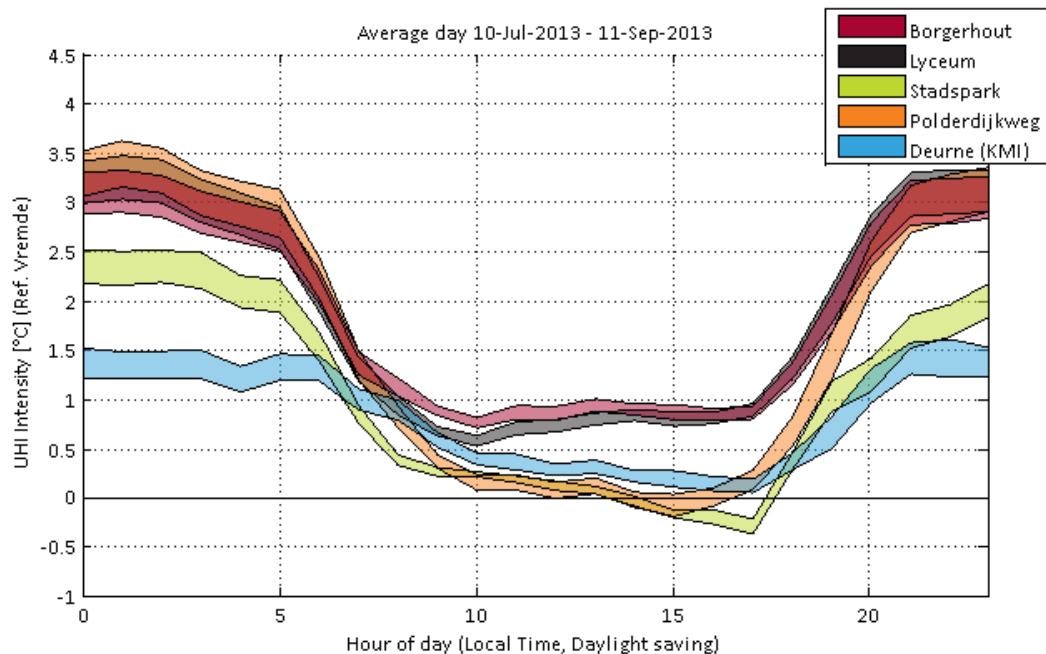
Figuur 6 : Tijdsreeksen van gemeten luchttemperatuur, het verschil van de stedelijke stations met de rurale referentie en de windsnelheid. De afgebeelde periode hier is 01/07/2013 tot 15/07/2013. Hier werd de geen correctie doorgevoerd of rekening gehouden met de stilgevallen ventilatie in het stadspark. We merken dan ook dan voor een aantal dagen (zoals duidelijk op 22/07) overdag de temperatuur gemeten in het stadspark het hoogst is.

We zien op een aantal dagen een duidelijk hitte-eiland effect van een 6-tal °C, waarbij vooral de metingen te Borgerhout, het Lyceum, maar ook aan de Polderdijkweg in de haven significant hogere luchttemperaturen registreren dan de rurale meting in Vremde. We zien verder ook dat 's nachts, de metingen te Deurne en in het Stadspark een duidelijk lagere luchttemperatuur vertonen. Opvallend is verder ook dat overdag tijdens deze periode de metingen in de Haven iets lager lijken te liggen dan in Vremde, vooral tijdens de periode 21-24/07 is dit effect duidelijk. Naar mate de zomer vordert (zie Bijlage A) lijkt dit iets minder voor te komen, waaruit we misschien voorzichtig kunnen besluiten dat het water tegen het einde van de zomer een hogere temperatuur heeft, waardoor het iets moet inboeten inzake verkoelend effect. Een uitgebreidere analyse van de watertemperatuur zou hier uitsluitsel kunnen over geven.

Verder zien we ook, analoog zoals in Maiheu et al. (2013), een duidelijke correlatie met de windsnelheid, waarbij het sterkste SHE effect ontstaat bij lage windsnelheden. Wanneer we nu even de gemiddelde dagcyclus analyseren, dan vinden we dat het centrum van Antwerpen tijdens de zomer van 2013 's nachts gemiddeld 3 – 3.5 °C warmer is dan de rurale omgeving (Vremde). Dit is afgebeeld in onderstaande figuren.



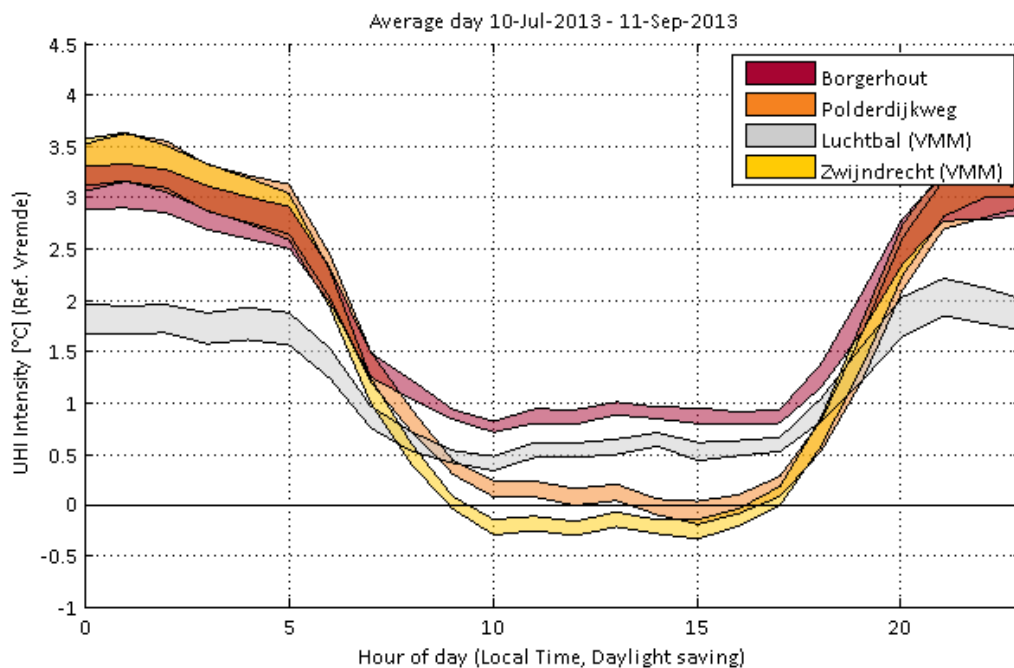
Figuur 7 : Weergaven van de gemiddelde dag cyclus van het luchttemperatuurverschil tussen de stedelijke lokaties en de rurale referentie te Vremde. Voor elk uur van de dag (horizontale as, in lokale zomer-tijd) is de gemiddelde intensiteit van het UHI effect weergegeven voor dat uur. M.a.w. de waarde om 20h 's avonds is het gemiddelde temperatuursverschil om 20h 's avonds overheen alle dagen van de zomerperiode. We beelden m.a.w. een soort "gemiddelde" dag af. In deze figuur is geen correctie doorgevoerd voor de ontbrekende ventilatie van de meting in het stadspark. De breedte van de band geeft de statistische onzekerheid op dit gemiddelde en is een maat voor de variabiliteit van het effect voor dat uur.



Figuur 8 : In deze figuur wordt dezelfde informatie afgebeeld als hierboven, maar dan wel met correctie voor de metingen in het stadspark, waarbij de periode waarbinnen de ventilatie niet actief was is weggelaten.

Overdag zien we dat het temperatuurverschil beperkt blijft, tot gemiddeld 1°C hoger voor de metingen in Borgerhout en het Lyceum. We merken ook dat de statistische onzekerheid (de breedte van de banden in de figuren) op het gemiddelde overdag kleiner is dan 's nachts. Opvallend is verder dat we 's nachts in de haven (Polderdijkweg) ook een duidelijk hitte-eiland effect meten, dat zelfs van dezelfde grootteorde is als in het centrum van de stad. Overdag is hier de temperatuur echter niet significant verschillend van wat in Vremde gemeten wordt. Wat verder duidelijk merkbaar in de figuur is, is het milderend effect van stedelijk groen. We zien dat de het nachtelijk SHE in het stadspark beduidend lager is dan in de versteende omgeving: gemiddelde 1°C en zelfs tot 2 °C aan de luchthaven te Deurne (wat ook wel eerder aan de rand van Antwerpen ligt en reeds aansluiting heeft met de rurale omgeving rond Vremde).

De hogere nachtelijke temperaturen in de haven lijken op het eerste zicht wat vreemd gezien het daar toch om een relatief open omgeving gaat. De sterke verstening door talrijke industrie terreinen is hier blijkbaar toch dominant in het bepalen van de luchttemperatuurdynamiek. Het effect blijkt overigens niet alleen uit eigen metingen. Wanneer we de temperatuur van de onderste VMM meting op de mast te Zwijndrecht (op 8m boven de grond) vergelijken met die in Vremde, dan vinden datzelfde effect terug. Dit is afgebeeld in onderstaande Figuur 9. Veel minder is het effect aanwezig op Luchtbal, waar we zien dat we 's nachts gemiddeld slechts een 2-tal °C verschil meten tijdens afgelopen zomer.



Figuur 9 : Gemiddelde dag cyclus van de stations in de haven : Polderdijkweg, Luchtbal (VMM) en Zwijndrecht - 8m (VMM) t.o.v. de rurale referentie te Vremde en vergeleken met de dag cyclus gemeten in brogerhout.

Het is ergens wel wat verrassend te noemen dat ook de meting in Zwijndrecht zo'n sterk nachtelijk CLUHI effect kent. Maar misschien kan dit deels door de westelijke ligging verklaard worden. Het is geweten dat het CLUHI effect voornamelijk uitgesproken is in onze contreien bij hoge-druk condities, met typisch oostelijke windrichting (zie Maiheu et al., 2013). Gezien Vremde aan de oostelijke kant van Antwerpen ligt kan er in Zwijndrecht sprake zijn van een pluim effect waarbij de warmere lucht van de stad naar het westen getransporteerd wordt. We dienen er wel bij te vermelden dat de windsnelheid relatief klein is tijdens periodes met een intens CLUHI effect.

→ Gemeten UHI intensiteiten

In onderstaande tabel zetten we de gemeten CLUHI intensiteiten in de verschillende meetlokaties op een rij. We geven telkens per station de gemiddelde, maximale en 95^{ste} percentiel waarde (berekend op uurlijkse waarden) van de intensiteit van het CLUHI effect eenmaal voor dag & nacht samen, en dan apart voor de dag en de nacht. We definiëren een dag gaande van 10h 's morgens tot 18h 's avonds en een nacht van 22h 's avonds tot 04h 's ochtends (lokale tijd). Bij de maximale intensiteit dienen we wel een kleine kanttekening te plaatsen. Het is zo dat deze sterk kan bepaald zijn door bvb passage van een weersfront. Een betere indicatie m.a.w. is dus de 95^{ste} percentiel waarde. Deze waarde houdt in dat slechts voor 5% van de uurlijkse waarden tijdens de zomer van 2013, het CLUHI effect nog hoger zal liggen.

Tabel 2 : Tabel met gemiddelde, maximale en 95 percentiel waarden van de intensiteit van het UHI effect voor de zomer van 2013. Merk op dat de waarden in het stadspark gecorrigeerd zijn voor het wegvallen van de ventilatie.

Station	Latitude	Longitude	Dag en nacht			Dag			Nacht		
			Gemidd.	Max.	P95	Gemidd.	Max.	P95	Gemidd.	Max.	P95
Borgerhout	51.209425	4.431667	1.87	7.33	5.18	0.87	2.84	1.7	2.84	7.33	6.07
Lyceum	51.208525	4.410228	1.86	7.01	5.4	0.74	2.98	1.52	2.94	7.01	6.06
Polderdijkweg	51.264283	4.341258	1.58	8.51	5.49	0.1	2.24	1.06	2.85	8.51	6.18
Stadspark	51.211644	4.412361	1.04	5.43	3.72	0.06	0.82	0.63	1.85	4.57	4.01
Deurne	51.192222	4.453056	0.84	5.64	2.98	0.32	2.54	1.2	1.26	5.64	3.54
Luchtbal	51.261079	4.424342	1.18	5.66	3.48	0.53	2.84	1.43	1.81	5.66	4.19
Zwijndrecht	51.24446	4.334747	1.48	7.64	5.49	-0.16	2.09	0.79	2.94	7.64	6.14

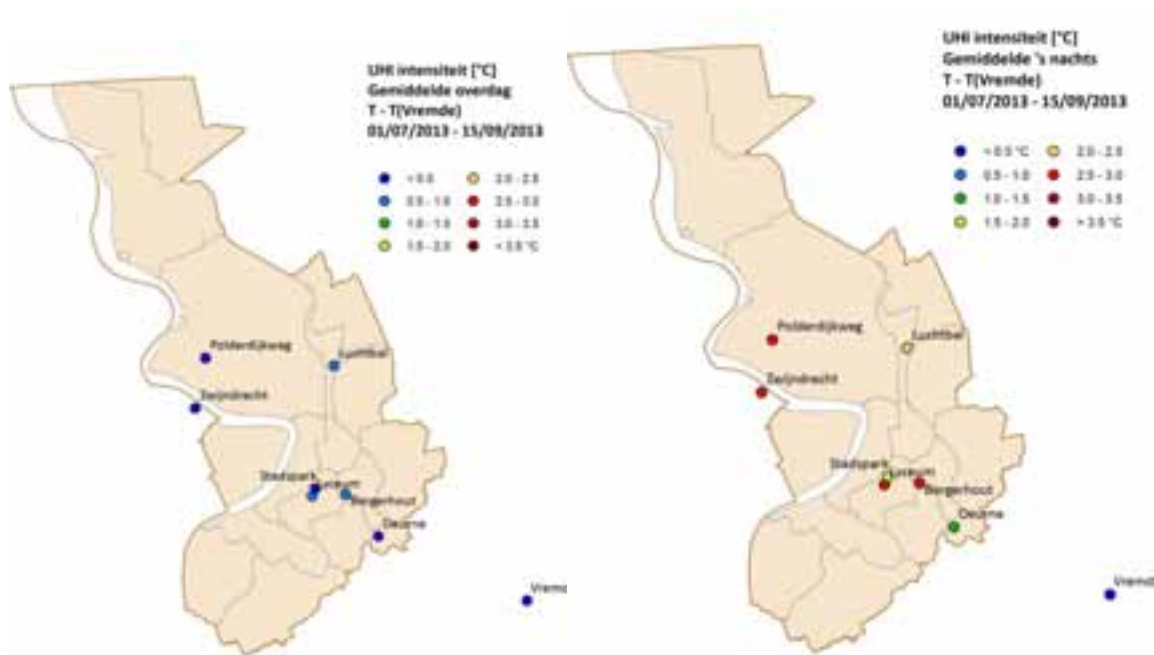
We merken duidelijk dat het gemiddeld effect overdag verwaarloosbaar is, met de grootste waarden gemeten te Borgerhout (0.87 °C) en aan het Lyceum (0.74 °C). In de haven en het stadspark (na correctie) is er geen significant SHE effect overdag voor wat betreft de luchttemperatuur. 's Nachts verandert uiteraard de situatie en zien we maxima tot 7.33°C te Borgerhout en 8.51°C aan de Polderdijkweg.

Wanneer we van de periode van 63 beschouwde dagen bekijken tijdens hoeveel nachten de temperatuur zakte onder de 18 of 20 °C dan zien we dat er beduidend minder nachten zijn in het stadspark en Deurne waar de temperatuur niet onder de 18°C zakte. Gedurende de zomer van 2013 bleef het in Stadspark slechts op 9 nachten warmer dan 18°C t.o.v. 15-17 in het Centrum en de haven, een verschil van 6-8 nachten. T.o.v. Vremde is het verschil nog duidelijker, daar bleef het slechts gedurende 2 nachten warmer dan 18 °C 's nachts.

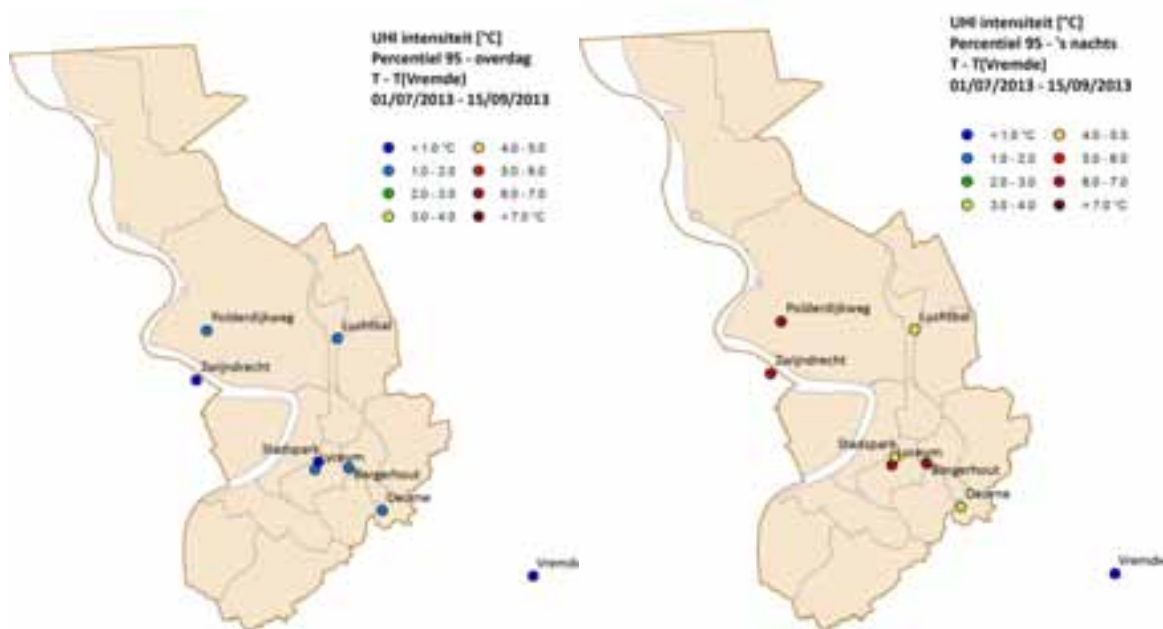
Tabel 3 : Tabel die aangeeft hoeveel nachten de temperatuur niet onder de 18 of 20 °C zakte. Onderaan zijn de waarden voor Vremde aangegeven. In deze analyse bekeken we in totaal 63 dagen (Juli/Augustus).

Station	Latitude	Longitude	# dagen	# dagen
			$T_{\min} > 18^{\circ}\text{C}$	$T_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$
Borgerhout	51.209425	4.431667	15	6
Lyceum	51.208525	4.410228	13	6
Polderdijkweg	51.264283	4.341258	17	6
Stadspark	51.211644	4.412361	9	2
Deurne	51.192222	4.453056	6	0
Luchtbal	51.261079	4.424342	10	1
Zwijndrecht	51.244460	4.334747	14	6
Vremde	51.166008	4.548647	2	0

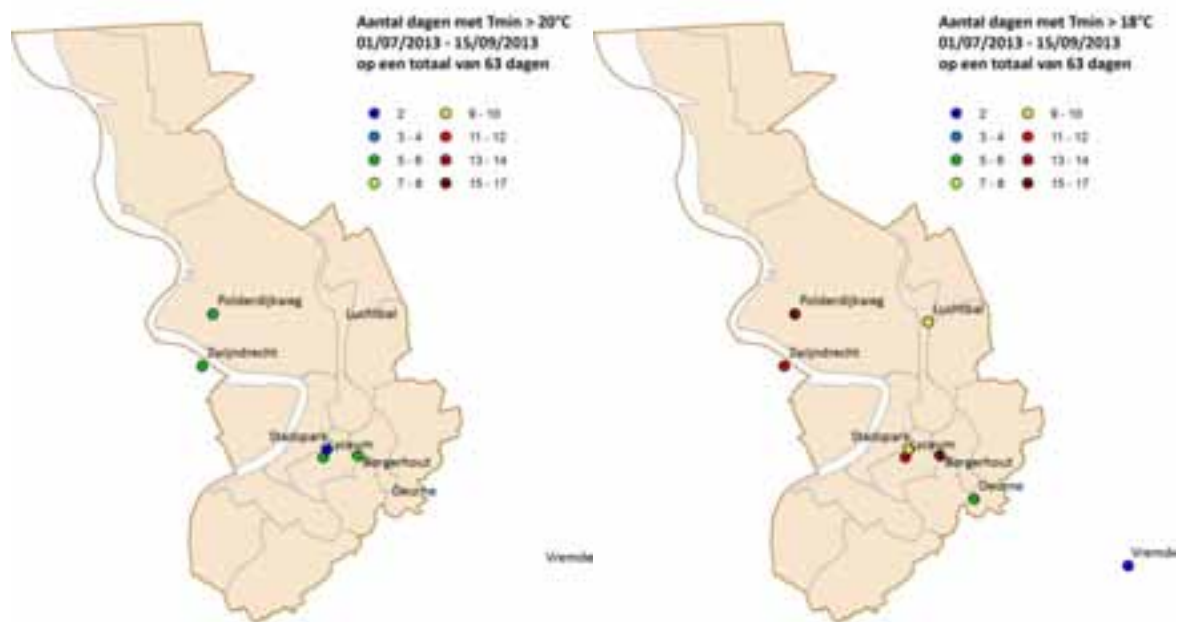
In onderstaande figuren geven we deze informatie ruimtelijk weer.



Figuur 10 : Geografische weergave van het gemeten gemiddelde UHI effect overdag (links) en 's nachts (rechts) gedurende de zomer van 2013.



Figuur 11 : Geografische weergave van de 95^{ste} percentiel waarde van het UHI effect overdag (links) en 's nachts (rechts) gedurende de zomer van 2013, berekend op de uurlijkse waarden.



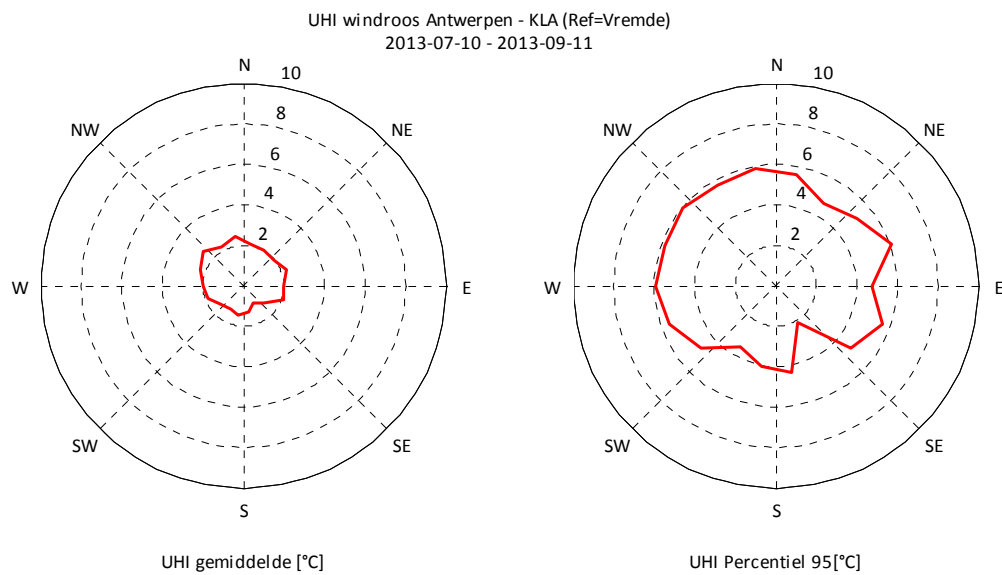
Figuur 12 : Geografische weergave van het aantal nachten waarop de luchttemperatuur niet onder de 20 °C (links) of niet onder de 18°C zakt (rechts) gedurende de zomer maanden juli en augustus. Voor deze analyse werden de gecompromitteerde metingen in het stadspark ook meegenomen omdat de nachtelijke minimum temperatuur uiteraard weinig beïnvloed wordt door de invallende zonnestraling overdag en de metingen hiervoor dus wel bruikbaar zijn.

→ Directionaliteit van het effect

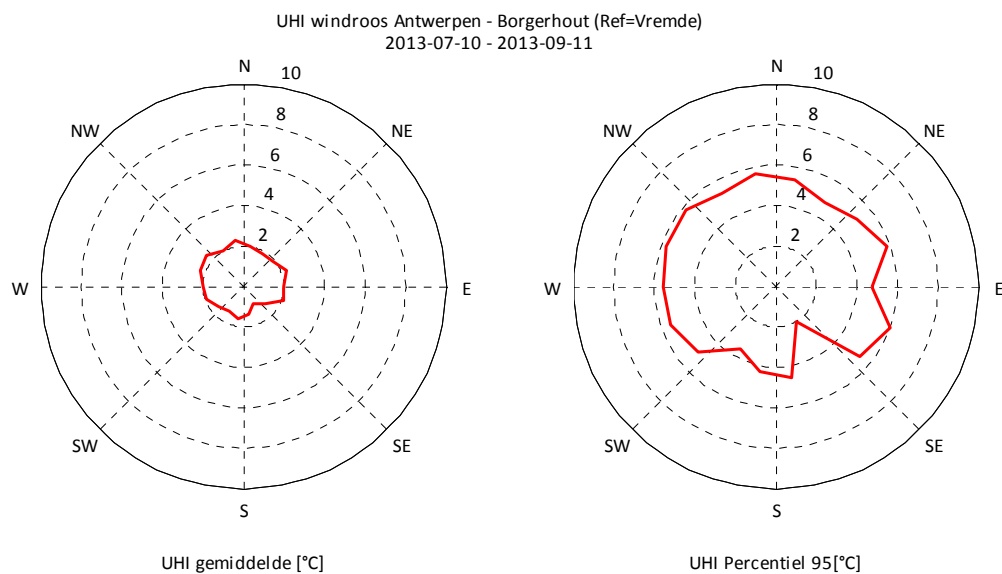
We bekijken verder nu de directionaliteit van het CLUHI effect, waarbij we een windroos opstellen in stappen van 20° opgedeeld (18 sectoren) en voor elke sector werd zowel de gemiddelde SHE intensiteit als de 95^{ste} percentiel waarde berekend. Als referentie voor de luchttemperatuur en windrichting is telkens opnieuw de meting in Vremde genomen¹².

In onderstaande grafieken zijn de UHI windrozen opgenomen voor de stedelijke stations (behalve het stadspark, welke een te vertekend beeld zou geven. Let wel dat de windrozen telkens t.o.v. de grootschalige windrichting is.

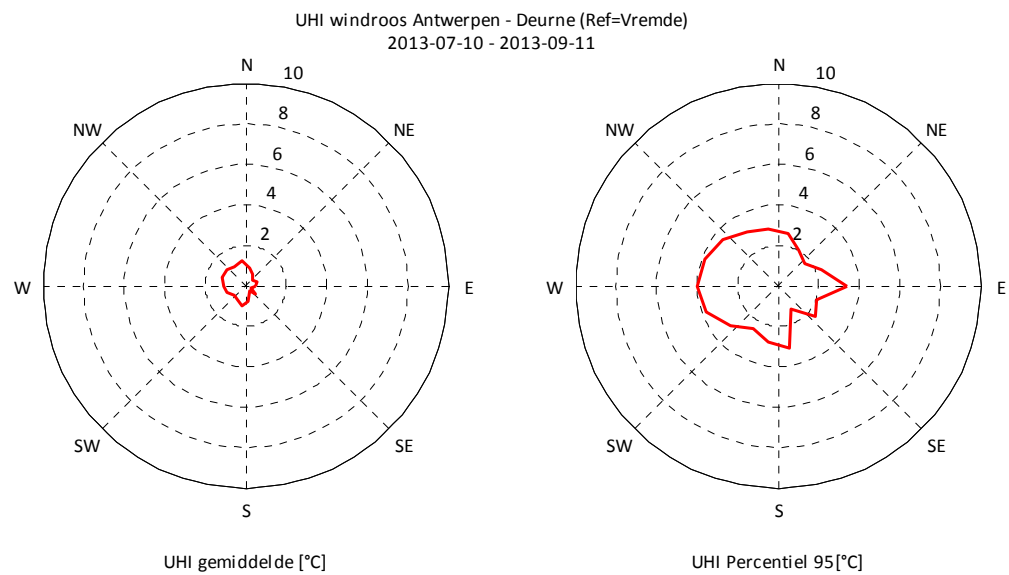
¹² Voor de windrichting is uiteraard de meting op 2m boven de grond niet ideaal, maar na levering van de VMM data zijn we nagegaan of de gemeten windroos significant afwijkt van de windroos gemeten te luchtbal. Er blijken zich geen uitgesproken lokale effecten voor te doen in de data van het station van Vremde die de algemene interpretatie zouden kunnen verstoren. Uiteindelijk bevindt het station zich ook relatief ver van gebouwen en bomen die de luchtstroom zouden kunnen hinderen. Globaal gesproken zijn de 2 windrozen gelijkaardig, zodat we de data van het station in Vremde effectief kunnen gebruiken voor het opstellen van de windrozen.



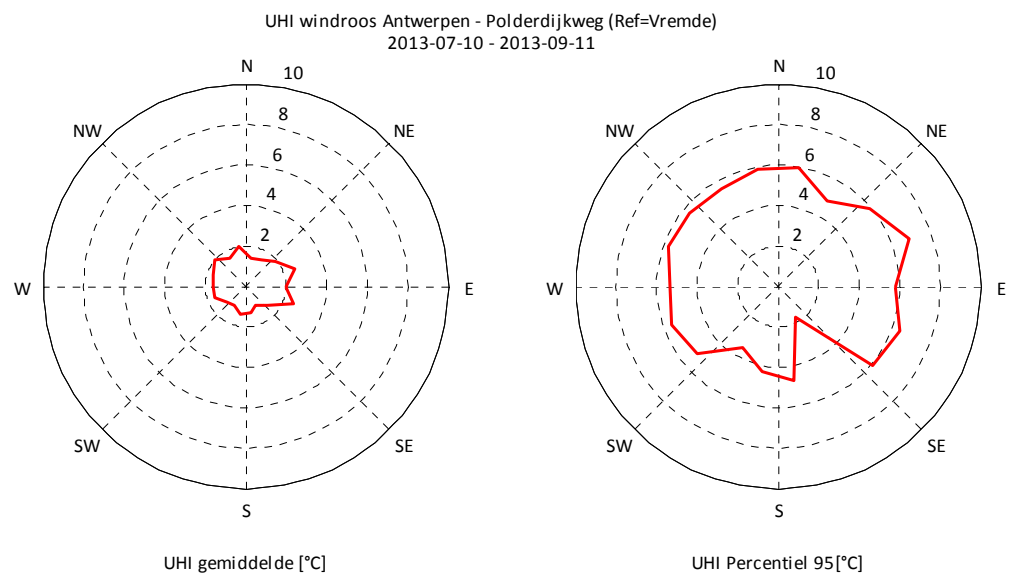
Figuur 13 : UHI windroos voor het Lyceum, links voor het gemiddelde UHI effect, rechts voor het 95^{ste} percentiel.



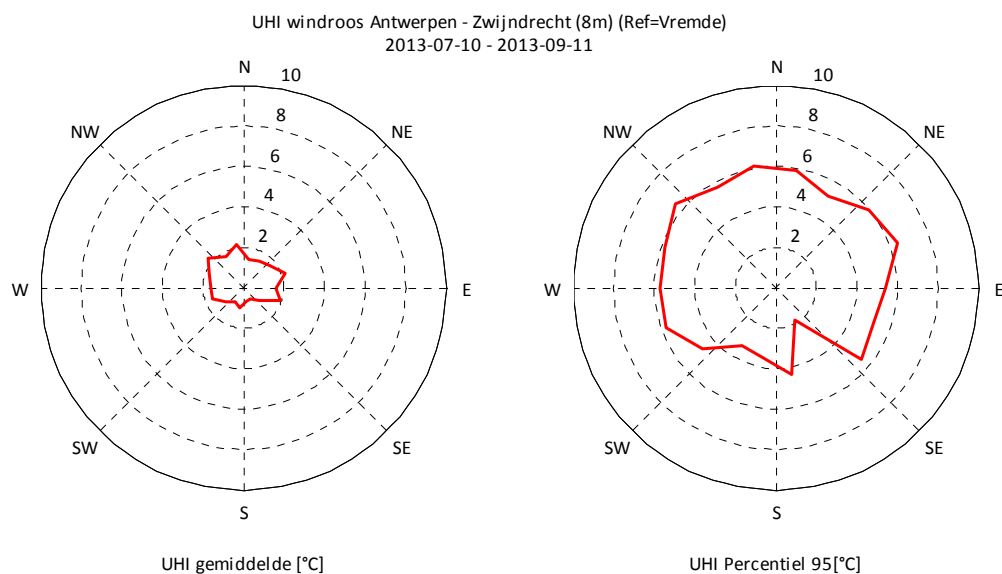
Figuur 14 : UHI windroos voor Borgerhout, links voor het gemiddelde UHI effect, rechts voor het 95^{ste} percentiel.



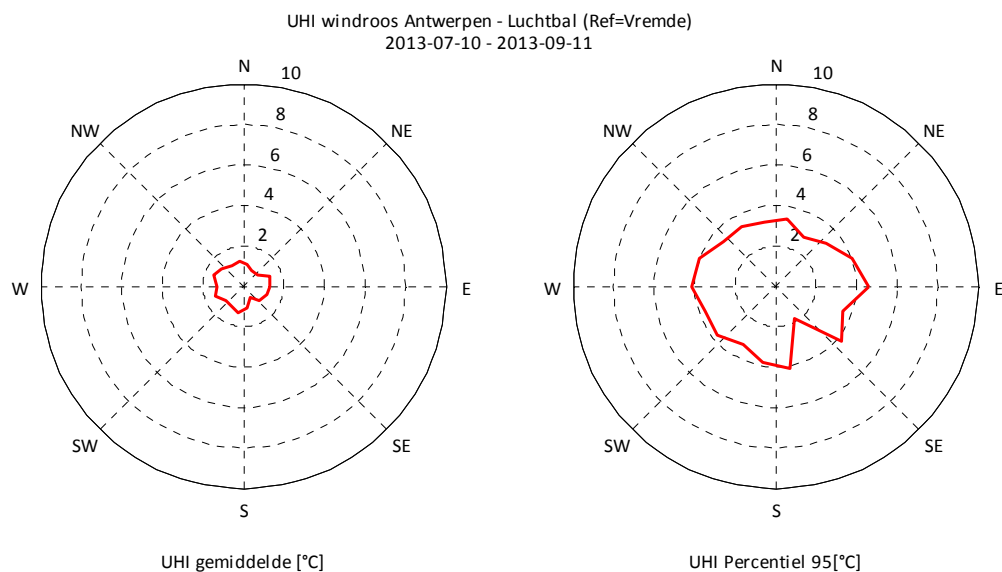
Figuur 15 :UHI windroos voor het Deurne, links voor het gemiddelde UHI effect, rechts voor het 95^{ste} percentiel.



Figuur 16 :UHI windroos voor de Polderdijkweg, links voor het gemiddelde UHI effect, rechts voor het 95^{ste} percentiel.



Figuur 17 : UHI windroos voor Zwijndrecht, links voor het gemiddelde UHI effect, rechts voor het 95^{ste} percentiel.



Figuur 18 : UHI windroos voor Luchtbal, links voor het gemiddelde UHI effect, rechts voor het 95ste percentiel.

Uiteraard is de periode van 2 maanden relatief kort om echt sterke conclusies hieruit te kunnen trekken. We zien echter wel duidelijk dat er niet echt een sterk overheersende oostelijke component zit in de UHI windrozen. Wel valt het op dat voornamelijk de noord-westelijke richting dominant is. Het verdient verder onderzoek om vast te stellen in hoeverre we tijdens deze maanden effectief kunnen spreken over een “normale” windroos en er geen abnormale

hoeveelheid wind uit het NW afkomstig was, maar een deel van de verklaring zou kunnen zijn dat de haven (ten N-W van het centrum) weldegelijk een effect heeft op het hitte-eiland effect in de stad. Dit wordt ondermeer gestaafd door de observatie dat de uhi roos voor Zwijndrecht (wat eerder ten zuiden van het haven gebied ipv ten zuid-oosten) een eerder noordelijke component vertoont.

2.2. MOBIELE MEETCAMPAGNE

Uit de vaste meetcampagne leerden we reeds heel wat i.v.m. de dynamiek van het SHE in Antwerpen. We hebben echter slecht informatie op deze verschillende punten waardoor het iets moeilijker is (zonder modellering uiteraard) om een ruimtelijk beeld van het SHE in Antwerpen te krijgen op basis van meetgegevens. Daarvoor voerden we in de namiddag en avond van 04/09/2013, een mooie nazomer dag met maxima van 28-29°C, een mobiele meetcampagne uit. Uit de in-situ metingen bleek achteraf dat het UHI effect voor die dag een 4-tal °C bedroeg.

2.2.1. BESCHRIJVING MEETMETHODE

Voor de mobiele metingen werd een voertuig uitgerust met enkele temperatuursensoren. Dit is hieronder afgebeeld in Figuur 19.

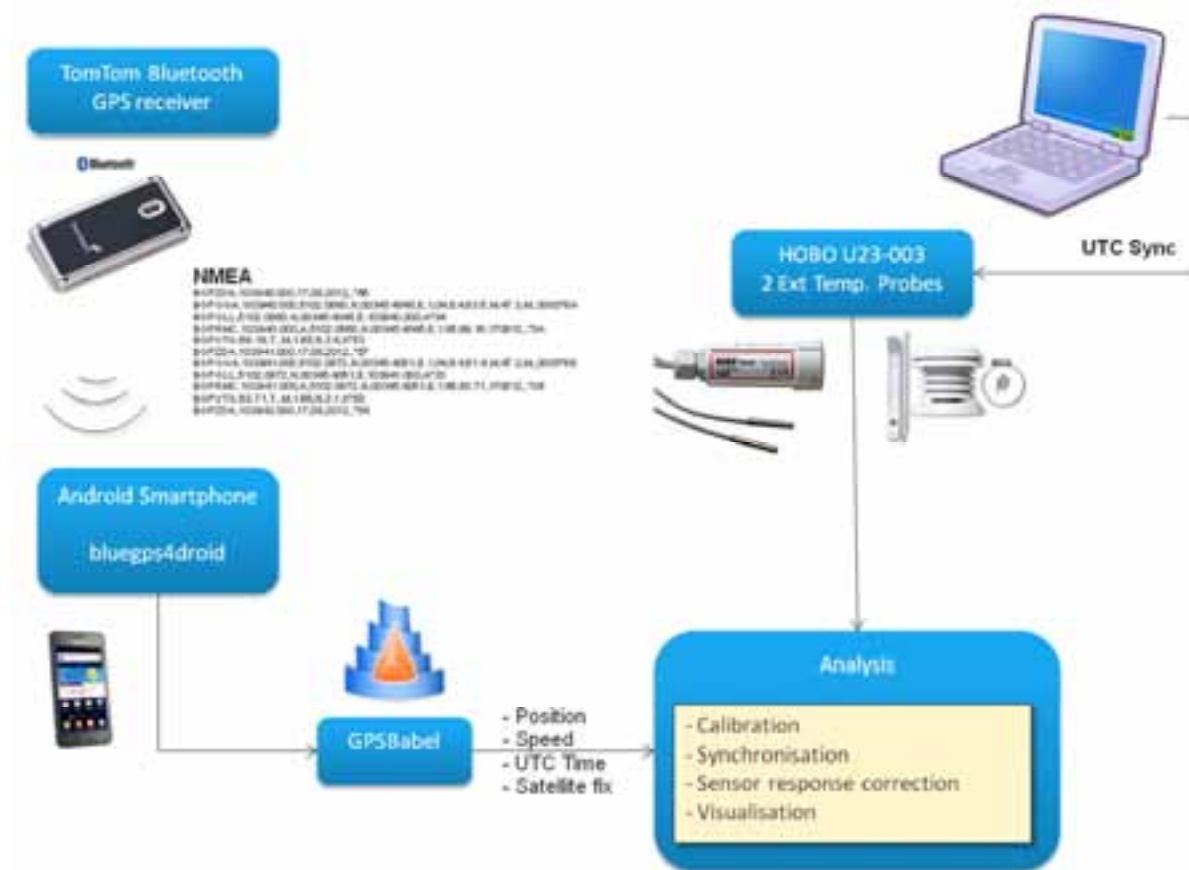


Figuur 19 : Actief en passief geventileerde luchttemperatuursensoren, gemonteerd op een voertuig. Als sensoren zelf maakten we telkens gebruik van dezelfde HOBO U23-002 loggers die we (1)

onderbrachten in een actief geventileerd stralingsschild dat via de 12V aansluiting van de auto van stroom voorzien werd en (2) een passief geventileerde stralingsbehuizing.

Op dit voertuig werd naast een passief stralingsschild, ook een actief geventileerde behuizing gemonteerd, in tegenstelling tot Maiheu et al. (2013). De actieve ventilatie zorgt ervoor dat de sensor beter in evenwicht gehouden wordt met de luchttemperatuur waardoor effecten van zonnestraling bij stilstand van het voertuig minder een rol zullen spelen. Bij passief geventileerde mobiele metingen gaat men ervan uit dat de natuurlijke ventilatie door de beweging van het voertuig voldoende is om een goede meting te bekomen van de luchttemperatuur. Wanneer een voertuig in het drukke stadsverkeer echter stilstaat geldt dit uiteraard niet langer. We verkozen ook het nemen van een voertuig t.o.v. een fiets voor het rijden van deze trajecten omdat het mogelijk wordt (zeker 's nachts) een transect doorheen de stad op relatief korte tijd kan afleggen. Op die manier beperken we per transect ook een al te groot effect van de grootschalige temperatuurvariatie doorheen de dag.

De temperatuurmetingen worden aan de hand van de HOBO software uitgelezen en achteraf gesynchroniseerd met informatie afkomstig van een GPS ontvanger, die elke seconde (net zoals de temperatuurloggers) de positie van het voertuig wegschrijft. De korte verweringsketen die hiervoor is opgesteld is kort weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 20 : Samenvattend schema voor de meetopstelling van de mobiele metingen.

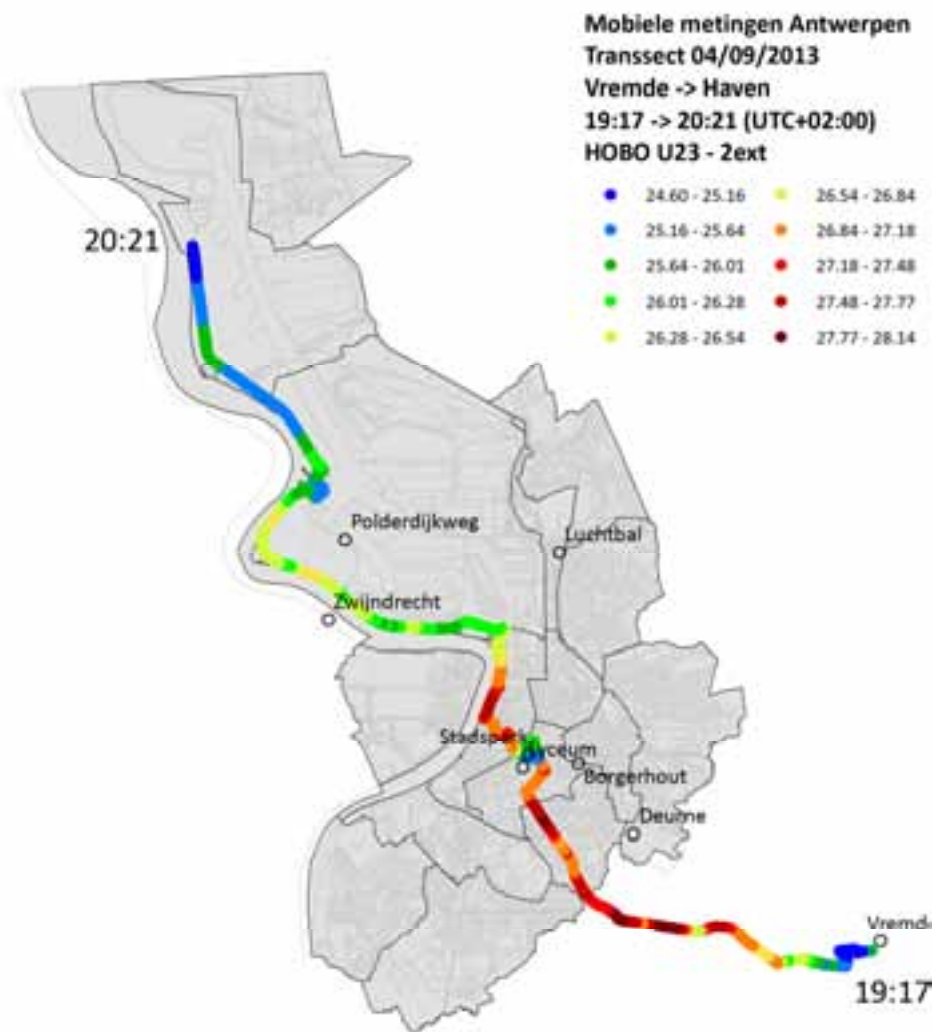
2.2.2. ANALYSE RESULTATEN

Uit de in-situ metingen blijkt reeds dat er overdag relatief weinig ruimtelijke variabiliteit in de luchttemperatuur is, dus concentreren we ons in de analyse op de nachtelijke transecten. Bij analyse bleek allereerst dat het verwachte effect van de actieve ventilatie toch niet zo cruciaal was. Integendeel, door het type sensor dat voor de actief geventileerde metingen gebruikt werd en de afscherming van de lucht in de ventilatie buis tijdens het rijden bleek de responstijd van de actief geventileerde metingen veel groter uit te vallen dan van de sensoren gebruikt in de passief geventileerde metingen¹³. In wat volgt, zullen we dus enkel de passieve metingen gebruiken. We geven in onderstaande figuren de resultaten van de ruwe metingen weer.

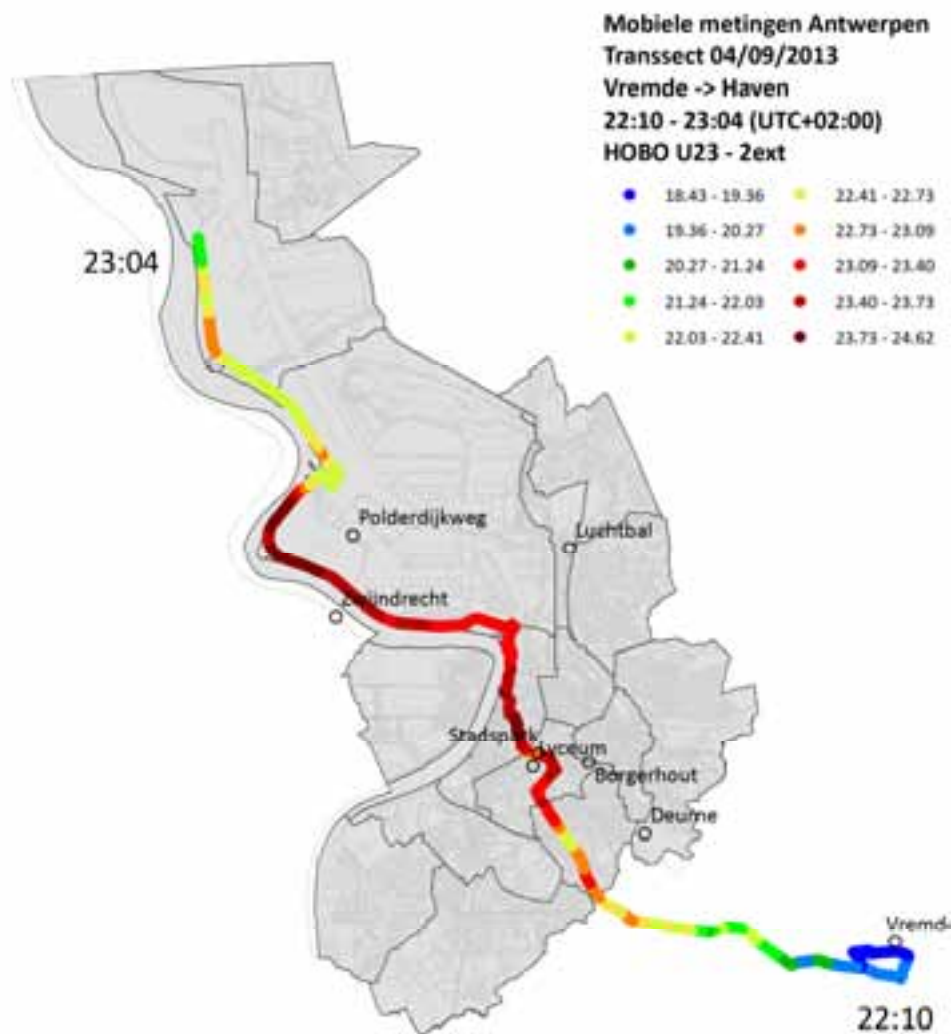
Tabel 4 : Geanalyseerde transecten gereden 's avonds op 04/09/2013

Transect nummer	Startplaats	Starttijdstip	Eindplaats	Eindtijdstip
2.2	Vremde	19:17	Haven	20:21
3.1	Vremde	22:10	Haven	23:04
3.2	Haven	23:04	Scheldekaai	23:52

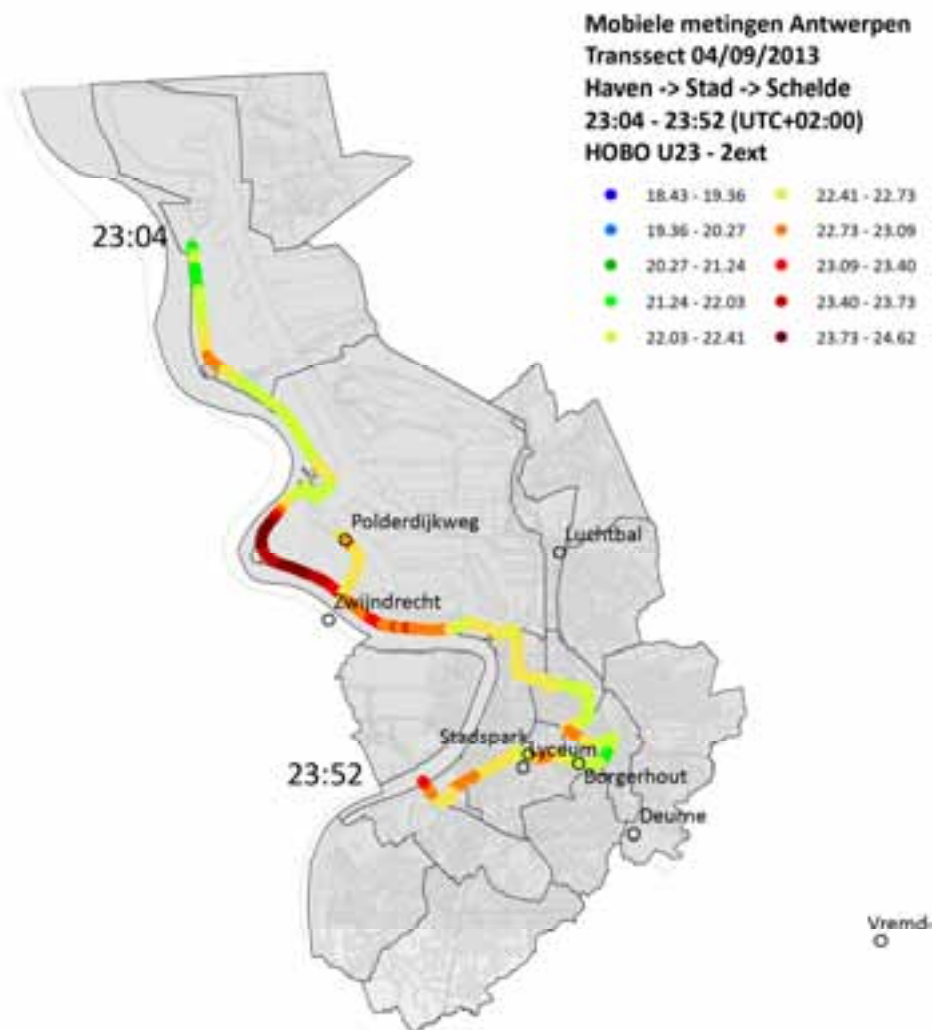
¹³ Voor de passieve metingen werd een ander type sensor gebruikt met een metalen omhulsel. Hierdoor zal deze zich veel sneller in evenwicht stellen met de luchttemperatuur dan de plastic sensor gebruikt in het actief geventileerde stralingsschild. Te meer, 's nachts is de ventilatie snelheid door het rijden van de auto in vlot verkeer veel groter dan de windsnelheid gehaald in de actief geventileerde buis, die de sensor meer van z'n omgeving afschermt dan een passief stralingsschild.



Figuur 21 : Ruwe luchttemperatuur metingen van het transect 2.2, gemeten vanaf Vremde (19:17) tot ver in de haven, ter hoogte van de kerncentrale in Doel (20:21).

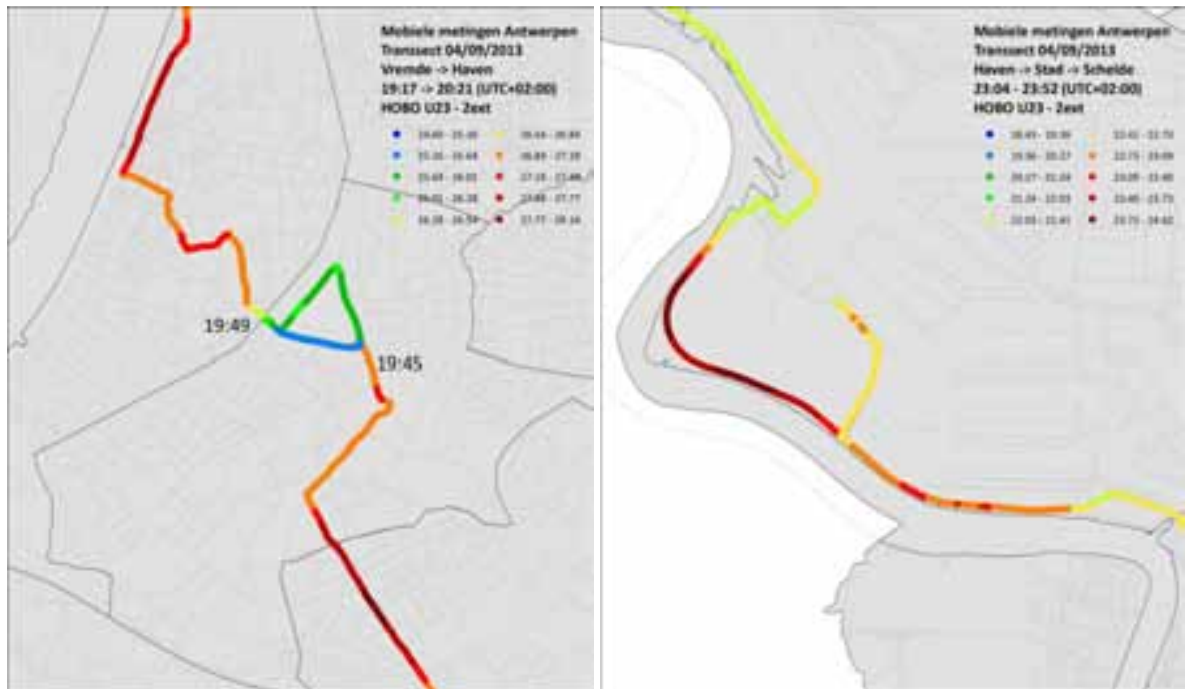


Figuur 22 : Ruwe luchttemperatuur metingen van het transect 3.1, gemeten vanaf Vremde (22:10) tot ver in de haven (23:04), ter hoogte van de kerncentrale in Doel.



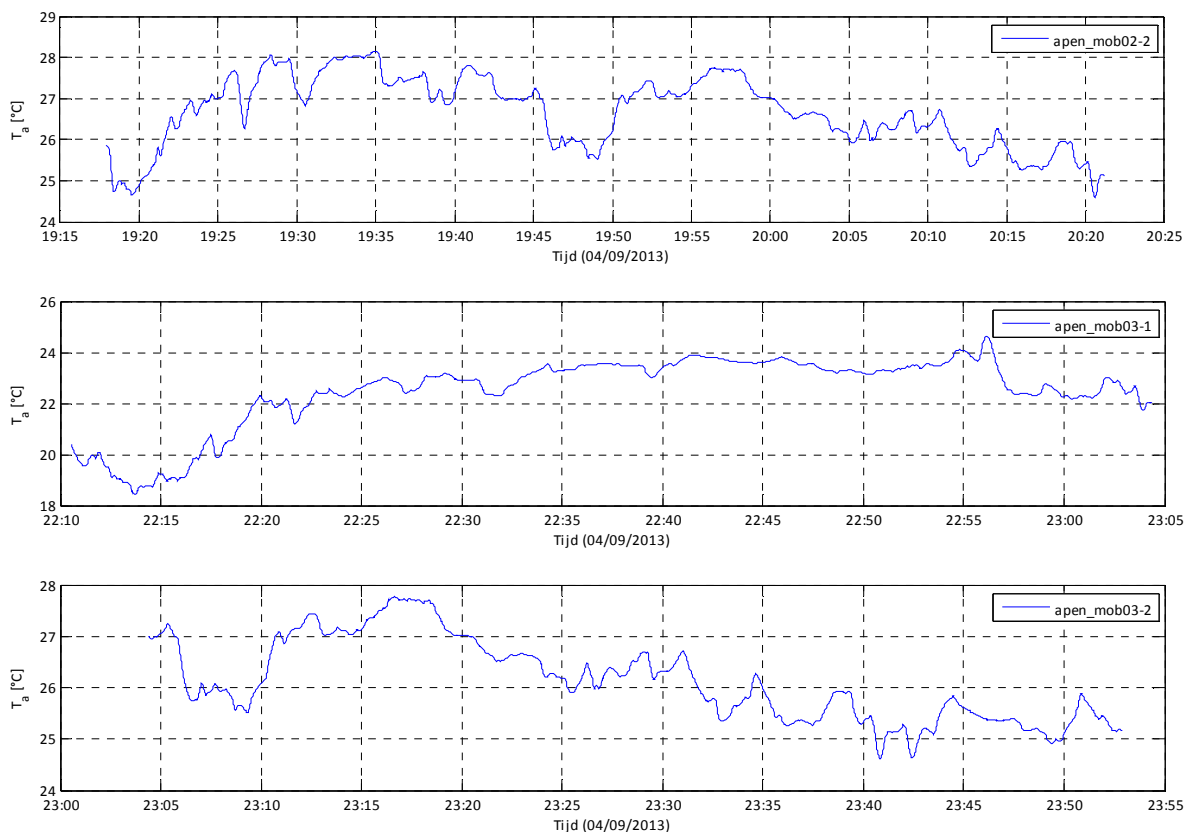
Figuur 23 : Ruwe luchttemperatuur metingen van het transect 3.2, gemeten vanaf de Haven (23:04), via het Centrum en borgerhout tot aan de scheldekaai (23:52).

Hoewel het hier nog niet om voor de grootschalige temperatuur variatie gecorrigeerde metingen gaat, vallen toch een aantal zaken op. Zo merken in onderstaande Figuur 24 duidelijk een verkoelende invloed van het stadspark op de omgeving. Hou in het achterhoofd dat we in de metingen op de weg naast het stadspark reden en er niet doorheen, maar zelfs daar is het effect merkbaar. We spreken in dit geval toch makkelijk over een volle 1 °C, wat ongeveer een 25% is van het SHE effect van die dag. Verder zien we in het tweede luik van de figuur duidelijk dat er hogere luchttemperaturen optreden ter hoogte van de Scheldelaan in de haven. Dit bleek ook reeds uit de in-situ metingen aan de Polderdijkweg en de VMM mast te Zwijndrecht. Het is moeilijk in te schatten of dit effectief een antropogene oorzaak heeft dan wel het gevolg is van de zeer hoge verhardingsgraad die daar aanwezig is in de omgeving (zie verder).



Figuur 24 : Enkele uitvergrotingen van transsecten 2.2 ter hoogte van het stadspark en 3.2 ter hoogte van de Scheldelaan in de haven van Antwerpen.

Het effect van het stadspark op de omgeving is verder ook duidelijk merkbaar uit het bovenste paneel van onderstaande Figuur 25 (zie tussen 19:45 en 19:50 op de x-as).



Figuur 25 : Grafiek van de gemeten transecten 2.2, 3.1 en 3.2 (van boven naar onder) met tijdsaanduiding.

Uit Figuur 21 en Figuur 23 zien we verder ook dat de grootschalige temperatuurafname de globale patronen iets lastiger te interpreteren maakt. In transect 2.2 (Figuur 21) zien we bijvoorbeeld temperaturen in de orde van 24.5 °C in Vremde en op het einde in de haven. Het duurt echter bijna een uur om het traject af te leggen, dus wanneer we in de haven aankomen zal het ondertussen reeds verder afgekoeld zijn in Vremde. In deze mobiele transecten hebben we m.a.w. geen instantaan beeld van de temperatuur verdeling in de stad. Ervoor corrigeren is ook niet vanzelfsprekend gezien verschillende stedelijke morfologiën op een verschillende manier zullen afkoelen (trager of sneller), wat juist het kenmerk is van het SHE wat we wensen te onderzoeken. We probeerden allereerst een pragmatische aanpak. In onderstaande tabel noteerden wij de gemeten temperaturen te Vremde, het KLA en aan de Polderdijkweg voor zowel het begin als het eind tijdstip van het transect.

Tabel 5 : Temperatuurwaarden gemeten door de in-situ metingen te Vremde, KLA en aan de Polderdijkweg op het start en eindpunt van de mobiele transecten.

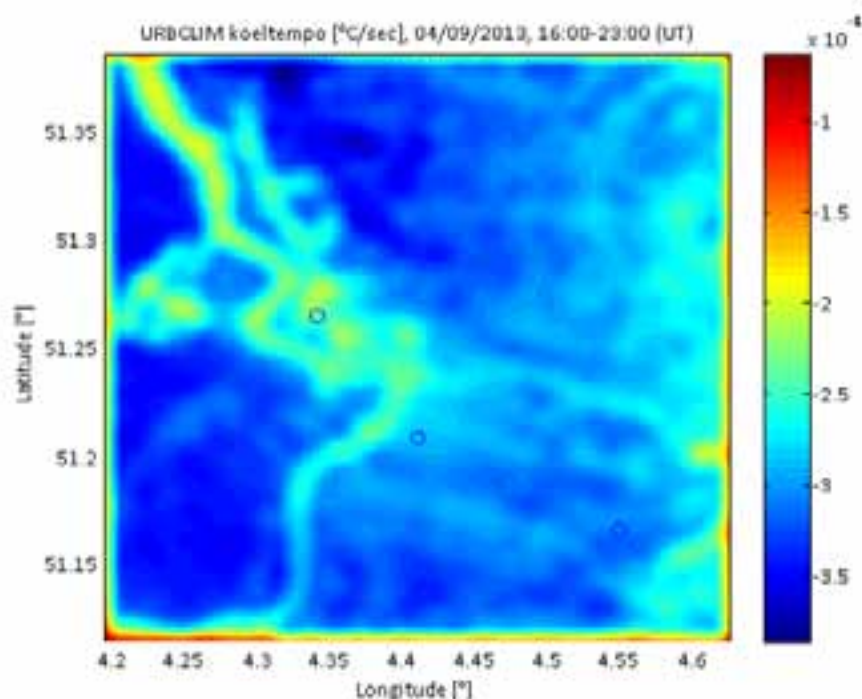
Transect	Tijdstip		Vremde		Lyceum		Polderdijkweg	
	Start	Eind	T_{start} [°C]	T_{eind} [°C]	T_{start} [°C]	T_{eind} [°C]	T_{start} [°C]	T_{eind} [°C]
2.2	19:17	20:21	25.34	21.18	27.65	26.10	27.04	25.38
3.1	22:10	23:04	18.66	18.87	23.70	22.95	23.30	22.51
3.2	23:04	23:52	18.87	17.21	22.95	22.30	22.51	21.75

Daarna berekenen we de helling van de temperatuursafname voor elk van de in-situ locaties, overeenkomstig met elk van de 3 transecten (begin & eind tijdstip). We namen dan per transect de gemiddelde helling van de afname en vonden voor een grootschalige temperatuursafname:

Tabel 6 : Gemeten temperatuursafname (helling van de luchttemperatuurgrafiek voor de gegeven transecten gemeten op 3 verschillende lokaties en de gemiddelde waarde.

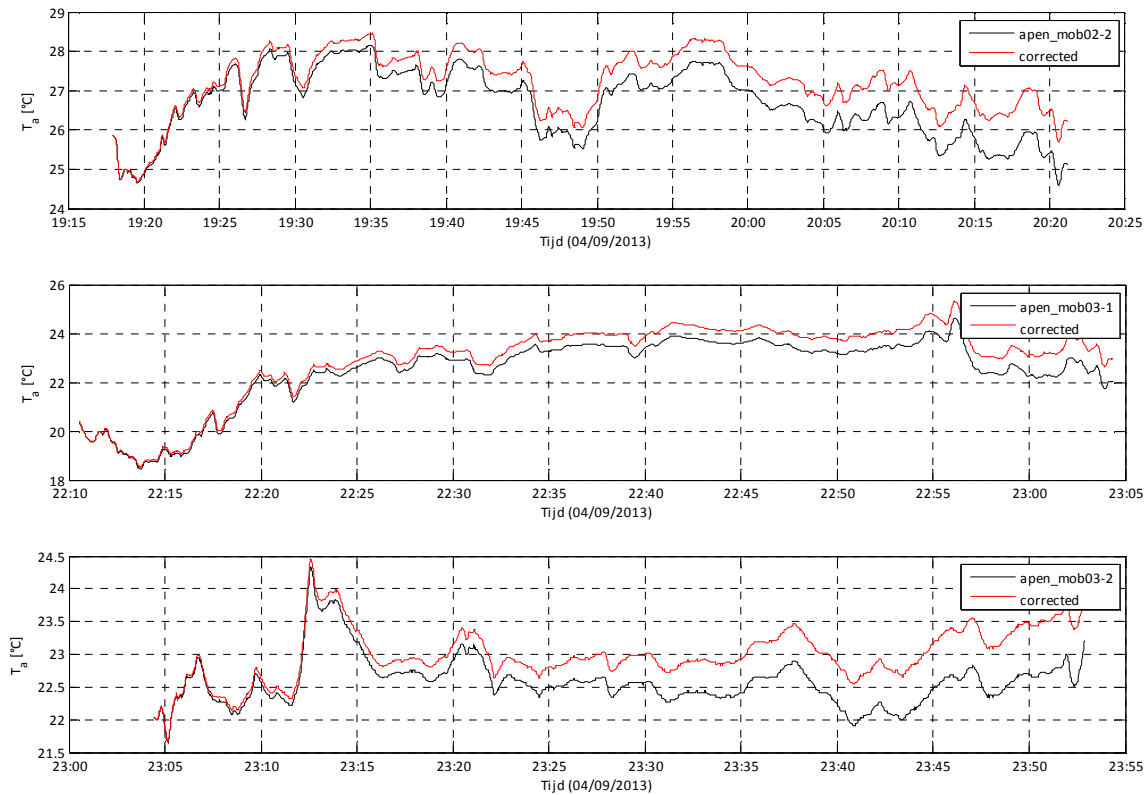
Transect	Vremde [°C/sec]	Lyceum [°C/sec]	Polderdijkweg [°C/sec]	Gemiddelde helling [°C/sec]
2.2	-0.001095	-0.000408	-0.000437	-0.000647
3.1	0.000065	-0.000232	-0.000245	-0.000137
3.2	-0.000571	-0.000223	-0.000261	-0.000352

Wanneer we echter met deze gemiddelde hellingen pogen de mobiele metingen te corrigeren, dan merken we dat we in de haven een te sterke correctie doorvoeren t.o.v. de in-situ metingen. We dienen m.a.w. het koelingstempo op een ruimtelijk expliciete manier in rekening te brengen om op een consistente manier te kunnen corrigeren voor de grootschalige temperatuurvariatie. In een later hoofdstuk zullen we de modelberekeningen beschrijven adhv het URBCLIM model, wat ons een ruimtelijk beeld levert van de luchttemperatuur voor elk uur van de dag. Vooruit lopend op de feiten kunnen we op basis van deze modelberekeningen wel een ruimtelijk expliciet koelingstempo bepalen. Dit is afgebeeld in onderstaande Figuur 26. We zien dat de waarden voor het verstedelijkt gebied relatief goed overeenkomen ~ -0.00020 tot -0.00025 °C/sec met de waarden in bovenstaande tabel voor transecten 3.1 en 3.2.

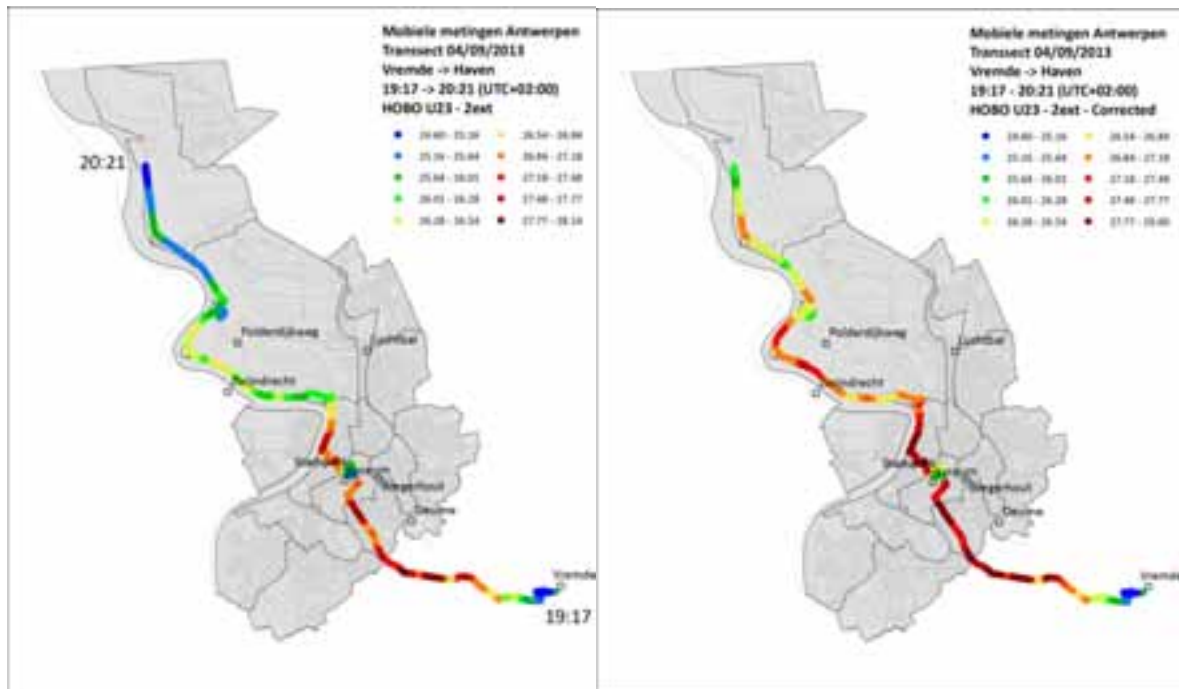


Figuur 26 :Afkoeltempo voor vrijdagmiddag 04/09/2013 berekend als een verschil in °C/sec, gemiddeld tussen 18:00 en 01:00 (volgende dag) lokale tijd. Op de figuur zijn de meetlokatie voor

Vremde, Lyceum en Polderdijkweg aangegeven met de o. Op de originele 100m urbclim berekeningen is een 2D gaussische filter toegepast met breedte 15 pixels en sigma 5 pixels om de helling ruimtelijk iets homogener te maken.



Figuur 27 : Gecorrigeerde luchttemperatuurprofielen.



Figuur 28 : Transect 2.2 (zie hogerstaande figuur), maar ditmaal rechts met correctie voor de grootschalige temperatuurgradiënt.

We merken na correctie duidelijk op transect 2.2 dat de luchttemperaturen in de haven zoals verwacht iets hoger getrokken worden. Nu we alle mobiele metingen gecorrigeerd hebben, kunnen we ze gebruiken om na te gaan in hoeverre we de ruimtelijke variabiliteit kunnen verklaren door middel van beschikbare GIS data. Dit zal gebeuren in Hoofdstuk 3.

HOOFDSTUK 3. DETECTIE VAN DE OORZAKEN

Bino Maiheu en Dirk Lauwaet - VITO

In dit hoofdstuk zullen we de oorzaken van het stedelijk warmte eiland in Antwerpen in meer detail bespreken. We zullen trachten te achterhalen waarom het SHE zo'n grote rol speelt in Antwerpen. De verschillende eigenschappen van het stedelijk weefsel worden daarom in relatie gebracht met de optredende luchttemperaturen. De te verklaren variabele is deze temperatuur. Via een multivariabele regressie kan nagegaan worden wat de invloed is van de verschillende onafhankelijke variabelen. Deze techniek wordt meestal gebruikt om het onderzoek naar het SHE te voeren (Arnfield, 2003). De gevonden gewichten (β) zeggen ons hoeveel een daling of stijging van een bepaalde variabele, indien de overige gewichten constant blijven, zich vertaalt naar een verandering in luchttemperatuur. Indien een bepaalde stijging of daling van een variabele x een grote verandering meebrengt in de CLUHI waarde, betekent dit dat deze variabele x een grote invloed heeft. In de formule zou deze variabele dan ook een groot positief of negatief gewicht krijgen, rekening houdend met de gebruikte eenheid. Een multivariabele regressie formule is:

$$Y = \text{constante} + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n$$

waarbij Y de afhankelijke CLUHI dataset is en x_1 de verschillende onafhankelijke variabelen zijn.

Als CLUHI dataset gebruiken we de gemeten mobiele transecten doorheen de stad Antwerpen, meer bepaald transect 3.1 uit Hoofdstuk 2. Deze data kunnen als volledig onafhankelijk beschouwd worden ten opzichte van de verklarende variabelen. Daarom opteren we dus om de analyse op basis van deze metingen te doen. Als onafhankelijke variabelen gebruiken we het lijstje dat is weergegeven in Tabel 7. Hieronder zullen deze variabelen eerst worden besproken vooraleer we zullen overgaan naar de resultaten van de regressie analyse. Zowel de metingen als de onafhankelijke variabelen zijn geherprojecteerd naar een 100m resolutie grid om de analyse uit te kunnen voeren.

Tabel 7: Onafhankelijke variabelen van het regressiemodel.

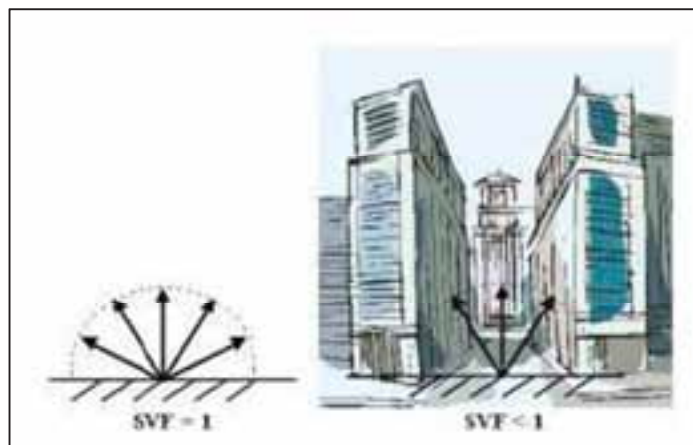
<i>Variabele</i>	<i>Gebruikte data</i>	<i>Datum</i>
Sky View Factor (%)	Eigen berekening (zie Hoofdstuk 4)	2013
Fractie vegetatie (%)	NDVI-beeld	16/07/2006
Fractie water (%)	Wateroppervlaktes Antwerpen	2013
Fractie verharding (%)	EEA Soil Sealing Map	2011

3.1. DE ONAFHANKELIJKE VARIABLEN

Er is geen duidelijke set van variabelen die gebruikt moeten worden om urbane morfologie en klimatologie te bestuderen (Giridharan et al., 2007). Echter sinds Oke (1982) als eerste het UHI trachtte te bestuderen, maken onderzoekers meestal gebruik van een gelijkaardige selectie van onafhankelijke variabelen om de temperatuurvariaties te verklaren. Doordat het UHI voornamelijk optreedt in stedelijke omgevingen, worden de volgende variabelen gebruikt om de verschillende stedelijke weefsels binnen een stad te beschrijven (Arnfield, 2003):

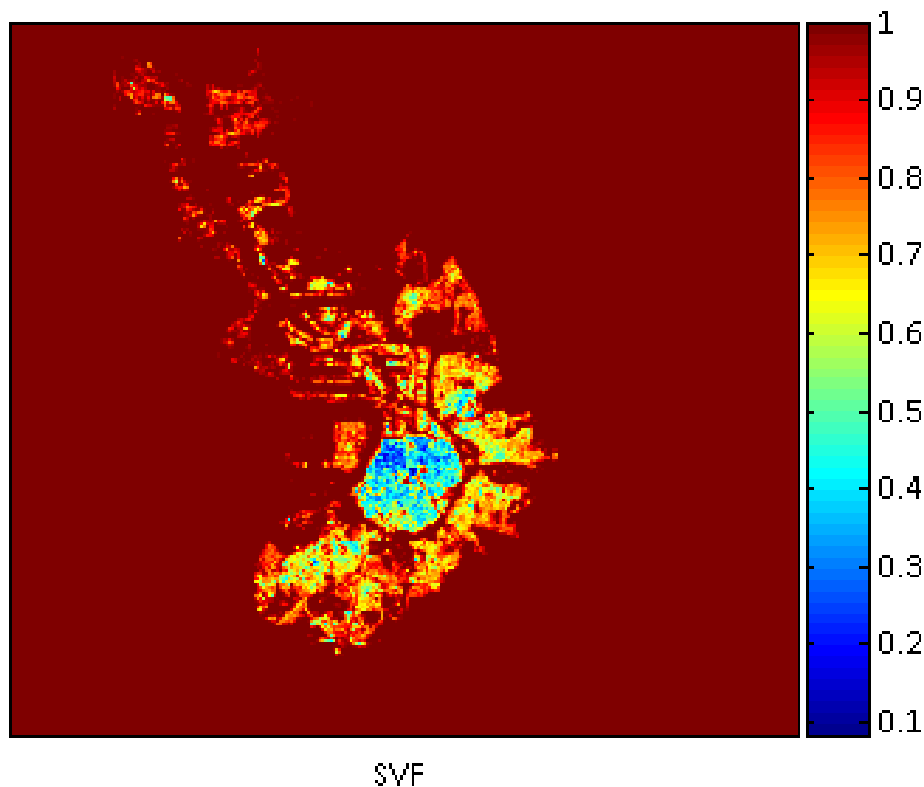
3.1.1. DE SKY VIEW FACTOR

Deze factor wordt uitgebreid besproken in Hoofdstuk 4, waar we hem ook zullen berekenen uit het 3D model van Antwerpen. We duiden hier kort even het belang ervan. Volgens Oke (1982) is een belangrijke parameter die het SHE beïnvloedt de openheid van het stedelijk weefsel, aangeduid als de Sky View Factor (SVF) (waarden tussen 0 en 1, herschaald naar 0-100% in het regressiemodel). De SVF-waarde hangt af van hoe goed op een bepaalde plaats de hemel zichtbaar is. Hoe lager de SVF-waarde, hoe minder de hemel dus kan gezien worden. Smalle straten met hoge gebouwen hebben dan ook lage SVF-waarden.



Figuur 29: De sky view factor (Bron: Oke, 1982)

De SVF in stedelijke omgevingen is volgens Giridharan et al. (2004) een relatief goede proxy voor de bewoningsdichtheid waardoor deze SVF-waarden ook een deel van de aanwezige antropogene warmte verklaren. Hoe hoger en dichter woningen bij elkaar staan, hoe meer mensen er wonen. Deze aanname is niet altijd volledig juist, maar wel tot op een aanvaardbaar niveau. Onderstaande figuur toont de Sky View Factor voor Antwerpen, herschaald naar het 100m resolutie UrbClim grid, zoals we zullen gebruiken in de analyse. Zoals verwacht liggen de laagste waarden duidelijk in het centrum van de stad, met name in het historisch centrum en het noord-oosten, waar zich de meeste smalle straatjes bevinden.



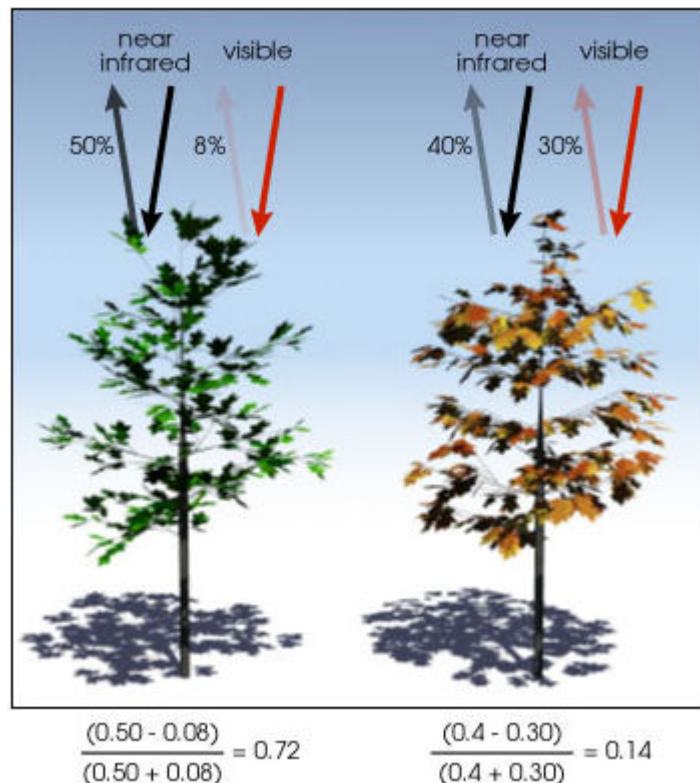
Figuur 30: De Sky View Factor in Antwerpen, herschaald naar het 100m UrbClim grid.

3.1.2. DE FRACTIE VEGETATIE

Volgens Yuan en Bauer (2007) is de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) als basis om de fractie vegetatie mee te nemen een goede benadering om de relatie tussen groengebieden en het CLUHI te onderzoeken. Ook deze parameter wordt meer uitgebreid besproken in Hoofdstuk 4, maar we zullen hier kort de belangrijkste zaken duiden. De NDVI is een maat voor het aandeel biomassa in een pixel en is een objectieve satellietwaarneming. Deze wordt berekend volgens de formule:

$$NDVI = (NIR - VIS) / (NIR + VIS)$$

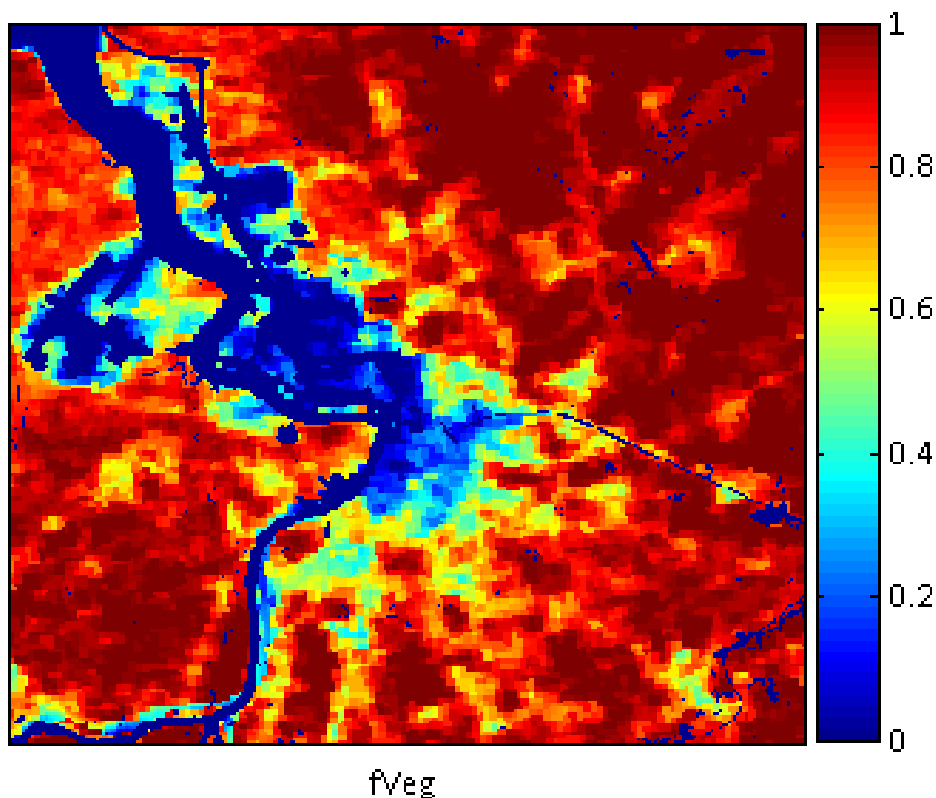
waarbij NIR staat voor Near InfraRed (nabij infrarood) en VIS voor Visible red (zichtbare rood). De meting gaat als volgt:



Figuur 31: De meting van NDVI aan de hand van het nabije infrarood (near infrared) en het zichtbare rood (visible) op een boom tijdens de lente en herfst (Bron: (NASA, 2013)).

NDVI waarden kunnen theoretisch een waarde aannemen tussen -1 en 1. Water heeft een negatieve waarde. Lage positieve waarden tussen 0 tot ongeveer 0,1 verwijzen naar een kale, zoals rotsachtige of zandachtige, bodembedekking. De waarden vanaf 0,1 zijn waarden waar er vegetatie voorkomt. De eerste vegetatietypes zijn grastypes. Hoe hoger de waarden daarna worden, hoe dichter de vegetatie wordt. De hoogste waarden bevinden zich rond 0,9 en zijn typische bosgebieden (Yuan en Bauer, 2007).

We maken hier gebruik van een zomerbeeld verkregen voor 16 juli 2006. Om alleen vegetatie mee te nemen, werd het NDVI beeld beperkt tot waarden tussen 0,15 (aanwezigheid van aanzienlijk wat vegetatie zoals gras) en 0,85 (de maximum waarden op het beeld). Deze werden vervolgens herschaald tussen 0 en 100 procent, waardoor een kaart verkregen werd die per pixel aantoont wat de fractie vegetatie is.



Figuur 32: De fractie vegetatie per gridcel van 100 m voor Antwerpen.

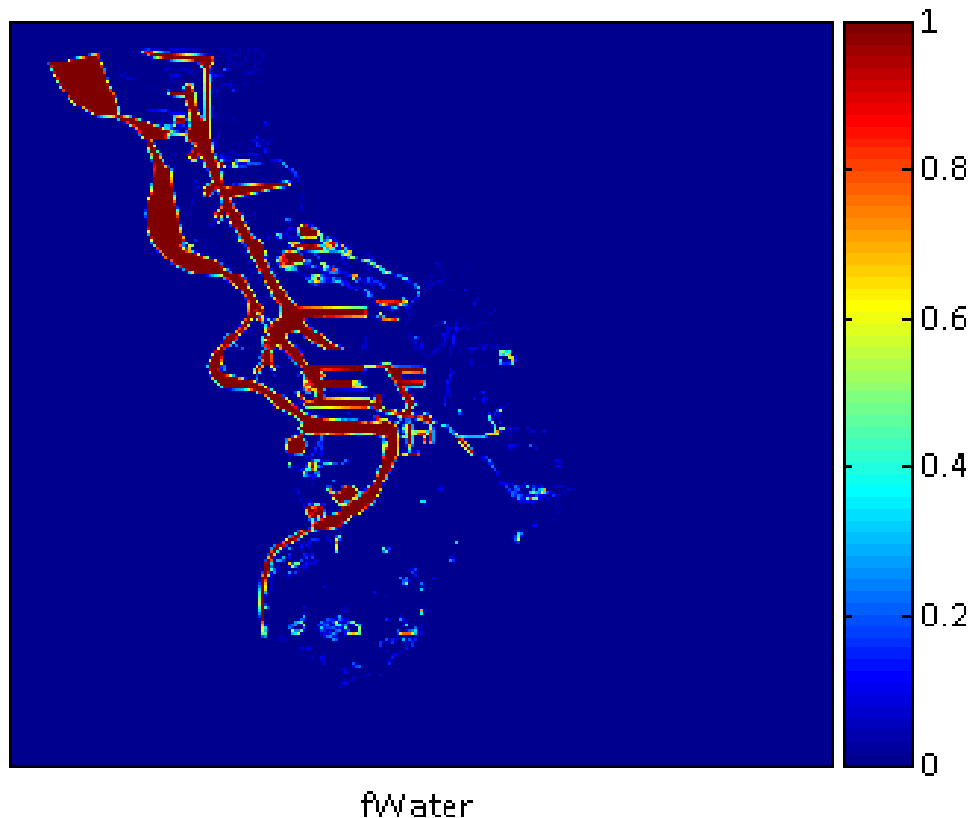
Omdat in dit onderzoek gewerkt wordt met een resolutie van 100m, kan het soms gebeuren dat sommige groene delen niet meer zichtbaar zijn. Een enkele boom in een tuin is bijvoorbeeld niet detecteerbaar doordat het gemiddelde van die cel niet boven de ondergrens komt. Uitspraken op basis van de fractie vegetatie zijn dus steeds enkel geldig op 'grootschalige' vegetatie. Kleine groenelementen, zoals bijvoorbeeld een boom in een straat, zijn in dit onderzoek niet detecteerbaar en worden dus niet verder behandeld.

De fractie vegetatie toont waarden tussen 0 en 100 procent. Deze schaal is echter niet op eenzelfde manier te interpreteren als de aanwezigheid van bijvoorbeeld asfalt in een bepaalde pixel. Zo is een verschil tussen bijvoorbeeld 20 en 40 procent niet simpel een verdubbeling van de vegetatie, zoals een stijging van 1m² naar 2m² gras. Een boom op een oppervlakte van 1m² heeft bijvoorbeeld meer biomassa dan 1m² gras.

3.1.3. DE FRACTIE WATER

De parameter fractie water toont hoeveel oppervlakte van de totale grid oppervlakte er uit water bestaat, dit uitgedrukt in procenten. De aanwezigheid van water zal een grote invloed hebben op de optredende temperatuurwaarden door uitwisseling via evaporatie en afkoeling (Coutts et al., 2013). Ook hier moet de kanttekening gemaakt worden dat de regressie met deze parameter op de CLUHI kaart waarschijnlijk minder invloed zal hebben doordat de metingen begin september zijn uitgevoerd, wanneer het water in de stad relatief warm is, in tegenstelling tot de lente of het begin van de zomer.

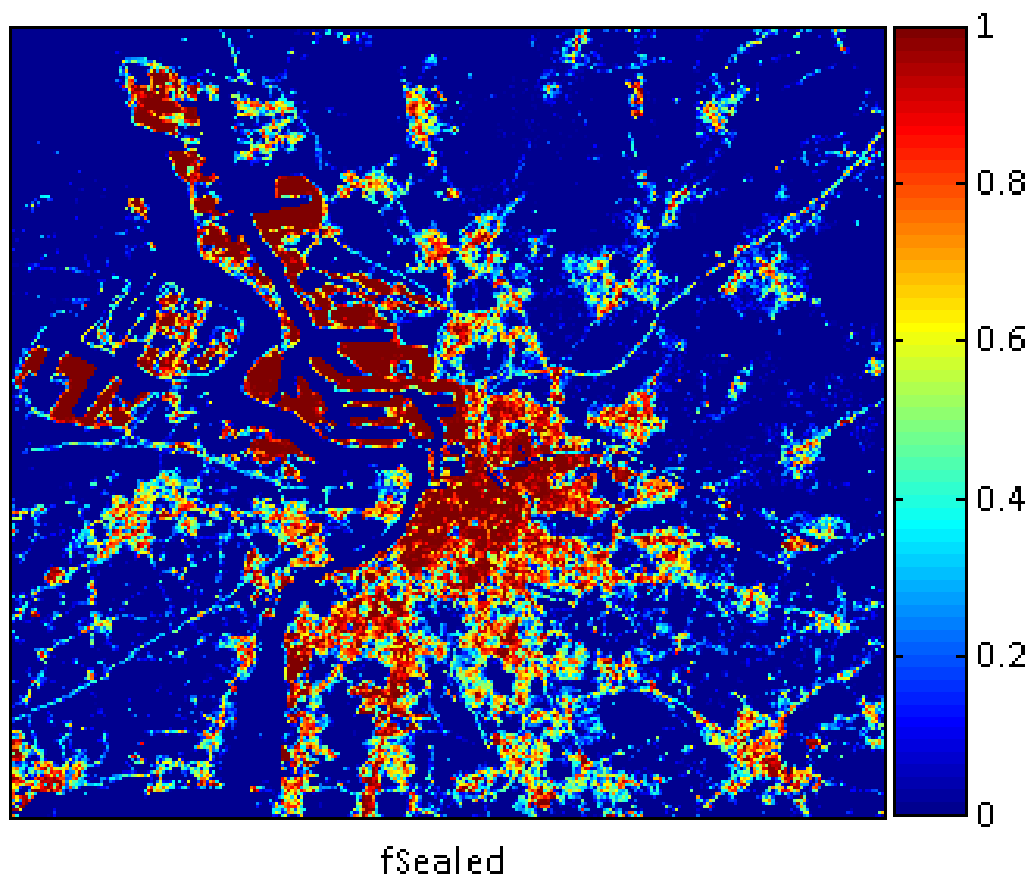
De dominante wateroppervlakken in Antwerpen zijn duidelijk de Schelde en de havendokken. Elders is er wel redelijk wat open water aanwezig buiten het stadcentrum, maar binnen de singel is dit erg beperkt. Enkel in het stadspark, en in mindere mate in de Zoo, is er open water aanwezig.



Figuur 33: De fractie water per gridcel van 100 m voor Antwerpen.

3.1.4. DE FRACTIE VERHARDING

De fractie verharding is een variabele die toont hoe bedekt een bepaalde oppervlakte is, met andere woorden, hoeveel oppervlakte er ingenomen is door een gebouw, wegen, voetpaden, enz. Een waarde van 100 procent betekent dat er op die bepaalde oppervlakte geen onverhard deel meer is. Onderstaande kaart toont deze variabele op de 100m grid-resolutie. Vanzelfsprekend is te zien dat het stadscentrum hoge waarden heeft. Maar de grootste aaneengesloten verharde gebieden zijn te vinden in de haven.

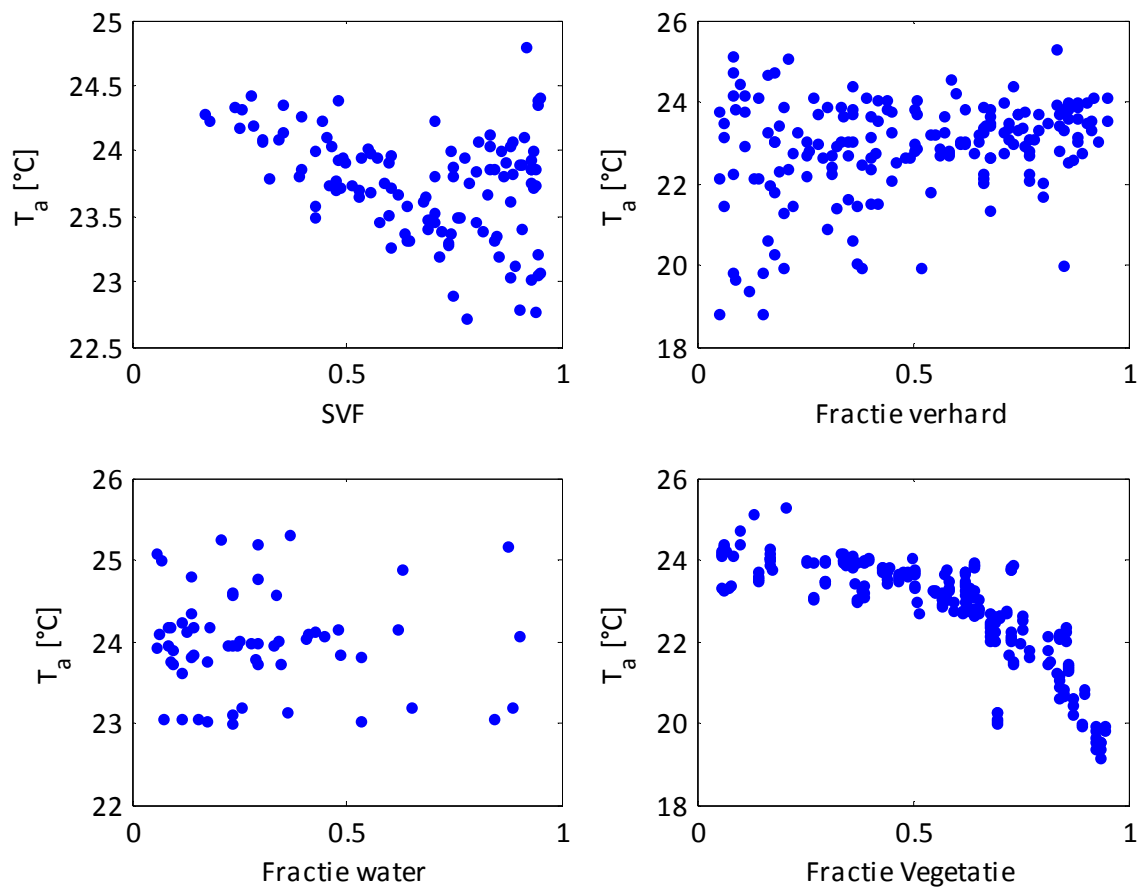


Figuur 34: De fractie verharding per gridcel van 100 m voor Antwerpen.

3.2. RESULTATEN

Aan de hand van de multivariabele regressietechniek werd achterhaald welke invloed de verschillende onafhankelijke variabelen hebben op de gemeten CLUHI waarden. Zoals reeds vermeld werden alle proxy parameters, en de gecorrigeerde luchttemperatuur metingen van transect 3.1, naar een 100x100m grid geaggregeerd voordat de correlatie analyse werd doorgevoerd.

Wanneer we deze proxy variabelen in verband brengen met de gecorrigeerde mobiele metingen van transect 3.1, dan vinden we de xy-scatterplots van Figuur 35. Tabel 8 geeft de resultaten van de correlatie analyse. Belangrijk bij multivariabele regressies is de determinatiecoëfficiënt R^2 . Deze waarde zegt ons hoe goed een bepaalde variabele de optredende temperaturen kan voorspellen. Anders gezegd betekent dit dat hoe hoger de R^2 -waarde is, hoe beter de gekozen set van variabelen die er in het regressiemodel zitten er in slagen bepaalde temperaturen te voorspellen die dicht aanleunen bij de temperaturen die er daadwerkelijk ook optreden.



Figuur 35: Correlatie analyse tussen de verschillende proxy variabelen in de gemeten, gecorrigeerde luchttemperatuur langs transect 3.1

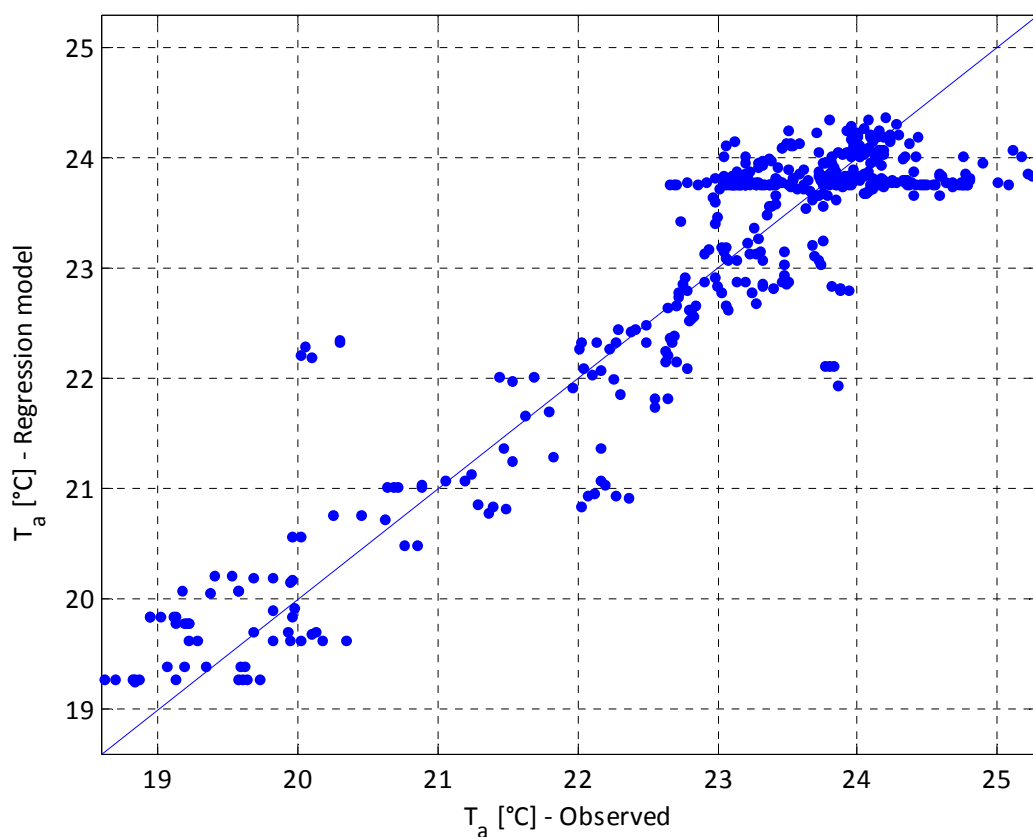
Tabel 8: Resultaten individuele correlatie analyse van de gecorrigeerde luchttemperaturen langs transect 3.1 en de 4 proxy variabelen.

		Constante	SVF	Fractie verzegeld	Fractie Water	Fractie Vegetatie	Fractie Vegetatie ²
Pearson	correlatie	-	-0.36	0.26	-0.05	-0.79	-0.86
coëfficiënt							
R ²		-	0.13	0.07	0.00	0.62	0.75
c _i		24.31	-0.55	-0.17	0.29	3.58	-8.07

De luchttemperatuur op dit transect vertoont een zeer sterke negatieve correlatie met de vegetatie fractie, die bijna 62% van de ruimtelijke variantie verklaard. Ook voor de sky view factor zien we een duidelijk negatieve correlatie. Er geldt dus m.a.w. hoe hoger de SVF, hoe lager de temperatuur. Inderdaad, hoe meer open het stedelijk weefsel, hoe efficiënter het warmte kan verliezen en dus afkoelen. De fractie water heeft hier weinig tot geen verklarende kracht. Voor de fractie verzegeld gebied zien we een duidelijk positieve correlatie, hoe hoger de graad van verzegeling, hoe hoger de luchttemperatuur. Logisch, maar we merken wel dat de verklaarde variantie relatief beperkt is, slechts 7%. We dienen hier echter op te merken dat de fractie verzegeld gebied en de fractie

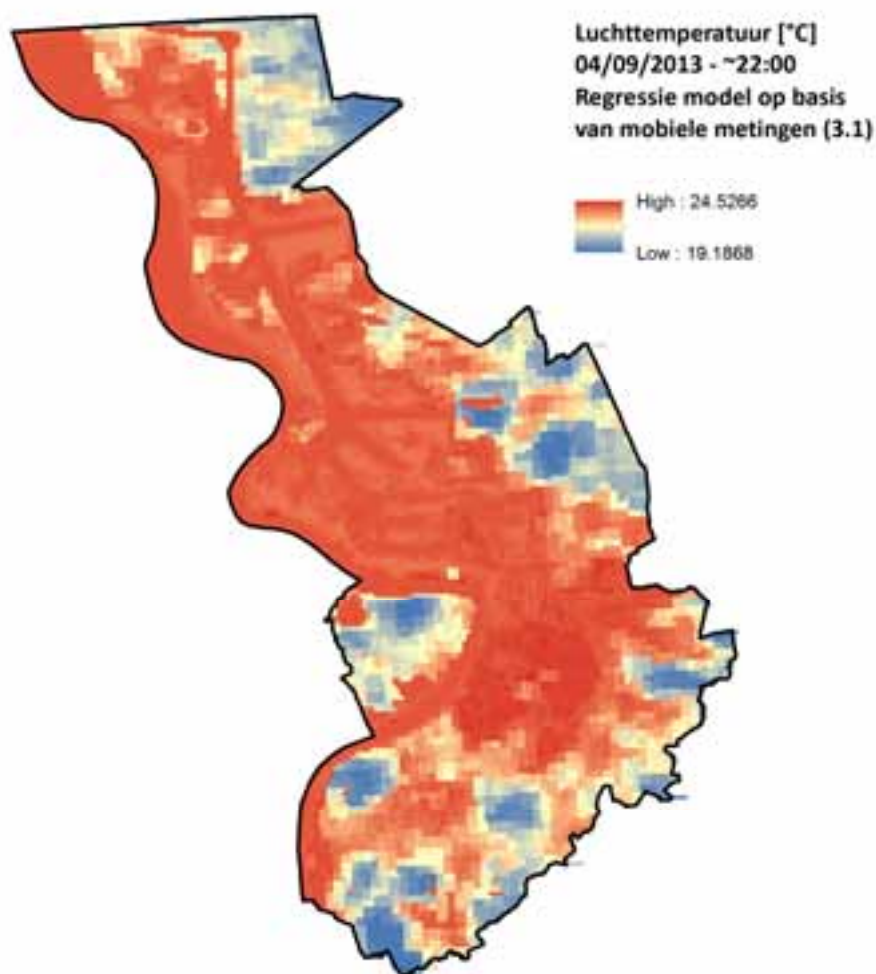
vegetatie duidelijk geen onafhankelijke variabelen zijn. Doordat het grootste deel van de ruimtelijke variantie door de fractie vegetatie verklaard wordt impliceert dit dat een even groot deel van de variantie door de afwezigheid van vegetatie verklaard wordt (i.e. verzegeld gebied, de fractie naakte grond in Antwerpen zal naar alle waarschijnlijkheid relatief beperkt zijn).

We merken echter wel duidelijk een niet-lineaire afhankelijkheid van de fractie vegetatie in deze analyse. Wanneer we een correlatie analyse uitvoeren met de fractie vegetatie in het kwadraat, dan slagen we er zelfs in om 75 % van de ruimtelijke variabiliteit te verklaren (zie tabel). We kunnen dit alles nu in een regressie model gieten, waarvan de coëfficiënten ook in de tabel zijn weergegeven. Dit regressie model slaagt erin om in totaal 86 % van de ruimtelijke variantie van de gemeten luchttemperaturen te verklaren voor transect 3.1. Een vergelijking tussen de regressie resultaten en de originele gemeten luchttemperaturen is in onderstaande figuur opgenomen.



Figuur 36: Vergelijking tussen de originele (gecorrigeerde) luchttemperaturen op transect 3.1 en de resultaten van het regressiemodel op basis van de proxy parameters.

Met dit regressie model kunnen we vervolgens een inschatting maken voor een gebiedsdekkende kaart van de luchttemperatuur in de avond van 04/09/2013. Deze kaart is hieronder weergegeven. Uiteraard is deze methode niet geschikt om de meest accurate weergave te leveren van de evolutie van de luchttemperatuur in de ruimte en de tijd, daarvoor is de meer complexe aanpak met het gesofisticeerde UrbClim model van VITO nodig, die we zullen uitvoeren in Hoofdstuk 5. Maar deze oefening toont dus wel duidelijk aan dat de combinatie van de bestudeerde vier parameters al volstaat om een goed beeld te krijgen van de locatie en grootte van het CLUHI.



Figuur 37: Resultaat van het toepassen van het regressie model op Antwerpen. Dit geeft een ruimtelijke expliciete inschatting weer van de luchttemperatuur 's avonds op 04.09.2013 omstreeks 22:00h. Dit is een eenvoudige inschatting van de CLUHI-situatie, voor een meer accurate weergave verwijzen we naar het hoofdstuk over de modellering.

HOOFDSTUK 4. ANALYSE VAN HET OPPERVLAKTE HITTE-EILAND EFFECT IN ANTWERPEN

Dirk Lauwaet en Bino Maiheu- VITO

4.1. INLEIDING

In dit hoofdstuk analyseren en brengen we het zogeheten oppervlakte hitte-eiland effect of *surface urban heat island* (SUHI) van Antwerpen in kaart. Onder “surface urban heat island” verstaan we het verschijnsel dat de oppervlakte temperatuur van een stad gevoelig hoger kan zijn dan de omringende rurale omgeving. We dienen hier vanaf het begin reeds duidelijk te maken dat we in dit hoofdstuk zullen spreken over de *oppervlakte*temperatuur, waarmee we de kinetische temperatuur van het oppervlak (de straatstenen, muren, daken, bladtemperatuur in parken,...) bedoelen, niet de luchttemperatuur. Dit is een niet onbelangrijk onderscheid dat duidelijk gemaakt dient te worden om misinterpretatie van de resultaten tegen te gaan. Oppervlakte – en lucht hitte-eilanden 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). Tabel 9 hieronder lijst enkele kenmerken op van oppervlakte en canopy layer hitte-eilanden:

Tabel 9: Basis karakteristieken van oppervlakte en atmosferische hitte-eilanden. Naar (US-EPA, 2013), zie ook <http://www.epa.gov/heatisld/>

Eigenschap	Oppervlakte Hitte-eiland (SUHI)	Lucht (canopy layer) 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 - Intensiteit : tot > 30 °C (dag), 5 tot 10 °C (nacht)	- Minder ruimtelijke variatie - Intensiteit overdag -1 tot 3°, 's nachts tot 7 – 12 °C
Identificatie methode	- Indirecte meting : remote sensing (satelliet)	- directe meting : weerstations, mobiele metingen

De oppervlakte temperatuur is belangrijk in die zin dat zij in belangrijke mate ook de modulatie of dagcyclus van de luchttemperatuur gaat bepalen. Hogere oppervlakte temperaturen zullen voor een hogere warmteflux en bijgevolg sterkere opwarming van de atmosfeer zorgen. De invloed is echter indirect. Parken en begroeide zones in de stad hebben typisch een lagere oppervlakte temperatuur en zullen dus ook bijdragen tot een lagere luchttemperatuur. Dicht bebouwde zones aan de andere kant zullen typisch een hogere luchttemperatuur kennen, maar doordat de lucht niet ter plaatse blijft hangen en er menging optreedt is de relatie tussen oppervlakte temperatuur 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 turbulente menging.

Oppervlaktetemperatuur, zoals in de tabel aangegeven, wordt typisch aan de hand van remote sensing en meer bepaald satellietdata in beeld gebracht. In Voogt en Oke (2003) wordt uitgebreid ingegaan op het wetenschappelijk gebruik van satelliet data voor stedelijke klimaatstudies gezien er toch enige voorzichtigheid geboden is bij de interpretatie van satelliet data. Enkele aspecten hieruit zullen we in de volgende inleidende tekst van dichterbij bekijken. Daarna beschrijven we in detail de oppervlakte temperatuurbeelden die we voor Antwerpen hebben opgevraagd, verwerkt en geanalyseerd.

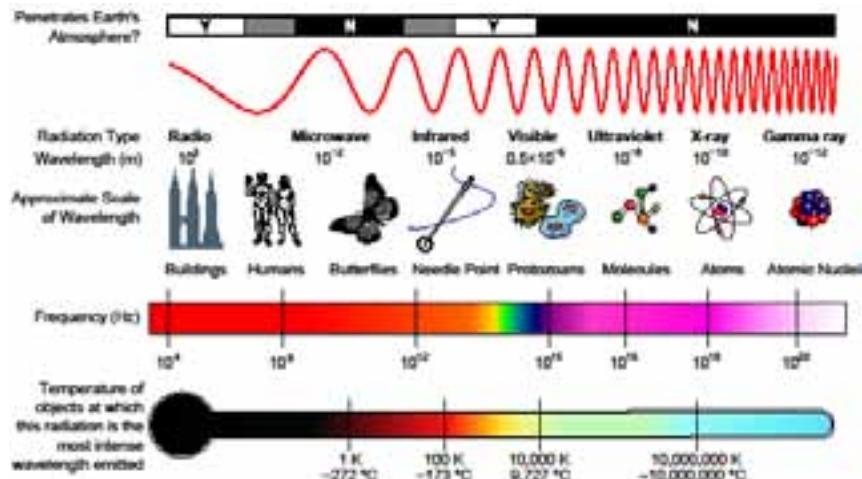
4.1.1. AFLEIDEN VAN OPPERVLAKE TEMPERATUUR OP BASIS VAN SATELLIET GEGEVENS

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

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

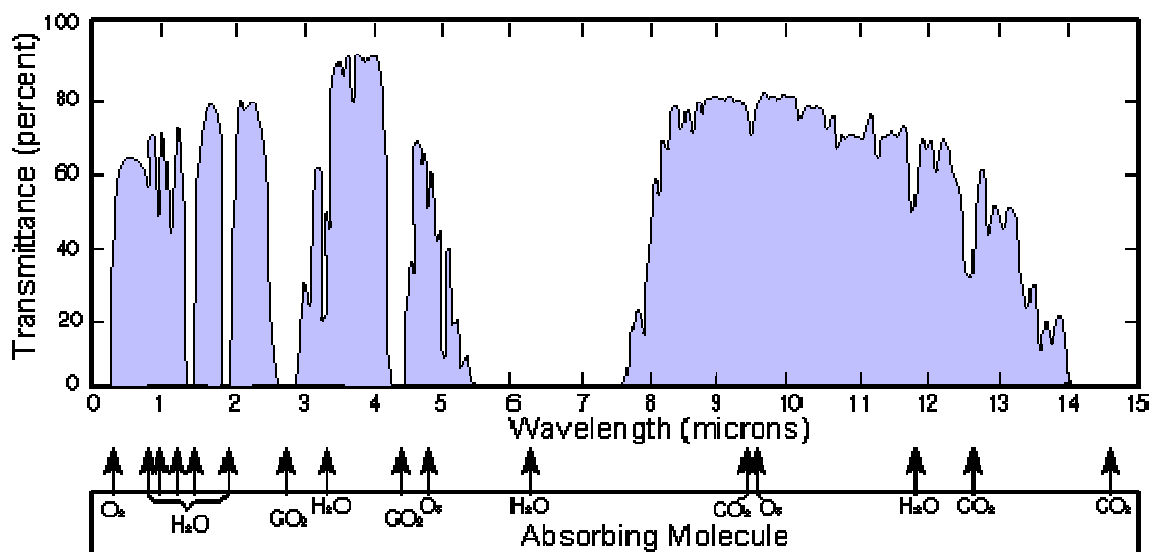
Waarin h, c en k_B respectievelijk de constante van Planck, de lichtsnelheid en de constante van Boltzmann. Deze wet geldt echter slechts voor een ideale zwarte straler¹⁴. In realiteit zullen verschillende materialen een verschillende emissiviteit ε_{λ} hebben, die sterk van de golflengte van de uitgezonden elektromagnetische straling kan afhangen en de verhouding weergeeft van de in werkelijkheid uitgestraalde energie t.o.v. de energie uitgestraald door een ideale zwarte straler bij dezelfde temperatuur. De golflengte waarbij het maximaal vermogen wordt uitgestraald kan eenvoudig berekend worden op basis van de zogeheten verschuivingswet van Wien : $\lambda_{max} = b/T$, waarin b de constante van Wien, met name 2.89777×10^{-3} Km. Het is dus zo dat objecten op een typische temperatuur van 20 °C of 293.15 K preferentieel straling in het thermisch infrarode (TIR) deel van het elektromagnetisch spectrum uitzenden, bvb. $\lambda_{max}(20^{\circ}\text{C}) = 9.88 \mu\text{m}$.

¹⁴ 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).



Figuur 38: Schematische voorstelling van het elektromagnetisch spectrum. (Bron: http://nl.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisch_spectrum)

Het EM spectrum is hierboven in Figuur 38 afgebeeld. Door de aanwezige waterdamp en broeikasgassen in de aardatmosfeer wordt een deel van deze IR straling geabsorbeerd (zie Figuur 39). Het is echter zo dat voor een aantal “banden” de absorptie relatief beperkt is, en de atmosfeer transparant¹⁵ is voor IR straling.



Figuur 39: Absorptie karakteristiek van de aardatmosfeer het infrarode deel van het EM spectrum. De grafiek toont het percentage van de IR straling dat bij een bepaalde golflengte door de atmosfeer wordt doorgelaten. De verschillende absorptiebanden, veroorzaakt voornamelijk door waterdamp (H₂O) en het broeikasgas CO₂ zijn onderaan weergegeven. (Bron: <http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared>)

¹⁵ Uiteraard in de afwezigheid van wolken...

Eén van deze banden is de zogeheten TIR (Thermisch Infrarood) band tussen 8 en 14 μm . We kunnen met andere woorden deze TIR straling vanuit de ruimte waarnemen door middel van satellieten. Er zijn momenteel een hele reeks TIR sensoren in omloop allemaal met verschillende ruimtelijke resolutie en terugkeer frequentie. Gaande van een resolutie van 4-5 km met een opname frequentie van 15 minuten (SEVIRI¹⁶ instrument aan boord de Meteosat Second Generation satelliet (MSG)), tot een ruimtelijke resolutie van 60 m met een terugkeer periode van een tweetal weken (Landsat 7 ETM+).

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 echter wel een inschatting doen van de temperatuur van het oppervlak dat de straling uitzond. Hier gaat echter wel een uitgebreide verwerkingsketen aan vooraf met sensor kalibratie en correcties voor de aanwezige waterdamp in de atmosfeer en dus bijhorende absorptie van de infrarode straling. 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. We zullen hier niet dieper op ingaan in dit rapport, maar het is niet onbelangrijk dit even te vermelden.

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 reeds kort geïntroduceerd. Men kan heel duidelijk zien dat het kennen van de radiantie B_λ alleen niet voldoende is voor het terugrekenen naar de temperatuur T . Men dient rekening te houden met de emissiviteit, een materiaal constante die kan variëren tussen 0 en 1. Metalen hebben typisch een heel lage emissiviteit, zeker wanneer het gaat om gepolierde oppervlakken. Typische constructie materialen (beton, baksteen, ...) hebben een emissiviteit tussen de 0.80 en 0.95. Niettegenstaande het feit dat de emissiviteit van heel wat materialen goed gekend¹⁷ is, is het een factor van grote onzekerheid in het afleiden van de oppervlakte temperatuur uit TIR satelliet data. Een fout van een paar procenten in de emissiviteit kan al gauw een aantal graden verschil in temperatuur opleveren.

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). Hieruit bleek dat het zogeheten Temperature-Emissivity-Separation algoritme (TES) (Gillespie et al., 1999) de oppervlakte temperatuur 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 Radiometer¹⁸ (kortweg ASTER, <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>) aan boord van de Amerikaanse EOS-Terra satelliet, gelanceerd in 1999. Terra is een polaire satelliet en heeft een terugkeer periode van 16 dagen, waarin het volledige aardoppervlak in beeld wordt gebracht. ASTER beschikt effectief over 5 spectrale banden in het thermisch infrarode deel van het spectrum en daardoor kan men het TES algoritme toepassen op die data. De ruimtelijke resolutie van de thermische banden van ASTER bedraagt 90 m.

¹⁶ Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI), zie: (Aminou et al., 2002, 1997)

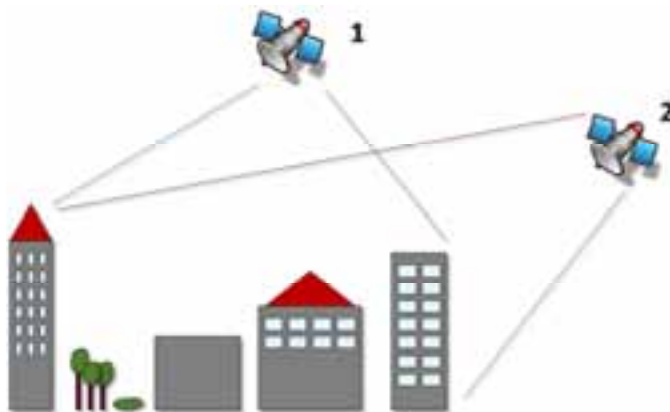
¹⁷ <http://www.icess.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>, <http://speclib.jpl.nasa.gov/>

¹⁸ <http://asterweb.jpl.nasa.gov>

4.1.2. EFFECT VAN GEOMETRIE EN SCHAAL OP DE OPPERVLAKTE TEMPERATUUR

Als tweede inleidend punt dienen we te vermelden dat de stedelijke geometrie een belangrijk gegeven is in het interpreteren van de oppervlakte temperatuur. Het is immers niet altijd duidelijk van welke oppervlakken we exact de temperatuur “zien”. Door de heterogeniteit van het stedelijk weefsel zullen we afhankelijk van de observatiehoek andere oppervlakken (muur, dak, grond) in het vizier van de sensor krijgen.

Onderstaande Figuur 40 illustreert dit, weliswaar karikaturaal. Satelliet sensor 1 zal in de illustratie meer thermische straling afkomstig van het oppervlak “zien” dan satelliet 2, die meer straling afkomstig van de gebouwenwanden zal observeren. De verschillen in afgeleide temperatuur kunnen makkelijk oplopen tot een 4-5 °C, afhankelijk van de observatiehoek en de stand van de zon (Lagouarde et al., 2004). Hierop dieper ingaan zou ons binnen het kader van deze studie te ver leiden, maar het illustreert wel dat de afgeleide oppervlakte temperatuur die we zullen gebruiken wegens de 90 m ruimtelijke resolutie een amalgaam van verschillende oppervlakken kan bevatten die wegens een verschillende oriëntatie in dezelfde pixel elk op een andere manier bijdragen tot de oppervlakte temperatuur van die beschouwde pixel. De illustratie geeft dus onrechtstreeks ook aan dat we in een oppervlakte temperatuurbeeld niet altijd het werkelijke oppervlak zien, maar veelal het effect van daken die bv. door gebruik van roofing materiaal (dat sterk opwarmt) duidelijk zichtbaar zijn in de beelden.



Figuur 40: Illustratie van het effect van de waarnemingshoek voor satelliet gebaseerde observaties van oppervlakte temperatuur.

In onderstaande paragrafen beschrijven we de ASTER data die we voor Antwerpen hebben opgevraagd, gevolgd door een downscaling naar 30 m aan de hand van Landsat vegetatiebeelden. We presenteren tenslotte een analyse van de thermische patronen en het surface urban heat island dat voor Antwerpen wordt waargenomen. In een laatste deel vertalen we deze oppervlakte temperatuurbeelden verder naar een inschatting van potentiële hittestress overdag.

4.2. BESCHRIJVING OPGEVRAAGDE ASTER BEELDEN

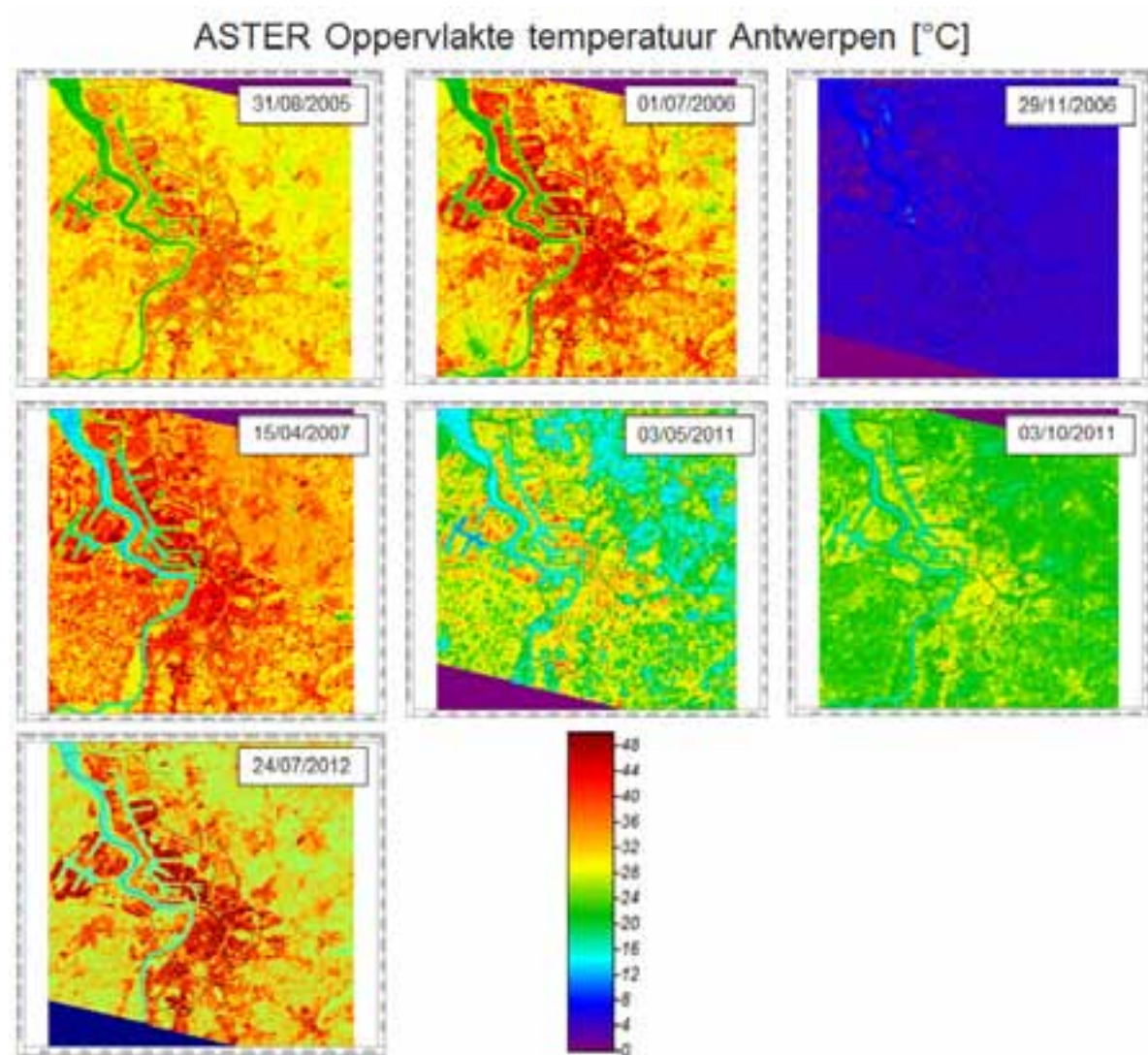
4.2.1. KWALITATIEVE BESCHRIJVING

Via het Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC) van de “Japan Space Systems” organisatie (<http://gds.aster.ersdac.jspacsystems.or.jp>) hebben we voor de periode 2000-2013 een 7-tal nagenoeg wolkenvrije beelden geselecteerd. Concreet gaat het om het officiële AST2B3 “Surface Kinetic Temperature” product, dat het resultaat is van het TES algoritme toegepast op de ASTER data. Onderstaande Tabel 10 geeft aan om welke beelden het gaat. We zien dat we enkel beelden overdag hebben kunnen vinden, wat enigszins jammer is gezien er zeker verschillen kunnen optreden tussen oppervlakte temperaturen overdag en ’s nachts. Overdag zullen bijvoorbeeld materialen met een lage warmtecapaciteit (bv. roofing materiaal) relatief snel opwarmen en hoge oppervlaktetemperaturen vertonen, maar door een lage warmtecapaciteit zullen die dan ’s nachts ook snel afkoelen. Voor de meeste beelden is de wolkenbedekking beperkt tot een paar procenten van de totale scene.

Tabel 10: Tabel met de aangekochte ASTER beelden boven Antwerpen. De linker kolom geeft het identificatienummer van de scene, waarmee het beeld makkelijk teruggevonden kan worden op de zoekmachine <http://ims.aster.ersdac.jspacsystems.or.jp/ims/html/MainMenu/MainMenu.html>.

ASTER GDS GRANULE ID	CLOUD COVER	DAY/ NIGHT	CENTER LATITUDE	CENTER LONGITUDE	ACQ. START (UTC)
ASTL1A 0508311050380509030215	1%	Day	51.1008	4.3125	2005-08-31T10:50:38Z
ASTL1A 0607011051090607040278	1%	Day	51.1026	4.3084	2006-07-01T10:51:09Z
ASTL1A 0611291056550612030287	1%	Day	51.3928	4.4507	2006-11-29T10:56:55Z
ASTL1A 0704151051430704180270	1%	Day	51.1049	4.2929	2007-04-15T10:51:43Z
ASTL1A 1105031057231105040245	1%	Day	51.4007	4.5001	2011-05-03T10:57:23Z
ASTL1A 1110031050541110052587	2%	Day	51.0976	4.3445	2011-10-03T10:50:54Z
ASTL1A 1207241057201207250294	1%	Day	51.3988	4.5116	2012-07-24T10:57:20Z

De beelden werden na aankoop geherprojecteerd naar het Belgische Lambert 72 coördinaten systeem en afgesneden op een gemeenschappelijk grid boven Antwerpen. In Figuur 41 zijn verder een aantal quicklooks opgenomen. Door de overvliegtijden van de EOS-Terra satelliet zijn alle beelden rond 11 UT genomen, wat in de zomer overeenkomt met 1 uur lokale tijd in de namiddag.



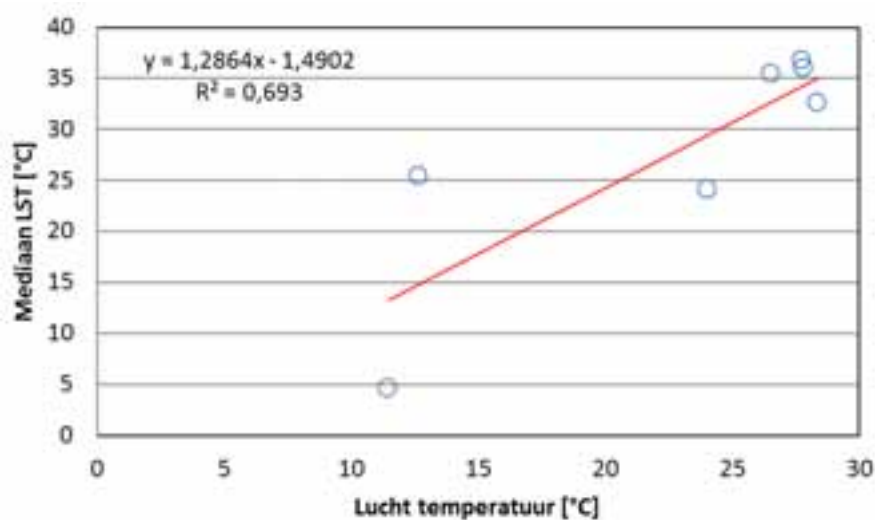
Figuur 41: Enkele 'quicklooks' van de ASTER oppervlakte temperatuurdata. Alle opnames zijn op dezelfde schaal afgebeeld (onderaan), eenheden in °C.

In onderstaande Tabel 11 hebben we de grootschalige meteorologische condities opgezocht die overeenkomen met het moment van opname van de beelden. De tabel specificeert de luchttemperatuur, relatieve vochtigheid, windrichting en snelheid; parameters die kunnen helpen bij de interpretatie van de oppervlakte temperatuurbeelden.

Tabel 11: In-situ meteorologische condities voor de ASTER beelden. Bron : <http://meteo.infospace.ru/>, station Deurne (51°12'NB, 4°28'OL) voor Antwerp – Belgium. De tijdstippen voor de LST opnames zijn in lokale tijd weergegeven. Het tijdstip van de waarnemingen afkomstig van de vermelde site is telkens 13:00 lokale tijd.

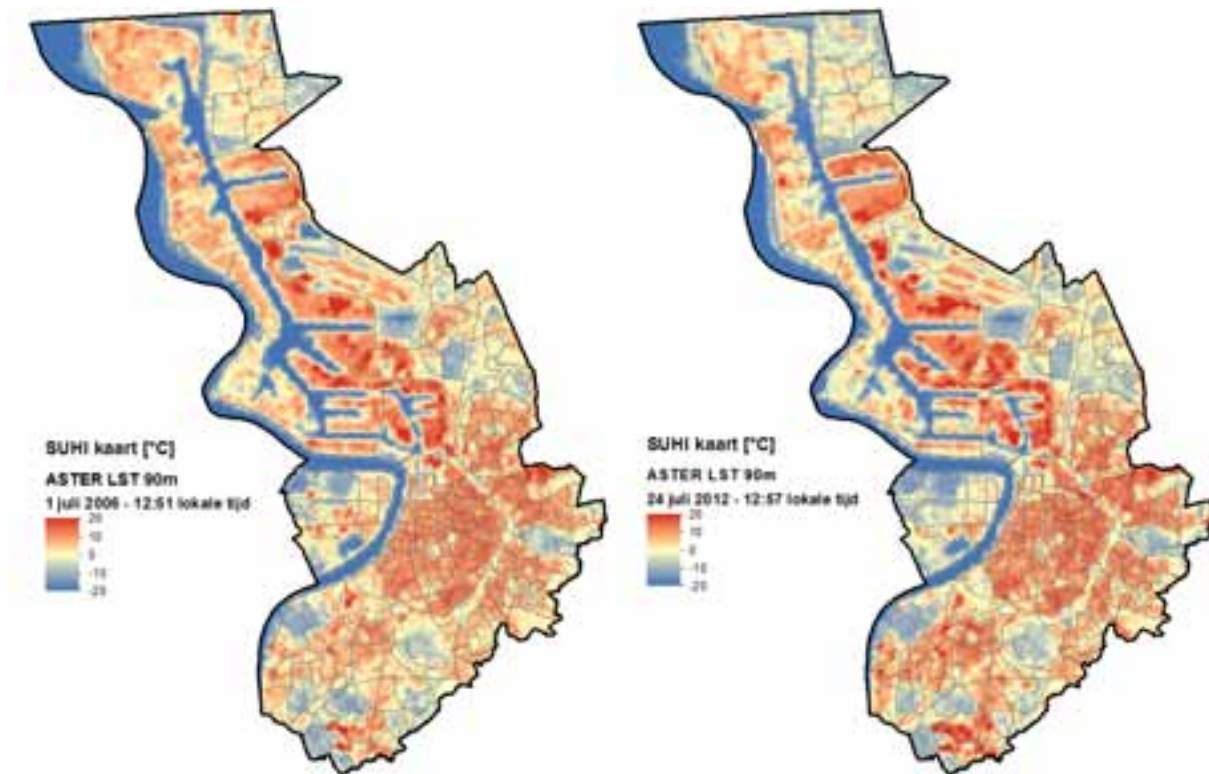
Datum opname (Lokale tijd)	Mediaan LST [°C]	Lucht temperatuur [°C]	Relatieve vochtigheid [%]	Windrichting [°]	Windsnelheid [m/s]
2005-08-31 12:50	32.4 °C	28.4 °C	62 %	120 ° (ZO)	3 m/s
2006-07-01 12:51	35.9 °C	27.9 °C	48 %	70 ° (O)	2 m/s
2006-11-29 11:57	4.5 °C	11.5 °C	77 %	250 ° (W)	3 m/s
2007-04-15 12:51	35.3 °C	26.6 °C	49 %	130 ° (ZO)	2 m/s
2011-05-03 12:57	25.4 °C	12.7 °C	24 %	70 ° (O)	6 m/s
2011-10-03 12:51	24.0 °C	24.1 °C	49 %	230° (ZW)	4 m/s
2012-07-24 12:57	36.6 °C	27.8 °C	29 %	90 ° (O)	4 m/s

Wat eerst en vooral opvalt is dat de meeste beelden zijn genomen bij situaties waarbij de wind uit oostelijke richting komt (hoewel (zuid)westelijk de dominante windrichting is in België). Dit is consistent gezien onder dergelijke condities de grootste kans op heldere hemel (en dus mogelijkheid tot satelliet opname) zich voordoet. Voor de meeste beelden is de relatieve vochtigheid betrekkelijk laag (<50 %) met een relatief lage windsnelheid (2-4 m/s). We zien voorts dat er wel enige correlatie is tussen de luchttemperatuur en de oppervlakte temperatuur in die zin dat voor de beelden met de hoogste oppervlakte temperaturen, de luchttemperatuur ook het hoogst is. Deze correlatie werd van naderbij bekeken in onderstaande Figuur 42, waar we merken dat er tussen beide effectief een lineaire relatie is met een correlatie coëfficiënt van $R^2 = 0.69$. Dit is niet extreem hoog, en we zien ook enkele punten die sterk afwijken van de rechte. Dit toont nogmaals ons punt aan dat er wel een verband bestaat tussen de oppervlakte temperatuur en de luchttemperatuur, maar dat we toch een duidelijk onderscheid moeten maken tussen beide. Op 3 mei 2011 bijvoorbeeld zien we dat de oppervlaktetemperaturen oplopen tot 25°C, terwijl de luchttemperatuur erg laag blijft door een schrale oostenwind. Er is op die dag dus wel sprake van een uitgesproken SUHI, maar allicht niet van een CLUHI.



Figuur 42: Correlatie analyse tussen de gemeten luchttemperatuur (zie Tabel 11) en de mediaan voor elk oppervlakte temperatuurbeeld (per beeld een datapunt). De correlatie tussen beiden is uitgedrukt in de R^2 coëfficiënt en het lineaire verband door de rechte in rood.

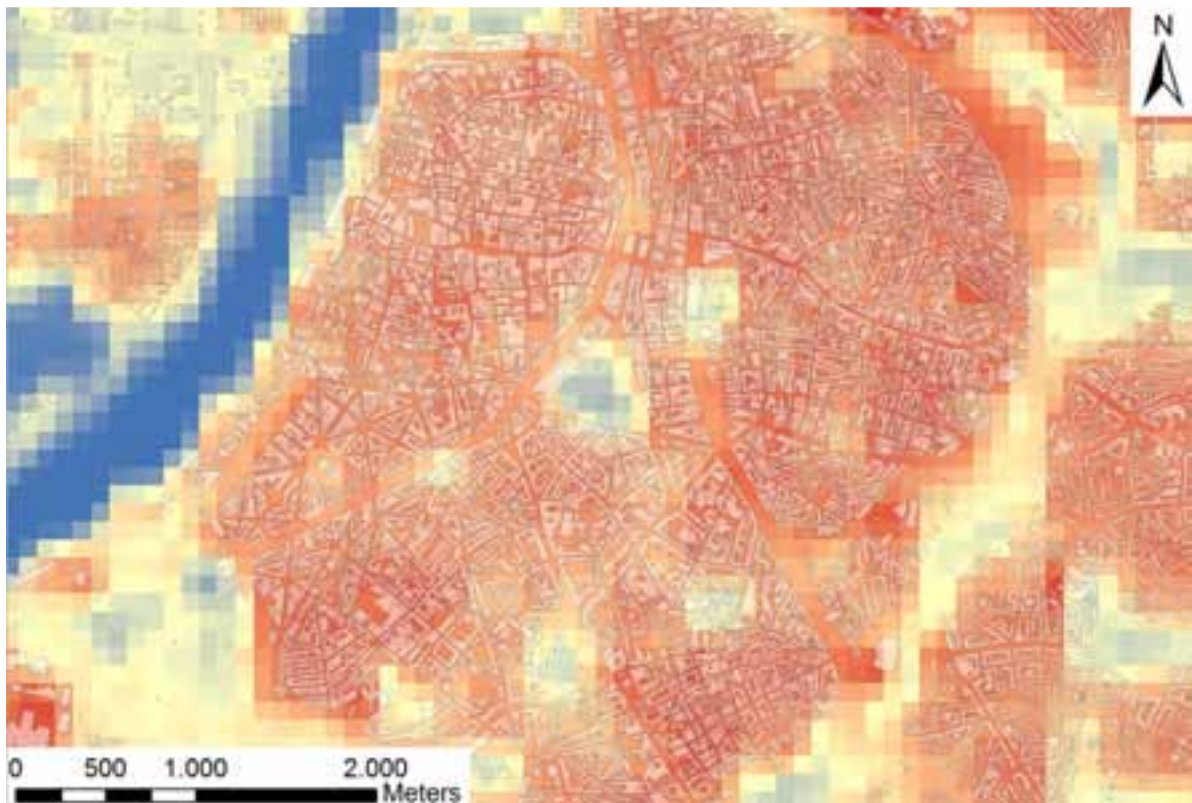
Om de hotspots iets beter te kunnen bestuderen hebben we de oppervlakte temperatuurkaarten genormeerd t.o.v. de mediaan temperatuur van het beeld. Met andere woorden de temperatuur in elke pixel van de onderstaande kaarten geeft aan hoeveel warmer of kouder elke pixel is t.o.v. de “gemiddelde” temperatuur van het hele beeld. Hierdoor brengen de kaarten de intensiteit van het SUHI effect in beeld en worden ze onderling beter vergelijkbaar.



Figuur 43: Genormeerde SUHI kaarten voor de twee ASTER LST beelden met het meest uitgesproken SUHI effect. De kaarten geven telkens het temperatuurverschil in de pixel t.o.v. de mediaan temperatuur van het beeld.

De quicklooks van Figuur 41 en de genormaliseerde SUHI kaarten van Figuur 43 brengen duidelijk het oppervlakte warmte eiland of SUHI van Antwerpen in kaart. We zien op het eerste zicht ook enkele “hotspots” opduiken, voornamelijk in het havengebied (bv. de terreinen rond het Albertdok en het Churchilldok, het stuk industrieterrein aan de Noorderlaan ten zuiden van de Tijsmanstunnel, het industrieterrein van Deurne tegen de oostelijke grens van Antwerpen en enkele terreinen in Wilrijk langs de Boomsesteenweg in het zuiden). Deze locaties worden stevast gekenmerkt door grote, open industriële terreinen, met asfalt (of steenslag/kolen) als bodembedekking. De dakbedekking van grote fabriekshallen bestaat veelal uit donker, weinig reflecterend roofing materiaal dat heel sterk kan opwarmen en dus voor hoge oppervlaktetemperaturen kan zorgen. Bij de grote container terminals kunnen ook het grote aantal metalen containers een belangrijke oorzaak zijn voor de verhoogde oppervlaktetemperatuur, zoals gezien vanuit de ruimte. Het belang van die hotspots is echter relatief. Dergelijke industriële sites warmen weliswaar snel op, maar kunnen ook snel afkoelen en het blijft uiteraard zo dat bij grote industriële complexen we voornamelijk de dak-temperatuur zien vanuit de ruimte. Desalniettemin zal bij een grote geasfalteerde vlakte, typisch voor industrie gebied, de hogere oppervlakte temperaturen aanleiding geven tot een verhoogde stralingsbelasting overdag.

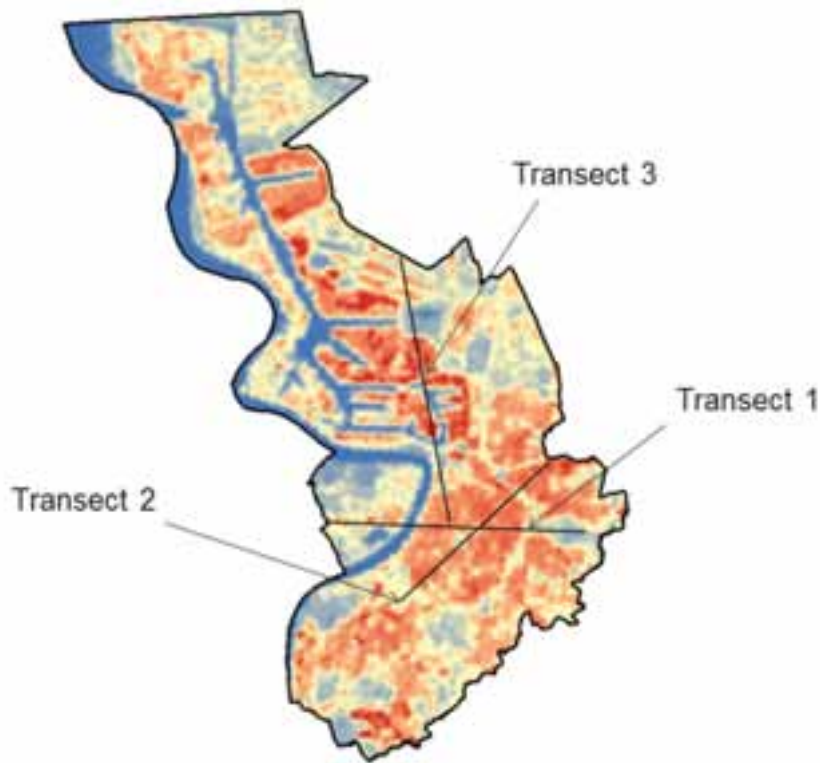
Om het centrum van Antwerpen in meer detail te bekijken is op onderstaand beeld ingezoomd op de binnenstad. Het beeld laat duidelijk zien dat de Antwerpse binnenstad in feite één grote hotspot is, enkel onderbroken door plaatsen met veel groen of water. Het stadspark komt duidelijk naar voren als koelste locatie binnen het centrum. Ook de zoo en de grotere parken in het zuiden van de stad zijn frissere plaatsen wat betreft de oppervlaktetemperatuur. De warmste plaatsen vinden we in het historisch centrum tegen de Schelde, het noorden en oosten van de stad waar de huizen dicht op elkaar staan en er weinig groen is. Ook de buurt rond de Bell in het zuiden komt als erg warm naar voren. Ook de rol van water voor het oppervlakte hitte-eiland is heel nadrukkelijk aanwezig. De Schelde en de havendokken zijn de koudste plaatsen qua oppervlaktetemperatuur.



Figuur 44: Detail van de SUHI kaart van 24 juli 2012.

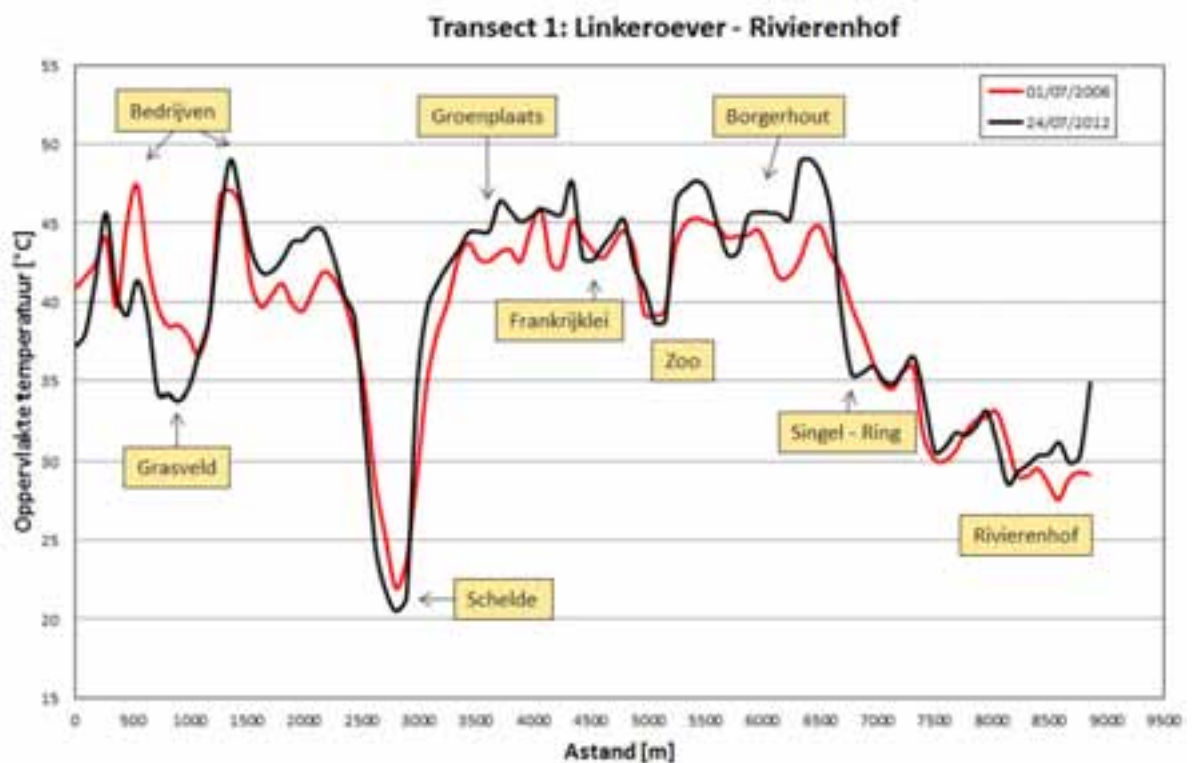
4.2.2. ANALYSE VAN ENKELE TRANSECTEN

Het lijkt ons voorts interessant om enkele transecten van naderbij te bestuderen om zo een gevoel te krijgen van welke verschillen inzake oppervlakte temperatuur nu werkelijk aanwezig zijn in het stedelijk weefsel. We bekijken een aantal transecten voor twee ASTER zomerbeelden die we hebben opgevraagd (2006-07-01 en 2012-07-24), weergegeven op onderstaande figuur.



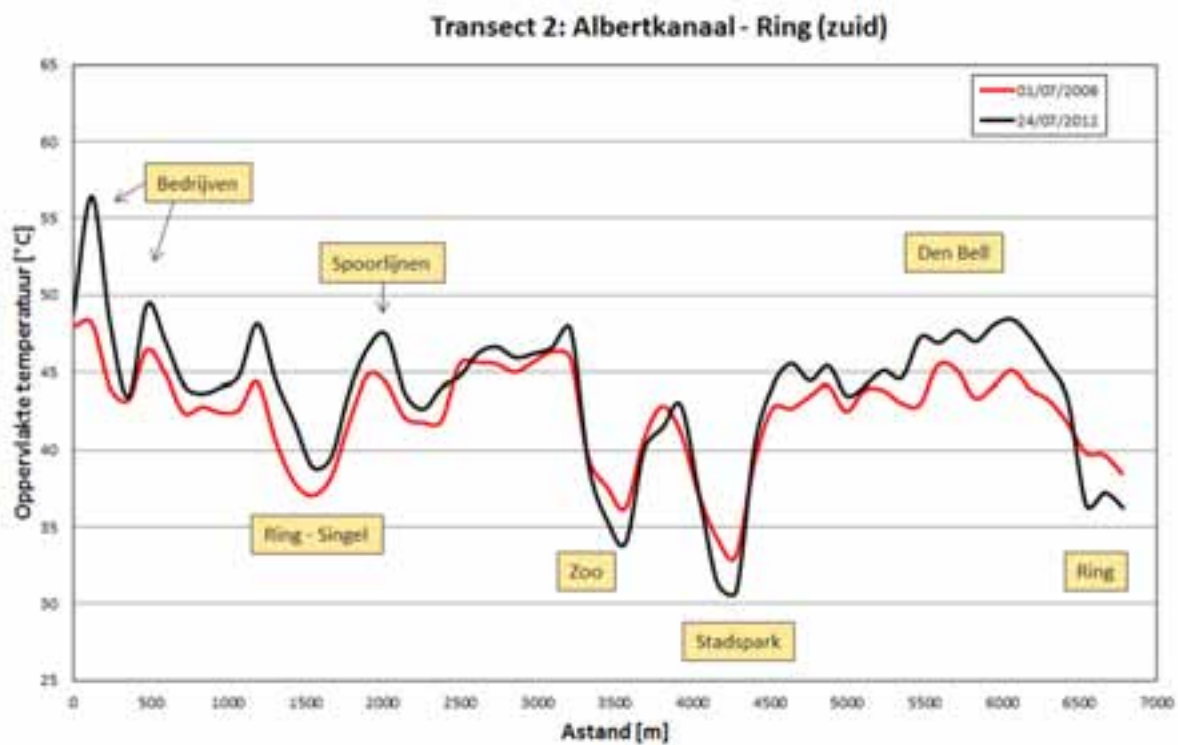
Figuur 45: Locatie van de gekozen transecten.

- **Transect 1** : Linkeroever – historisch centrum – Zoo – Rivierenhof, afgebeeld in Figuur x.
- **Transect 2** : Albertkanaal – Zoo – Stadspark – Ring (zuid), afgebeeld in Figuur x.
- **Transect 3** : Havenweg – dokken – historisch centrum, afgebeeld in Figuur x.



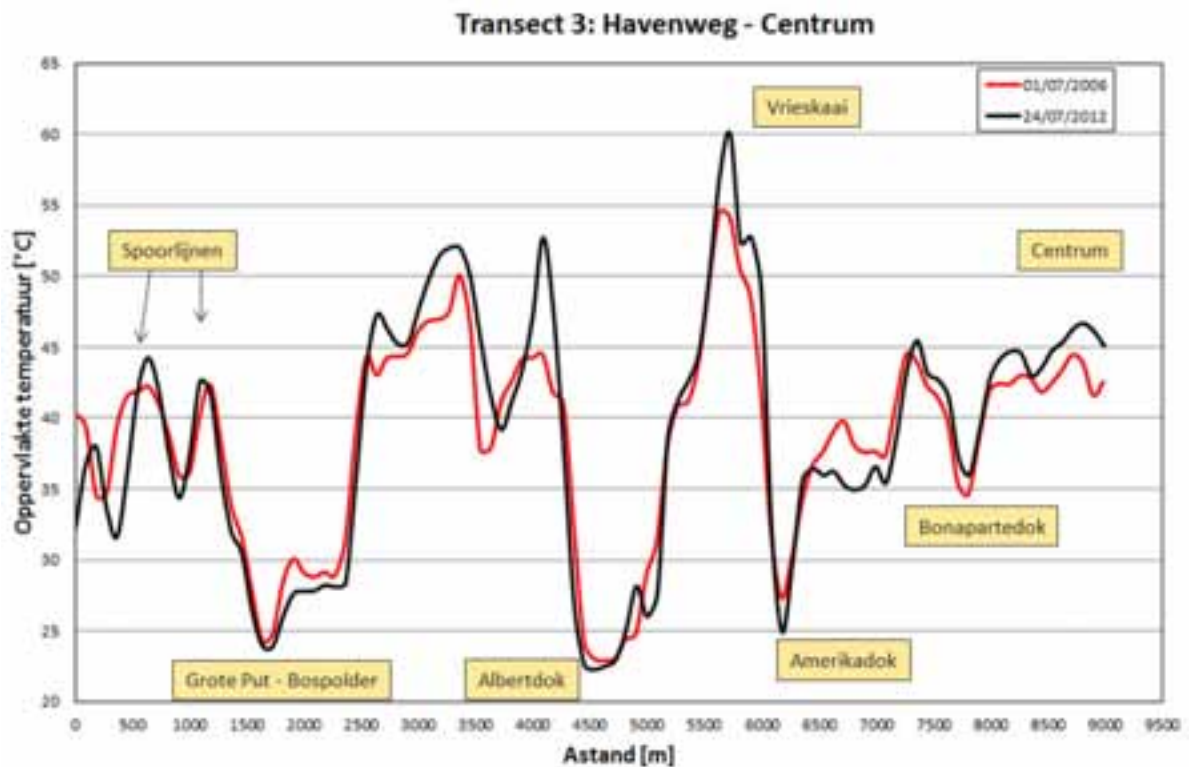
Figuur 46: Transect 1 : Linkeroever – historisch centrum – Zoo – Rivierenhof.

In bovenstaande figuur is mooi te zien hoe sterk de oppervlakte temperaturen op korte afstand kunnen variëren. We zien enkele duidelijke pieken voor industriële gebouwen op Linkeroever, terwijl de temperatuur op een tussenliggend grasveldje meer dan 10 °C koeler is. Het Scheldewater is duidelijk veel kouder dan enig welke andere plek in de zomer. In de stad zijn de verschillen beperkt tot enkele °C, waarbij toch een klein effect valt te noteren voor de Frankrijklei door de aanwezige bomen, maar je hebt duidelijk een groter park zoals de Zoo nodig voor een meer significant effect (>5°C). Ook in Borgerhout loopt de temperatuur hoog op, waarna de temperaturen scherp dalen buiten het centrum door de aanwezige vegetatie en het water in het Rivierenhof, waar het toch maar liefst 15°C koeler is dan in het stadcentrum.



Figuur 47: Transect 2 : Albertkanaal – Zoo – Stadspark – Ring (zuid).

Op het Albertkanaal –Ring(zuid) transect van Figuur 47 beginnen we aan de industrieterreinen van Deurne ten zuiden van het kanaal, die opnieuw een erg hoge oppervlaktetemperatuur hebben. De ring en singel zijn opnieuw iets koeler door de aanwezige vegetatie. In de stad zijn de verschillen andermaal beperkt, we zien dat het stadspark nog iets koeler is dan de Zoo, allicht door een grotere hoeveelheid aan open water. We verwachten dat de watertemperatuur voor deze zomerbeelden inderdaad rond de 30 °C is, terwijl de oppervlakte temperatuur van de omgeving op dat moment van de dag duidelijk een 15-tal graden hoger is.



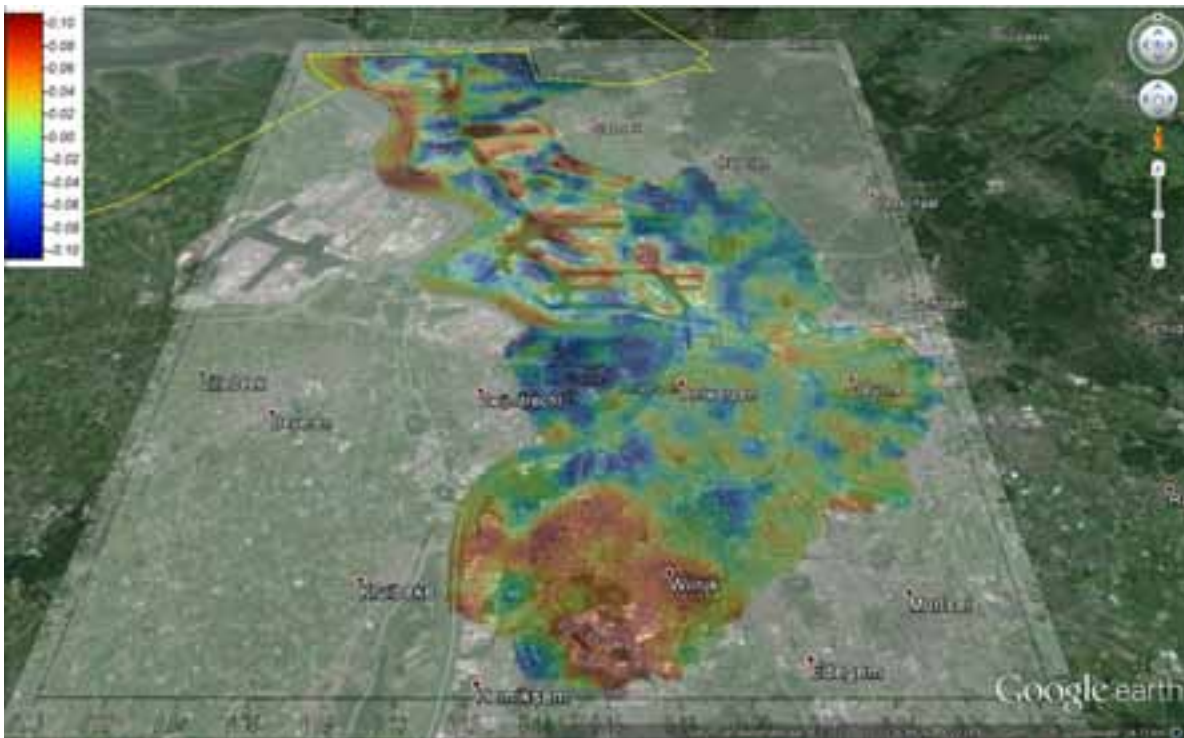
Figuur 48: Transect 3 : Havenweg – dokken – historisch centrum.

Transect 3 toont de meest uitgesproken oppervlakte temperatuurverschillen in Antwerpen, die zich duidelijk voordoen in het havengebied. Hier is er een enorm contrast tussen de dokken, gevuld met koud Scheldewater, en de terreinen errond, die geasfalteerd zijn en waar de fabriekshallen een donkere dakbedekking hebben. Dit soort omgeving warmt erg snel op tot enorm hoge temperaturen ($>50^{\circ}\text{C}$), maar het verliest zijn warmte ook weer heel snel bij het ondergaan van de zon. De temperaturen zijn er zelfs een 10-tal graden hoger dan in het centrum van Antwerpen.

4.2.3. DETECTIE VAN TRENDS IN DE OPPERVLAKTE TEMPERATUREN

Gezien we met dit beeldarchief toch beschikken over een dataset gespreid over zeven jaar, leek het ons verder interessant te gaan kijken of er bepaalde trends tot uiting komen in de data. Met andere woorden zijn er duidelijk nieuwe “hotspots” te bespeuren, of zijn er misschien hotspots verdwenen. Op zich is een dergelijke trendanalyse niet eenvoudig gezien de beelden onder verschillende omstandigheden genomen zijn. Zowel de stand van de zon, het bodemvocht, de grootschalige luchttemperatuur, windsnelheid, e.d. spelen allemaal een rol voor de oppervlakte temperatuur. Om effecten ten gevolg van ruimtelijke ontwikkelingen zoals nieuwe bebouwing, verdwijnen/aanplanten van groen te detecteren dienen we zeker te zijn dat we de eerst genoemde effecten uit de data halen. Op zich zou dergelijke oefening een volledige studie op zich kunnen zijn, maar we doen dit hier op een eenvoudige manier door te kijken naar de verschillen tussen twee SUHI kaarten die sterk op elkaar lijken en in ongeveer dezelfde omstandigheden zijn opgenomen, met name de kaarten van 1 juli 2006 en 24 juli 2012. Om beide kaarten met elkaar te vergelijken worden de absolute temperatuurverschillen genormaliseerd (herschaald van 0-1). Vervolgens

kunnen we het verschil maken tussen beide kaarten, hetgeen een indicatie geeft voor de ruimtelijke trends wat betreft de oppervlakte temperatuur gedurende deze 6 jaar.



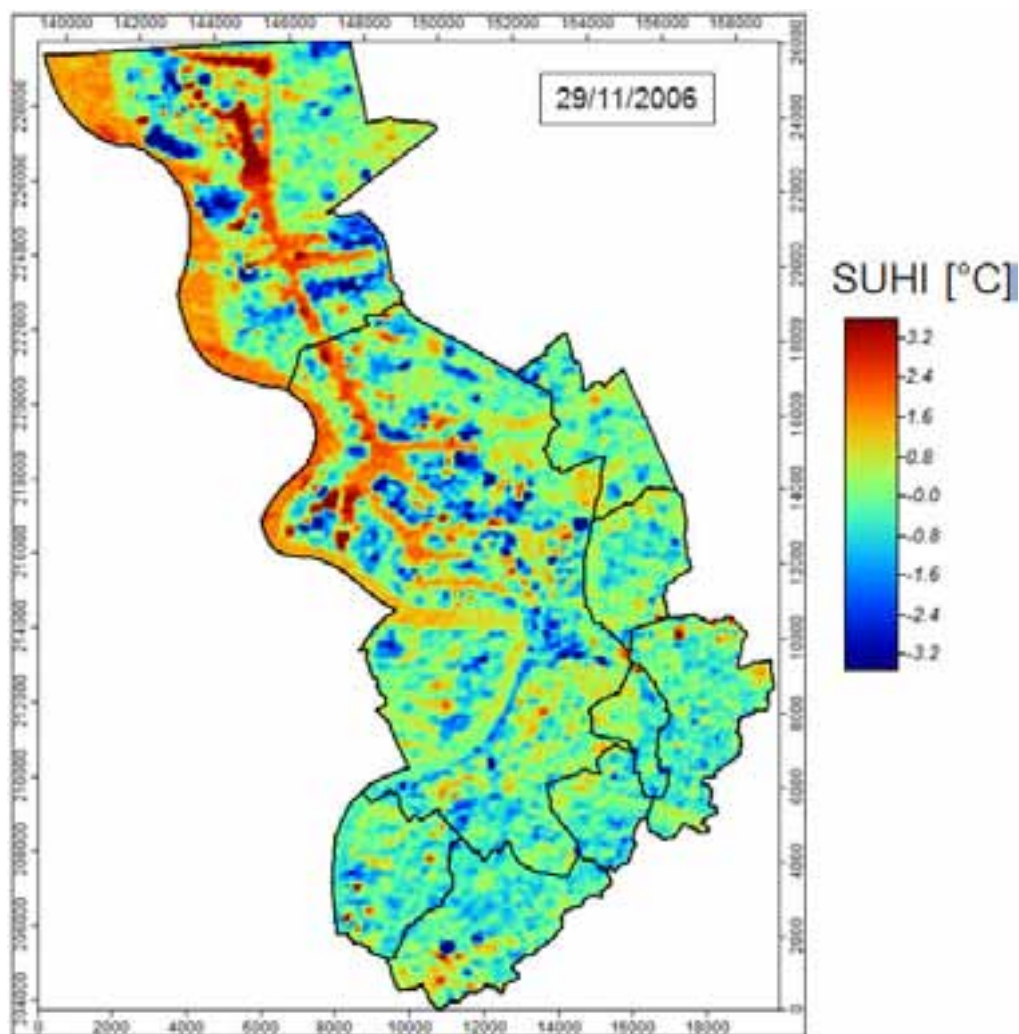
Figuur 49: Google earth overlay van de SUHI verschilkaart tussen 2006 en 2012 op basis van de genormaliseerde SUHI kaarten van 1 juli 2006 en 24 juli 2012.

Het eerste dat dient vermeld te worden bij bovenstaande figuur is dat de verschillen erg klein zijn (<10%), er is in deze periode van 6 jaar dus niet zo veel veranderd aan de intensiteit en het patroon van het oppervlakte hitte-eiland in Antwerpen. Het meest opvallende verschil is te zien in het zuiden van Antwerpen, waar Wilrijk en Hoboken duidelijk warmer zijn geworden door toenemende verstedelijking/industrialisatie. In het centrum van de stad zijn de verschillen erg klein en is er geen duidelijke trend aanwezig. Linkeroever is het meest ‘verkoeld’ in deze periode, allicht door de groei van de aanwezige vegetatie. In het havengebied zien we een afwisseling van warmer geworden en kouder geworden gebieden, allicht door een verschuiving/verandering van de activiteiten. Ook de meer beboste gebieden in het noorden van Antwerpen lijken wat te zijn verkoeld, allicht door het aangroeien van de vegetatie. Algemeen kunnen we echter wel stellen dat voor het overgrote deel van het oppervlak, de verschillende oppervlakte temperatuurbeelden na normalisatie een relatief gelijkaardig patroon vertonen gedurende de periode 2006 – 2012.

4.2.4. SUHI VOOR EEN WINTER-SITUATIE

Gezien het beeld van 29 november 2006 het enige beeld is dat we tijdens de winterperiode hebben kunnen opvragen is het niet oninteressant om daar toch even kort bij stil te staan vooraleer we verder gaan met de bespreking van de zomerbeelden. We hebben dit afgebeeld in onderstaande Figuur 50. We zien al direct dat de temperatuurvariatie relatief klein is in vergelijking met de zomerbeelden. Waar de verschillen daar makkelijk kunnen oplopen tot meer dan 30°C, blijven ze hier beperkt tot een 6-tal graden. Wel komen de wateroppervlakken als zijnde een 3-tal graden

warmer dan de omgeving sterk tot uiting. De koudste locaties in dit beeld zijn de industriële terreinen in de haven, die in de zomer net het warmst zijn. De onverwarmde en slecht geïsoleerde fabrieksgebouwen koelen er erg sterk af 's nachts, en de zon is in deze tijd van het jaar niet krachtig genoeg om ze terug op te warmen. In alle geval kunnen we stellen dat er voor dergelijke wintersituatie inzake oppervlakte temperatuur weinig warmte eiland effect te bespeuren valt in de binnenstad.



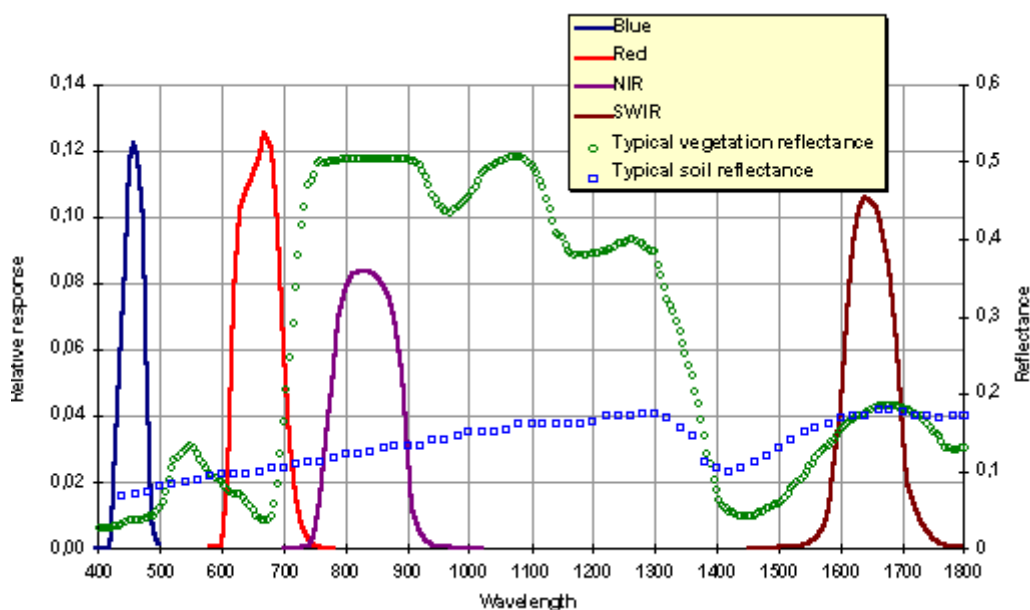
Figuur 50: SUHI kaart voor een winter situatie op basis van het ASTER LST beeld van 2006-11-29.

4.3. DOWNSCALING SUHI KAART NAAR 30M

In navolging van de studie voor Gent werd besloten om een verhoging van de ruimtelijke resolutie van de SUHI kaarten na te streven. Het is wel belangrijk om te vermelden dat we door deze 'downscaling' techniek toe te passen een additionele fout zullen toevoegen aan de originele kaart. De originele beelden met een resolutie van 90 m zijn reeds relatief gedetailleerd en bieden de mogelijkheid om op basis van de ter beschikking gestelde GIS informatie de geobserveerde LST patronen te interpreteren. Bij een downscaling naar hogere ruimtelijke resolutie dient dus te worden afgewogen waarvoor de beelden uiteindelijk gebruikt gaan worden, en dient er bij de interpretatie rekening gehouden te worden met de additionele fouten.

4.3.1. METHODIEK

Voor de downscaling van de SUHI kaarten hebben we besloten om enkel en alleen op basis van remote sensing observaties te werken en maken we gebruik van Landsat NDVI data. De NDVI of Normalized Difference Vegetation Index 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 400 en 700 nm 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 infra-rood (NIR, golflengtes tussen 700 en 1100 nm) 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, celschade oplopen en afsterven.



Figuur 51: Typische spectrale reflectantie van Vegetatie (groene cirkels) en gewone grond (blauwe cirkels). In deze figuur zijn de banden van het SPOT-VEGETATION instrument weergegeven, de rode en NIR band van de TM/ETM+ instrumenten aan boord van Landsat zijn heel gelijk aardig (Rood : 0.63-0.69 μm , NIR : 0.76-0.90 μm). Bron: VITO (www.spot-vegetation.com).

Op basis van deze wetenschap kan men een eenvoudige parameter opstellen, de zogeheten NDVI, die we hierboven reeds aanhaalden. NDVI wordt relatief eenvoudig gedefinieerd als :

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

ofwel, zoals de naam zegt, het genormaliseerde verschil tussen de gemeten intensiteit van de gereflecteerde zonnestraling in het NIR deel van het EM spectrum (Band 4 voor Landsat TM/ETM+) en die in het visueel deel (typisch rood) van het spectrum (Band 3 voor Landsat TM/ETM+), zoals die door de sensor wordt waargenomen. Gezien deze grootte verder ook als verhouding gedefinieerd is, zullen een groot deel van de atmosferische correcties slechts tweede orde correcties zijn, waardoor we een relatief bevredigende inschatting kunnen doen van de NDVI puur en alleen op basis van de ruwe Landsat data.

Voor het Landsat instrument hebben deze spectrale banden een ruimtelijke resolutie van 30 m, exact de resolutie waarnaar we op zoek zijn voor de downscaling. We hebben bijgevolg gezocht naar bruikbare Landsat beelden voor Antwerpen in juli (de maand van de SUHI kaarten), jammer genoeg is er in de afgelopen 10 jaar slechts 1 bruikbaar beeld te vinden voor Antwerpen, met name op 16 juli 2006 (Figuur 52). We zullen de analyse dus met behulp van dit beeld uitvoeren. Op het beeld is de lagere NDVI boven het bebouwd gebied en in de haven duidelijk zichtbaar. We zien verder ook dat de resolutie van die aard is dat de grote wegen te onderscheiden zijn. Ook voor het stadscentrum zien we dat de resolutie van 30 m duidelijk meer ruimtelijk detail toont.



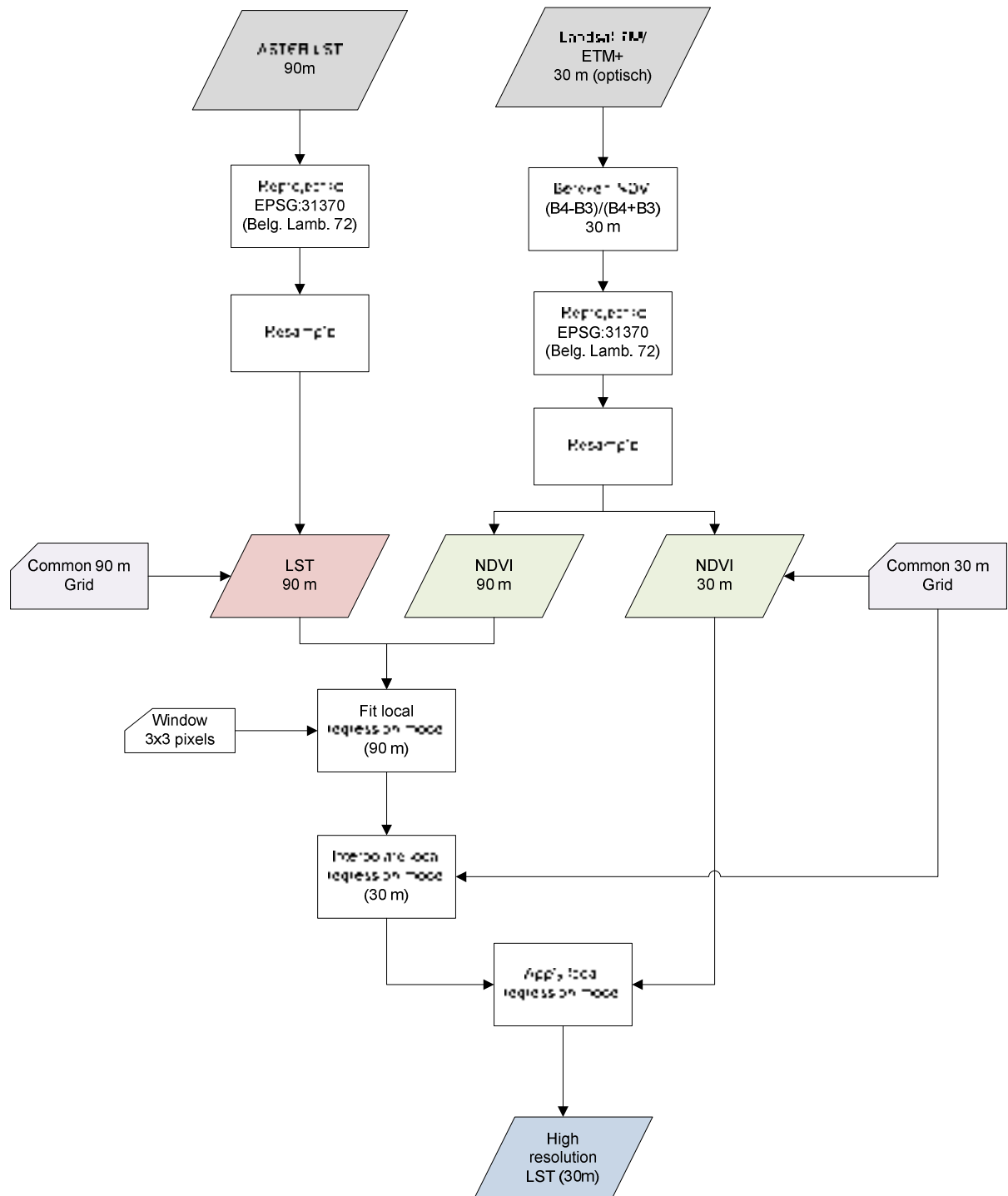
Figuur 52: Landsat NDVI beeld op 16 juli 2006. De kleurschaal gaat van paars (geen vegetatie) tot donkergroen (100% vegetatie).

De relatie tussen NDVI en oppervlakte temperatuur is uitgebreid onderzocht en beschreven. Vaak wordt NDVI dan ook toegepast in de downscaling van LST beelden (Stathopoulou and Cartalis,

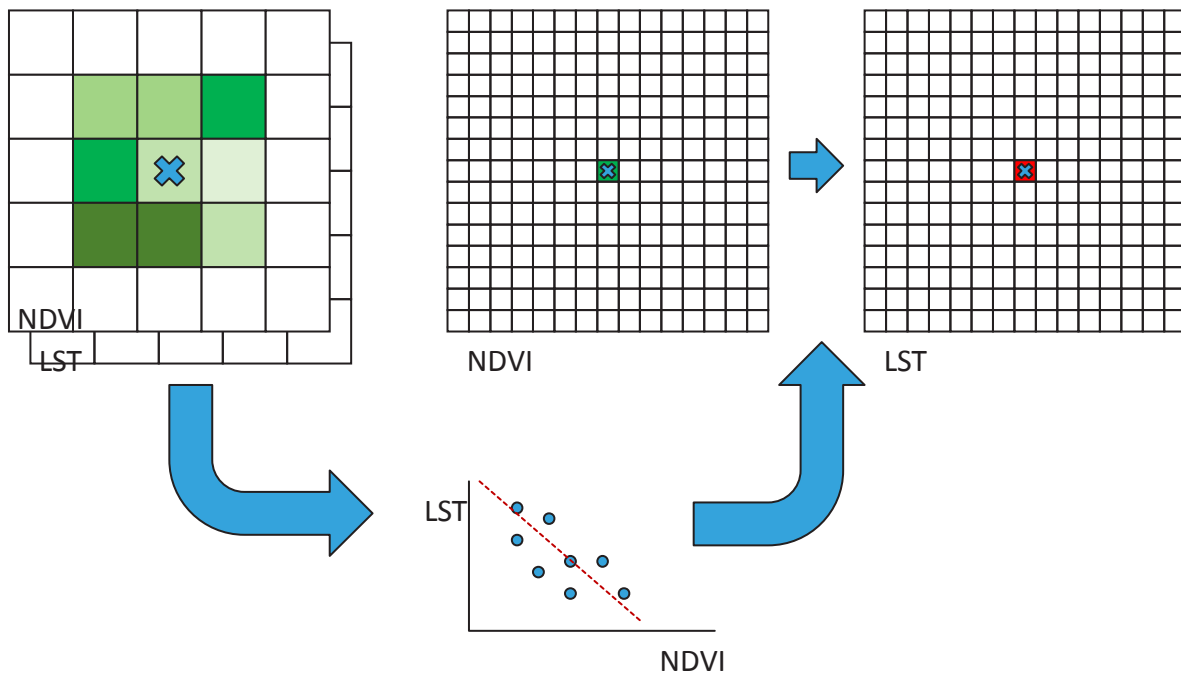
2009; Weng, 2004; Kustas et al., 2003; etc...). De algemene verwachting is dat zones met een hogere oppervlakte temperatuur een lagere NDVI zullen vertonen.

Het downscaling algoritme dat we implementeerden en toepasten voor deze studie is geïnspireerd op Zakšek en Oštir (2012). Volgens die methodiek proberen we een relatie door regressie analyse te vinden tussen de oppervlakte temperatuur en NDVI op basis van het lage resolutie LST beeld en een hersamplede versie van het NDVI beeld naar de resolutie van het LST beeld. De gevonden relatie passen we vervolgens toe op het hoge resolutie NDVI beeld om de finale 30 m LST opname te verkrijgen. Het is uiteraard zo dat we niet kunnen verwachten dat we een duidelijke globale éénduidige relatie vinden tussen het volledige LST beeld en het volledige NDVI beeld. We zullen dus voor elke pixel een lokale regressie doen op basis van de 3x3 omringende pixels. Een schematisch overzicht van de methode wordt gegeven in Figuur 53 en dit wordt grafisch voorgesteld hieronder in Figuur 54.

We beginnen met het ASTER LST beeld op 90 m resolutie en het her-samplede NDVI beeld naar 90m. Beide beelden werden georeferentieerd en geprojecteerd naar Belgische Lambert 72 coördinaten. Voor elke pixel van het 90 m beeld werd een lokale lineaire regressie uitgevoerd waarbij de 9 pixels van het 3x3 grid rond de desbetreffende pixel werden in rekening genomen. De overeenkomstige regressie parameters (helling en intercept) werden vervolgens toegepast op het hoge (30 m) resolutie NDVI beeld. Merk op dat we voor de regressie parameters, die slechts bepaald zijn op het lage resolutie grid (90 m) een eenvoudige bilineaire interpolatie doen naar het hoge resolutie grid.



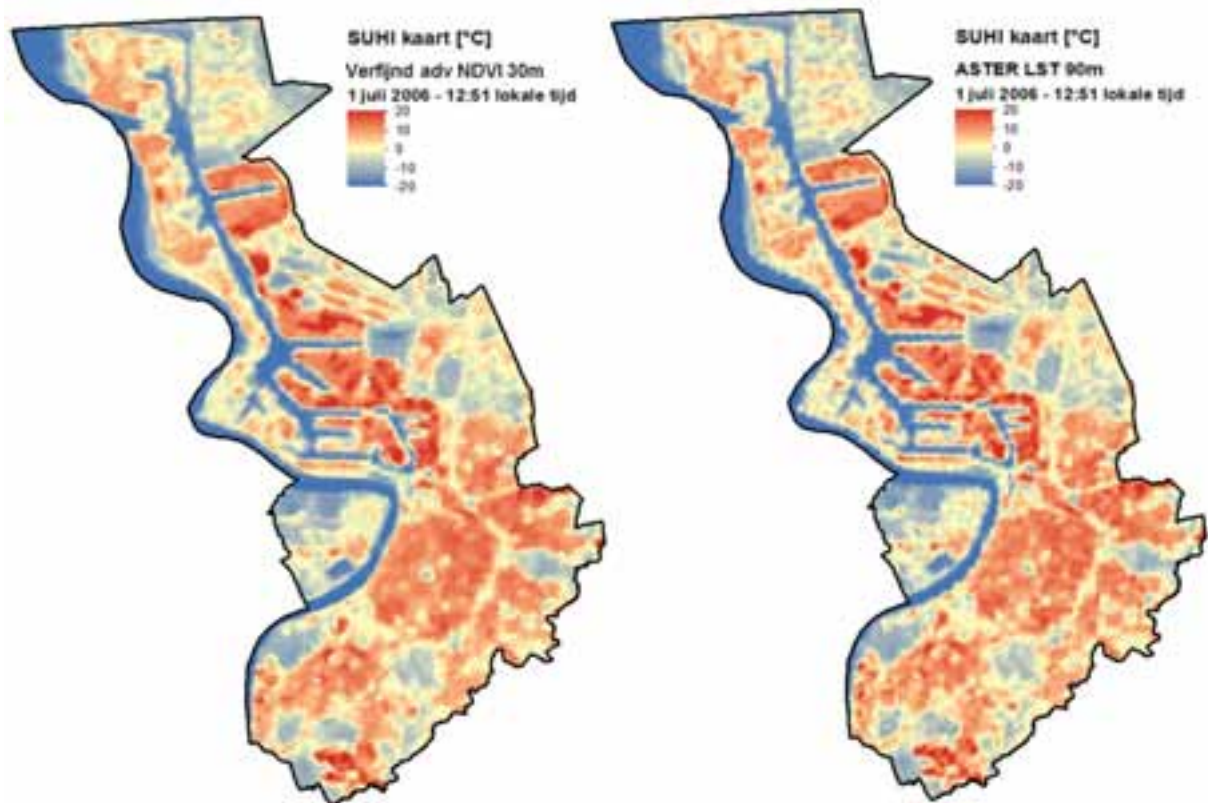
Figuur 53: Schematisch overzicht van de downscaling procedure voor een ASTER LST beeld aan de hand van Landsat NDVI.



Figuur 54: Grafische voorstelling van het downscaling algoritme gebaseerd op een lokale regressie tussen hersamplede NDVI en ASTER LST.

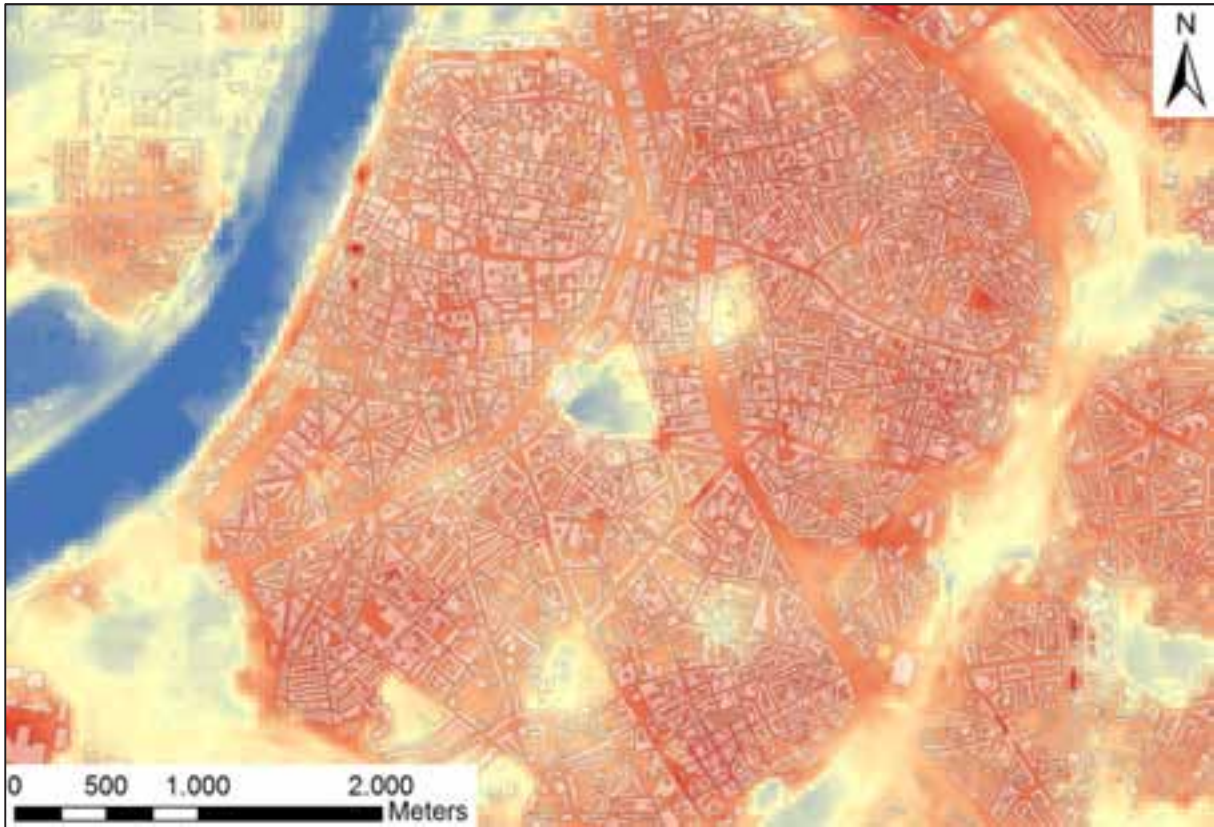
4.3.2. TOEPASSING EN ANALYSE DOWNSCALING

Een voorbeeld van de resulterende hoge resolutie 30-m SUHI kaart is hieronder opgenomen. We beperken ons in de rapportage tot het beeld van 2006-07-01 om 12:51 lokale tijd, omdat dit tijdstip het dichtst lag bij de opnames van het gebruikte NDVI beeld (16/07/2006) en we hier dus de beste resultaten van de downscaling verwachten.



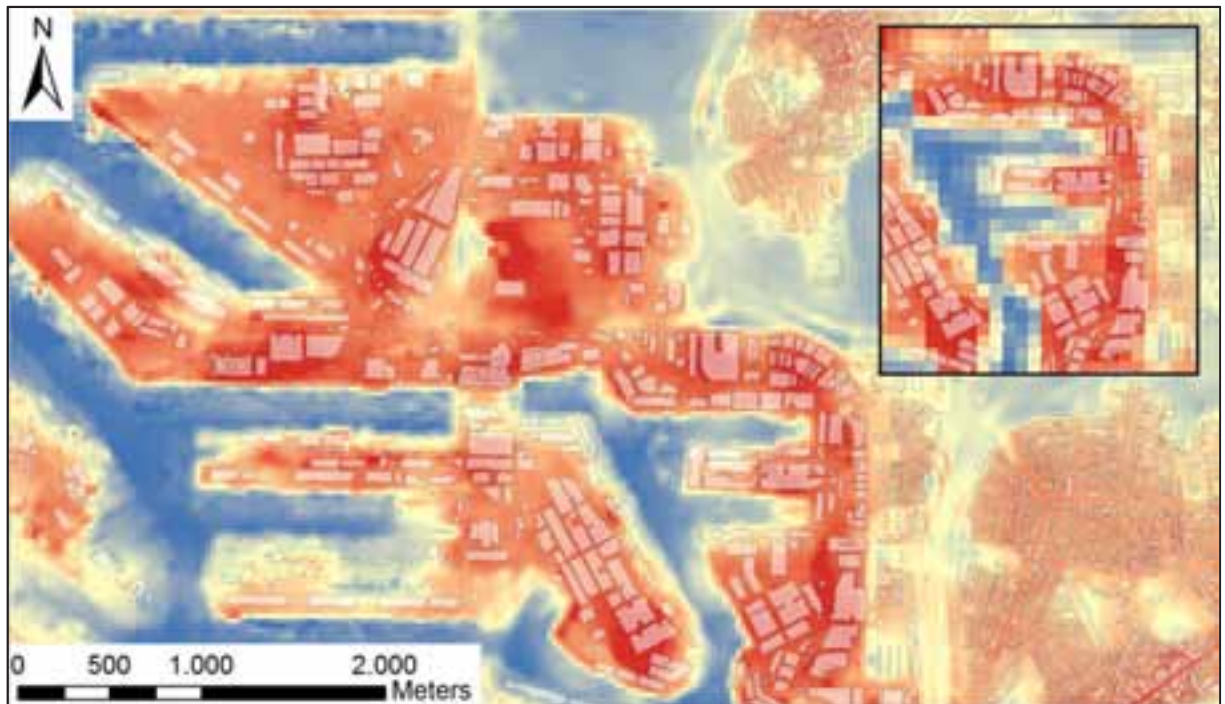
Figuur 55: Vergelijking tussen de ruwe ASTER 90 m SUHI kaart (rechts), en de gedownscalede versie op basis van Landsat NDVI (links).

Op het eerste zicht oogt deze kaart niet erg verschillend van de 90m resolutie kaart, maar wanneer we enkele uitvergrotingen bekijken komt de toegevoegde waarde wel tot uiting. Hieronder in Figuur 56 zien we de uitvergroting voor het centrum van Antwerpen, analoog aan Figuur 44 in Sectie 3.2.1. Het is duidelijk dat er meer detail in deze nieuwe kaart zit. Zo is er bv. te zien dat de meest koele locatie in het stadspark zich aan de zuidkant bevindt, waar het meeste open water is, hetgeen niet af te leiden viel uit het originele beeld. Ook andere parken zijn nu scherper afgetekend en de locatie van enkele hotspots (bv. aan de Scheldekaaien) komt nu beter tot uiting.



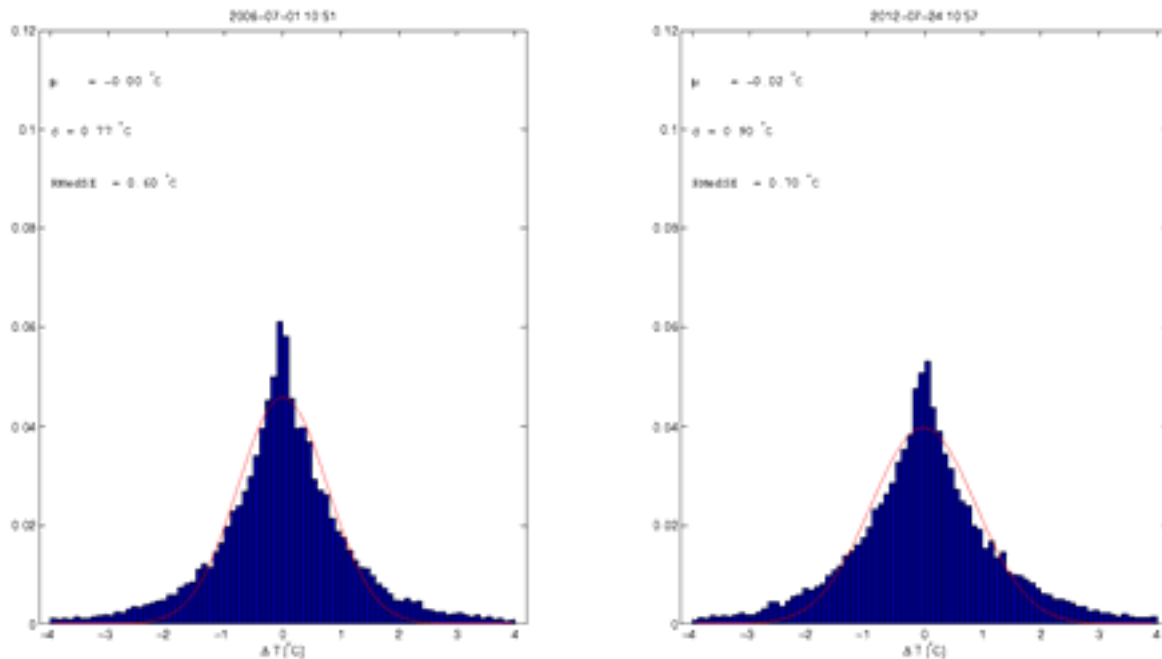
Figuur 56: Uitvergroting van de (op basis van de NDVI) gedownscalede ASTER oppervlaktetemperatuur.

Ook voor een gebied in de haven zit er duidelijk veel meer detail in de gedownscalede SUHI kaart.



Figuur 57: Vergelijking tussen de originele ASTER (kader) en de adhv NDVI gedownscalede oppervlakte temperatuur voor een gebied in de haven.

Uiteraard is het ook van belang om na te gaan hoe kwalitatief deze downscaling is. Dit kan door de gedownscalede beelden opnieuw te gaan aggregeren naar de originele resolutie van 90 m en die waarden te vergelijken met de originele ASTER beelden. Het resultaat van deze analyse is afgebeeld in onderstaande Figuur 58, waarbij we voor de twee beelden een histogram hebben gemaakt van het verschil tussen de originele ASTER beelden en de geaggregeerde gedownscalede waarden. De histogrammen zijn op dezelfde horizontale as afgebeeld. De breedte geeft aan hoe trouw de gedownscalede versie is aan het originele beeld. Hoe smaller dergelijk histogram, hoe beter. Om deze breedte te kwantificeren hebben we een Gaussische (klok-) curve aan de histogrammen gefit. De σ parameter van deze Gaussische curve is een maat voor de breedte. Zoals gedacht is de validatie iets beter voor het beeld van 1 juli 2006, hetgeen logisch is aangezien dit moment het dichtst ligt bij de NDVI opname. Toch is ook de validatie voor het beeld van 24 juli 2012 meer dan behoorlijk. Op zich kunnen we stellen dat de additionele fout ten gevolge van deze downscaling relatief goed meevalt en onder de 1 °C valt, wat waarschijnlijk beter is dan de nauwkeurigheid van de oppervlakte temperatuurbeelden zelf.



Figuur 58: Controle van de downscaling : vergelijking tussen de originele LST waarden van ASTER en de geaggregeerde, gedownscalede LST waarden.

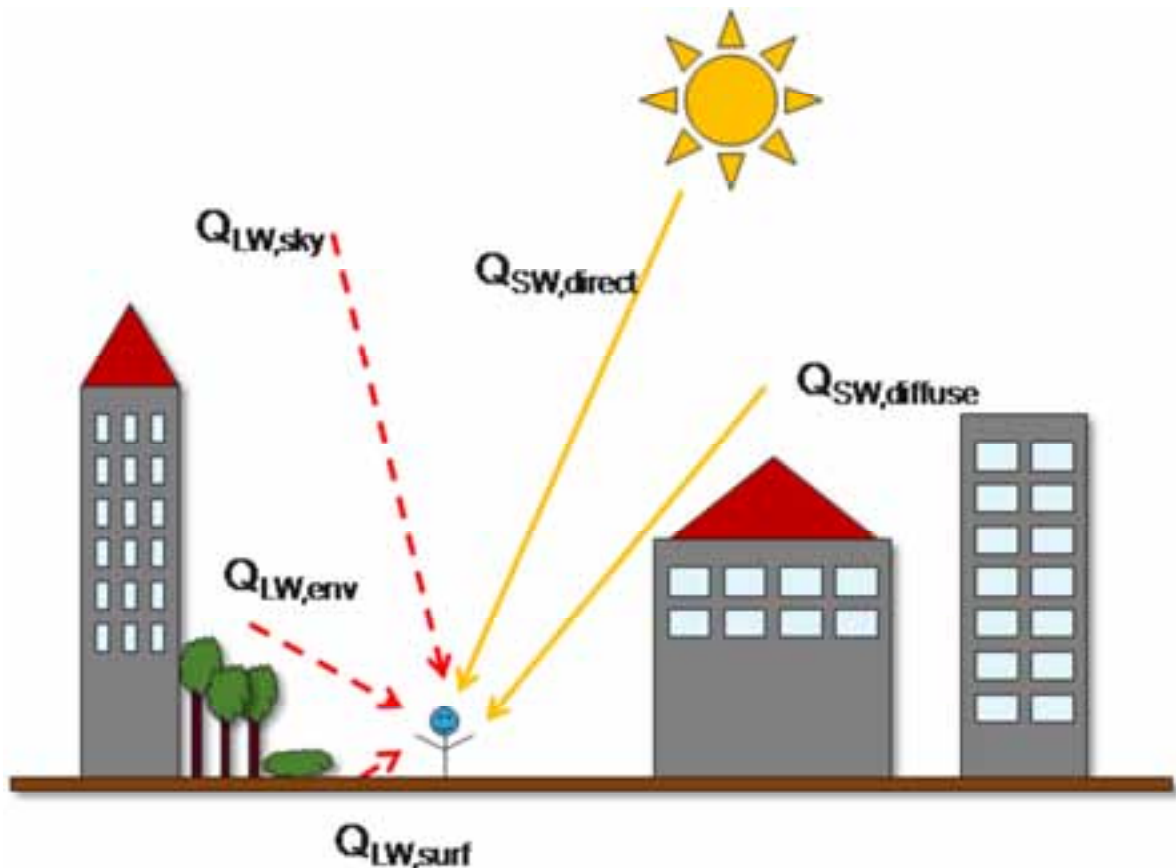
4.4. VERTALING NAAR POTENTIËLE DAGSTRESS

4.4.1. TER INLEIDING : DE STRALINGSBALANS

In bovenstaande stukken hebben we uitgebreid de verzamelde oppervlakte temperatuurbeelden besproken en geanalyseerd. De vraag stelt zich nu hoe we deze oppervlakte temperatuurbeelden kunnen gebruiken in iets meer tastbaardere vorm t.a.v. hittestress in de stedelijke omgeving. Op zich zijn er verschillende vormen van hittestress in het algemeen en in stedelijk gebied in het bijzonder. Het SHE effect heeft een duidelijke invloed op de nachtelijke lucht temperaturen, waardoor tijdens dagen met een uitgesproken CLUHI intensiteit de nachtelijke luchttemperatuur in het stedelijk weefsel veel minder daalt dan in de rurale omgeving. Deze verhoogde nachtelijke temperaturen zullen voornamelijk effect hebben in eerste orde op het moeilijk inslapen 's nachts met een verminderde recuperatie en een verhoogde vermoeidheid tot gevolg. Dit kan op zijn beurt weer effect hebben op het welbevinden, de gezondheid en de economische productiviteit van de bevolking. Overdag echter is de situatie anders. We zien dat het CLUHI effect veel minder uitgesproken is en er in de luchttemperaturen (zie meetcampagne) veel minder verschil is tussen de stad en het platteland, maar ook in de stad zelf. Een belangrijke factor voor hittestress overdag is echter de zon en dus zonnestraling (die uiteraard 's nachts afwezig is). Het effect van instraling op het menselijk lichaam kan ook kwantitatief worden uitgedrukt door middel van de zogeheten *mean radiant temperature*¹⁹ (MRT). Dit is een fictieve stralingstemperatuur die gedefinieerd wordt

¹⁹ Zie bvb. Fanger, P.O. (1970). Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. New York: McGraw Hill.

als de *uniforme temperatuur van een ideale zwarte straler die een gemiddeld, rechtopstaand persoon omhuld en aan dezelfde stralingsflux is blootgesteld*. Het is met andere woorden het verschil van hoeveel stralingsenergie, zowel zonnestraling (kortgolvlige) als thermische (IR of langgolvlige straling), een persoon binnenkrijgt minus hoeveel thermische straling een persoon uitzendt. Deze MRT is uitermate belangrijk in het afleiden van thermische comfort indices zoals een Physiologically Equivalent Temperature (PET) of de Universal Thermal Climate Index (UTCI). En is overdag zelfs tot 2x zo belangrijk dan de luchttemperatuur (die in de stedelijke omgeving relatief weinig zal variëren overdag). Deze grootheid geeft dus een veel beter idee van de ruimtelijke variatie van hittestress overdag. Dit is schematisch afgebeeld in onderstaande Figuur 59.



Figuur 59: Schematische afbeelden van de verschillende stralingsfluxen (W/m^2) die invallen op een menselijk lichaam in het stedelijk gebied. Merk op dat we de gereflecteerde kort en langgolvlige straling hebben weggelaten als mede de warmtestraling (IR of langgolvlige straling) die een persoon zelf uitzendt.

De verschillende stralingscomponenten zijn aangegeven :

- $Q_{SW,direct}$: **directe kortgolvlige straling**. Indien mensen zich bevinden in zones zonder schaduw en dus blootgesteld worden aan directe zonnestraling, zal deze component het meest bepalend zijn voor de hittestress ervaren door voetgangers. Deze straling bevindt zich hoofdzakelijk in het visuele en nabij infrarode deel van het spectrum.
- $Q_{SW,diffuse}$: kortgolvlige straling afkomstig van de zon wordt ook door de atmosfeer verstrooid (de afhankelijkheid van de golflengte van deze verstrooiing kan overigens heel duidelijk geobserveerd worden tijdens mooie rode zonsondergangen). Door deze verstrooiing zullen voetgangers ook aan een zekere fractie **diffuse kortgolvlige straling**

blootgesteld wordt. Deze diffuse component is overigens dominant wanneer bijvoorbeeld bewolking aanwezig is.

- $Q_{LW,surf}$, $Q_{LW,env}$: De kortgolvlige straling afkomstig van de zon wordt gedeeltelijk geabsorbeerd door het oppervlak en terug vrijgegeven in de vorm van **langgolvlige straling**. Deze straling bevindt zich hoofdzakelijk in het thermisch infrarode deel van het spectrum. Deze langgolvlige straling afkomstig van het oppervlak wordt voorgesteld door $Q_{LW,surf}$. Maar deze straling is echter niet alleen afkomstig van de bodem. In het stedelijk weefsel zal elk oppervlak zichtbaar vanaf de positie van de voetgangers hiertoe bijdragen : gevels, heet asfalt, maar ook bvb vegetatie. In bovenstaande Figuur x is bijgevolg een onderscheid gemaakt tussen langgolvlige straling afkomstig van het oppervlak, en langgolvlige straling afkomstig van de omgeving.
- $Q_{LW,sky}$: Naast het oppervlak en de omgeving is de atmosfeer als dusdanig ook een “warm lichaam”, dat dus thermische of langgolvlige straling zal uitzenden. Dit is wat deze component aangeeft in bovenstaande figuur. Deze omnidirectionele **langgolvlige straling afkomstig van de atmosfeer** zal dus duidelijk afhangen van de fractie van het hemelgewelf waaraan de voetganger is blootgesteld, met andere woorden de zogenaamde ‘sky view factor’.

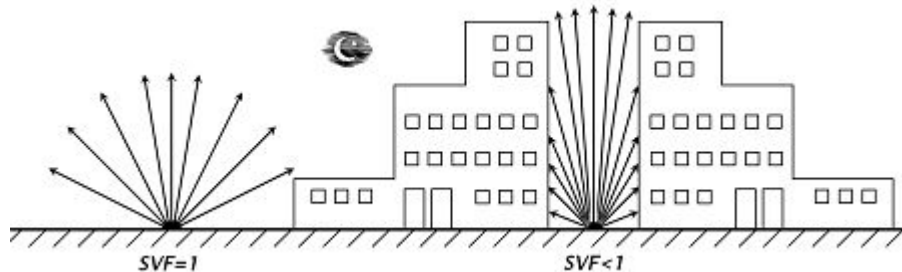
Alle hoger vermeldde componenten hebben een positief teken, met andere woorden ze zullen energie toevoegen aan onze proefpersoon en dus voor opwarming zorgen. Uiteraard zullen er ook verkoelende mechanismen zijn en in de stralingsbalans dienen we uiteraard dan de langgolvlige straling uitgezonden door het menselijk lichaam te beschouwen. Deze grootte is afhankelijk van de lichaamstemperatuur en emissiviteit van de huid en/of kledij (typisch 0.9) en waarbij de effectieve oppervlakte temperatuur van het lichaam kunnen benaderen als 34 – 35 °C (Erell et al., 2011).

We dienen hierbij verder ook op te merken dat we 2 componenten zullen verwaarlozen in de verdere discussie, met name de gereflecteerde kort- en lang-golvlige straling. De gereflecteerde hoeveelheid langgolvlige straling is relatief beperkt en voor wat de kortgolvlige straling betreft, is die eigenlijk enkel belangrijk in de buurt van sterk reflecterende oppervlakken (glas, spiegels). Deze kunnen weldegelijk aanwezig zijn in de stedelijke omgeving, maar op basis van de ons beschikbare data kunnen we daarvoor onmogelijk een inschatting doen.

Om redenen die verder duidelijk zullen worden zullen we een aantal vereenvoudigingen moeten doorvoeren om de complexiteit van het stedelijk weefsel hanteerbaar te maken. Eerst en vooral kunnen we beroep doen op onze remote sensing data die een relatief goede inschatting geven van de oppervlakte temperatuur van het stedelijk weefsel. Gezien de resolutie van het gedownscalede ASTER beeld (30 m) dat we zullen gebruiken in deze analyse, kunnen we stellen dat dit om een geaggregeerde, uitgemiddelde temperatuur gaat van zowel gebouwen, vegetatie canopy als grond oppervlak. Deze LST stelt ons dus in staat de lange golf stralingscomponenten te berekenen afkomstig van oppervlak en stedelijk canopy (de omgeving). De ontbrekende langgolvlige straling is dan afkomstig van de lucht. We dienen echter rekening te houden met een soort *view factor*, i.e. : de verhouding hoeveel van het hemel gewelf zichtbaar is vanaf de grond t.o.v. hoeveel geblokkeerd wordt door gebouwen en obstakels. We spreken van de *sky view factor* hier. Hierin dient ook vegetatie te worden opgenomen gezien ook dit een deel van het hemelgewelf afschermt. Gezien wij die zogeheten sky view factor in volgend hoofdstuk ook zullen nodig hebben loont het de moeite om er even kort bij stil te staan.

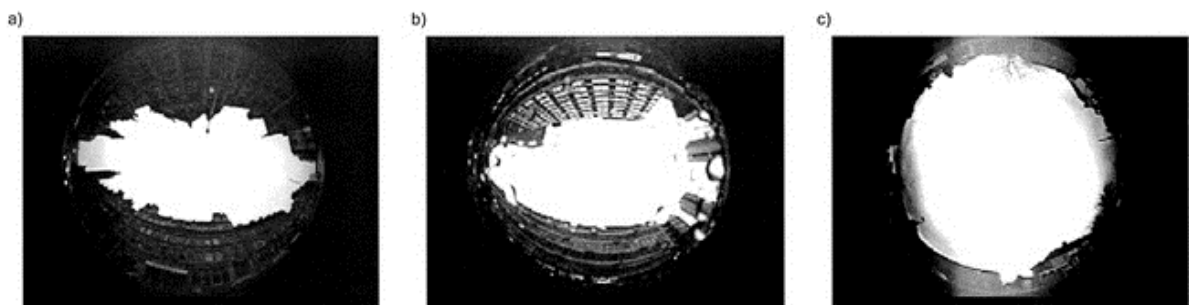
4.4.2. AFLEIDEN VAN DE SKY VIEW FACTOR UIT HET 3D HOOGTEMODEL VAN ANTWERPEN

Zoals vermeld is de sky view factor kortweg de fractie van het hemelhalfmond dat zichtbaar is vanaf het grondniveau. Onderstaande figuur illustreert dit :



Figuur 60: Illustratie van de sky view factor, bron : www.knmi.nl/klimatologie/weeramateurs/UHI/index.html

Wanneer men zich in een open veld bevindt, dan is bijna het volledige hemelhalfmond zichtbaar, in dit geval hebben we een SVF van bijna 1. In stedelijke omgeving echter, blokkeren de gebouwen veelal het “vrije zicht”. Extreme street canyons hebben bijgevolg een SVF die veel lager is dan 1. Een SVF kan men experimenteel eenvoudig bepalen aan de hand van fotografie met zogeheten fish-eye lenzen (zie onderstaande figuur). Zo zien we in paneel a) een situatie met een lage SVF, terwijl in paneel c) we een hogere sky view factor hebben, voor een meer open locatie.



Figuur 61: Illustratie van bepaling van SVF met zogeheten fish-eye lenzen (Chapman and Thornes, 2004).

Om de SVF af te leiden voor een wijk of een stad is uiteraard een 3D model van de gebouwen nodig. Dit is ons voor deze studie ter beschikking gesteld door de stad Antwerpen. Op basis hiervan kunnen we vervolgens de sky view factor afleiden. Hiervoor maken we gebruik van de *Terrain Analysis – Lighting and Visibility* module binnen SAGA GIS. Deze module stelt ons in staat de sky view factor te berekenen en het resultaat is hieronder weergegeven.



Figuur 62: Voorbeeld van de afgeleide sky view factor voor een uitvergroting van het centrum van Antwerpen. Men kan duidelijk de smalle straatjes met een lagere sky view factor zien en de eerder open pleinen met een hogere SVF.

4.4.3. POTENTIËLE BEZONNING IN ANTWERPEN

Indien we de *mean radiant temperature* wensen te berekenen hebben we naast de langgolvlige straling, waarvoor we het ASTER oppervlakte temperatuurbeeld (zie verder) zullen gebruiken, ook de kortgolvlige invallende straling nodig. Met andere woorden de zonnestraling en met name hoe de schaduwvorming hierin een rol speelt.

Om dit te illustreren berekenen we allereerst de totale potentiële bezonning voor een zomerseizoen : vanaf begin mei tot eind september. De absolute waarden van dergelijke berekening zullen in geen geval vergelijkbaar zijn met de werkelijke waarden gezien hier telkens van een heldere hemel is uitgegaan. In werkelijkheid zal die totale bezonning uiteraard stukken lager liggen gezien de vaak voorkomende bewolking een groot deel van de invallende directe zonnestraling zal absorberen. Verder is het ook van belang om niet enkel de schaduwvorming door gebouwen (via de sky view factor), maar ook door de bomen in rekening te brengen. Hiervoor werd de kaart met vegetatieaanwezigheid en hoogte, beschikbaar gesteld door de stad Antwerpen, gebruikt. We hielden enkel rekening met vegetatie groter dan 2m (en dus in staat om schaduw te werpen op een gemiddeld persoon) en kenden dit een 20% doorlaatbaarheid voor directe kortgolvlige straling en 50% voor diffuse kortgolvlige straling toe, naar [Baldocchi \(2012\)](#).

De ruimtelijke variabiliteit van de resulterende kaart geeft dus aan waar de schaduwvorming in Antwerpen het grootst is, en waar het oppervlak (en dus de bevolking) meer wordt blootgesteld aan invallende zonnestraling. Onderstaande figuur brengt dus enkel de interactie van de veranderende stand van de zon (dag/jaarcyclus) met het stedelijk weefsel in kaart. Figuur x geeft een detail afbeelding van de totale potentiële bezonning (uitgedrukt in W/m^2) gedurende een

zomerseizoen (mei - september). We merken duidelijk de schaduw effecten aan de zuidelijke gevelzijden in de straten. Ook het effect van de bomen (bv. in het stadspark) komt duidelijk tot uiting: op open plaatsen is de totale bezonning een heel stuk hoger dan onder de bomen. In de haven (buiten de figuur) zien de grote industriële terreinen met weinig beschutting en schaduwvorming. We verwachten hier dan ook de grootste hittestress t.g.v. invallende korte-golf straling. De laagste waarden worden gevonden voor de meer centrale delen van Antwerpen. Dit is ergens logisch gezien daar meer kleine, smalle straatjes aanwezig zijn die op natuurlijke wijze voor schaduwvorming zorgen.



Figuur 63: Detail afbeelding in het centrum van Antwerpen van de totale potentiële bezonning over een zomer seizoen van mei tot september, onder heldere hemel.

4.4.4. MEAN RADIANT TEMPERATURE

Nu we in iets meer detail de afleiding van de sky view factor en de bezonning (invallende korte golfstraling) besproken hebben, liggen alle elementen op tafel om een inschatting te maken van het ruimtelijk patroon van de hoger gedefinieerde mean radiant temperature.

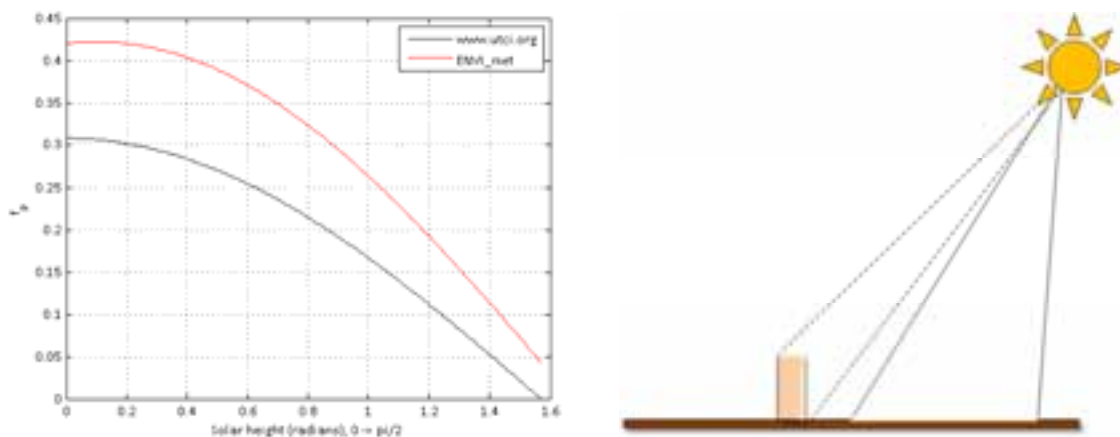
Wiskundig ziet de berekening van de MRT er als volgt uit (www.utci.org, (Thorsson et al., 2007)) voor een persoon die blootgesteld is aan directe zonnestraling enerzijds en aan diffuse kort-golvige en lang-golvige straling afkomstig van een aantal oppervlakken i in zijn 'vizier' :

$$T_{mrt} = \left[\frac{1}{\sigma} \cdot \sum_{i=1}^n \left(Q_{LW,i} + a_h \frac{Q_{SW,i}^{diffuse}}{\varepsilon_h} \right) \cdot F_i + f_p a_h \frac{Q_{SW,i}^{direct}}{\sigma \varepsilon_h} \right]^{\frac{1}{4}}$$

Met :

- σ : de constante van Stefan-Boltzman ($5.670373 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$).
- $Q_{SW,i}^{direct}$: directe invallende korte golf straling (directe zonnestraling) in $[\text{Wm}^{-2}]$
- ε_h : emissiviteit van onze theoretische persoon (typisch 0.97)
- a_h : absorptie coëfficiënt voor kortgolvlige straling van onze theoretische persoon, typisch 0.7 (Thorsson et al., 2007; Erell et al., 2011)
- F_i : view factor voor oppervlak i , waarover gesommeerd wordt
- $Q_{LW,i}$: langgolvlige straling afkomstig van oppervlak i $[\text{Wm}^{-2}]$
- $Q_{SW,diffuse,i}$: diffuse kortgolvlige straling afkomstig van oppervlak i $[\text{Wm}^{-2}]$
- f_p : projected area factor voor onze theoretische opstaande mens met rotatie symmetrie

De laatste factor (f_p) vertaalt de invallende zonnestraling op een horizontaal oppervlak, waarin kortgolvlige neerwaartse zonnestraling typisch wordt uitgedrukt in een invallende straling op een omhullende theoretische cilinder rond een menselijk lichaam afhankelijk van de hoogte van de zon boven de horizon (Figuur 64).



Figuur 64: Grafiek van de area projected factor. Er worden een aantal verschillende parameterisaties²⁰ afgebeeld met name afkomstig van www.utci.org en de parameterisatie gebruikt in het ENVI-met model (www.envi-met.com).

In theorie zou men dus de straling afkomstig van elk oppervlak i moeten kennen dat zich in het gezichtsveld van de voetganger in kwestie bevindt. Het hoeft geen uitleg dat om dit gedetailleerd in kaart te brengen in een extreem heterogene omgeving zoals een stad een uiterst moeilijke opdracht is. Er dringen zich dus inderdaad een aantal vereenvoudigingen op (Thorsson et al., 2007).

Een belangrijke opmerking hierbij is dat de effecten van straling zich op heel korte afstand kunnen afspelen : in de schaduw van een boom of niet kan al makkelijk een verschil van 10°C stralingstemperatuur opleveren zoals ook blijkt uit studies van de Universiteit Wageningen. In deze analyse bekijken we sowieso de zaak op 30m resolutie. Het spreekt dus voor zich dat we dergelijke korte afstandseffecten niet kunnen vatten met deze berekening maar meer geïnteresseerd zijn in een globaal beeld van de hittestress overdag in Antwerpen.

Om vervolgens de energiestroomcomponenten te berekenen zullen we volgende zaken aannemen :

²⁰ www.utci.org : $f_p = 0.308 \cos((\gamma(1 - \gamma^2/48402)))$, ENVI-met : $f_p = 0.42 * \cos(\gamma) + 0.043 * \sin(\gamma)$ met γ telkens de zonnehoogte (radialen)

- De opwaartse langgolvlige straling kunnen we berekenen aan de hand van het ASTER LST beeld :

$$Q_{LW}^{surf} = \varepsilon_{surf} \sigma T_{surf}^4$$

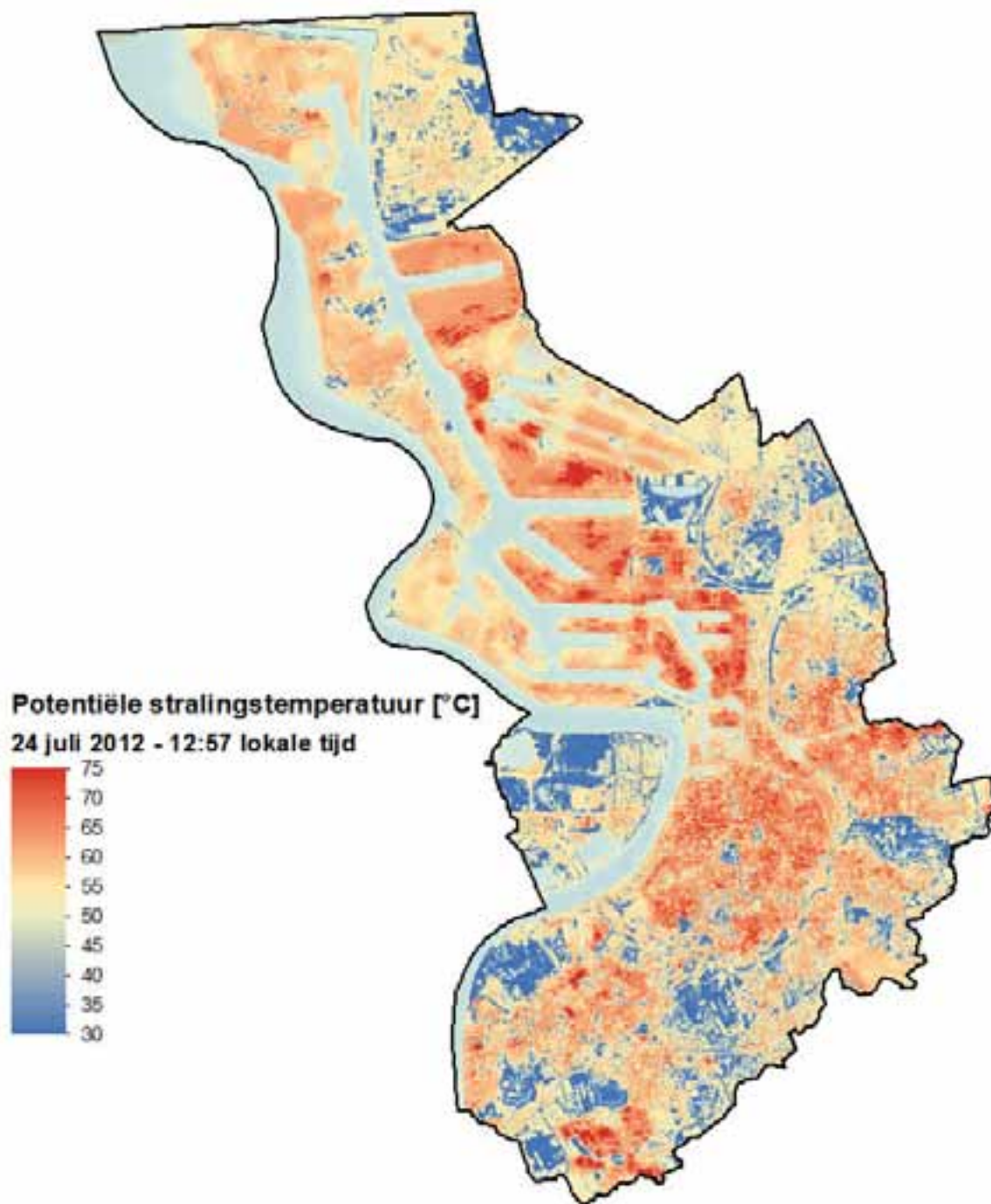
- De neerwaartse langgolvlige straling afkomstig van de atmosfeer parameteriseren we aan de hand van luchttemperatuur en emissiviteit op basis van de dampspanning van water (Prata, 1996), zie ook (Choi et al., 2008). We nemen 20 mbar als karakteristieke waarde voor de dampspanning van water (typische bij +/- 20 °C) hier (net als voor de zonnestraling berekeningen). De luchttemperatuur kunnen we makkelijk uit de modellering halen (zie verder).
- We gaan er vervolgens van uit dat een voetganger voor de helft aan opwaartse langgolvlige straling en voor de helft aan neerwaartse langgolvlige straling is blootgesteld. Nu is het wel zo dat in stedelijke omgeving die neerwaartse langgolvlige straling niet enkel afkomstig is van de lucht, maar ook van de omringende gebouwen en vegetatie. Hier komt dus de befaamde SVF terug in het spel. We berekenen m.a.w. een neerwaartse IR straling van de atmosfeer (cfr hoger) : Q_{LW}^{sky} , en een IR straling afkomstig van de omgeving (gebouwwanden, bomen etc...) : Q_{LW}^{env} , een soort “environmental radiation” laat ons zeggen. We kunnen m.a.w. stellen dat de totale invallende langgolvlige straling op onze proefpersoon Q_{LW} gegeven wordt door :

$$Q_{LW} = .5 \underbrace{\left[(1 - SVF_{vg}) \cdot Q_{LW}^{surf} + SVF_{vg} \cdot Q_{LW}^{sky} \right]}_{neerwaarts} + .5 \underbrace{Q_{LW}^{surf}}_{opwaarts}$$

- Voor wat betreft de kortgolvlige straling, m.a.w. de directe en diffuse zonnestraling, dienen we voor wat betreft de directe zonnestraling de hoekfactor (f_p) in rekening te brengen zoals die hoger is aangegeven. We berekenen vervolgens in SAGA-GIS²¹ via de Module *Terrain Analysis – Lighting and Visibility*, de potentiële invallende zonnestraling, zowel direct als diffuus. We doen dit namelijk voor een dag in de zomer (de exacte datum op een paar weken na in de zomer maakt in principe niet zo heel veel uit) en dit om 12h zonnetijd (i.e. voor wanneer de zon het hoogst aan de hemel staat). In lokale tijd tijdens de zomer is dit in België ongeveer 14:00h. Men dient er zich wel van bewust te zijn dat het hier gaat om *potentiële* instraling, met name onder aanname van een heldere hemel en een typische 20 mbar waterdampspanning op 51.05 °NB.

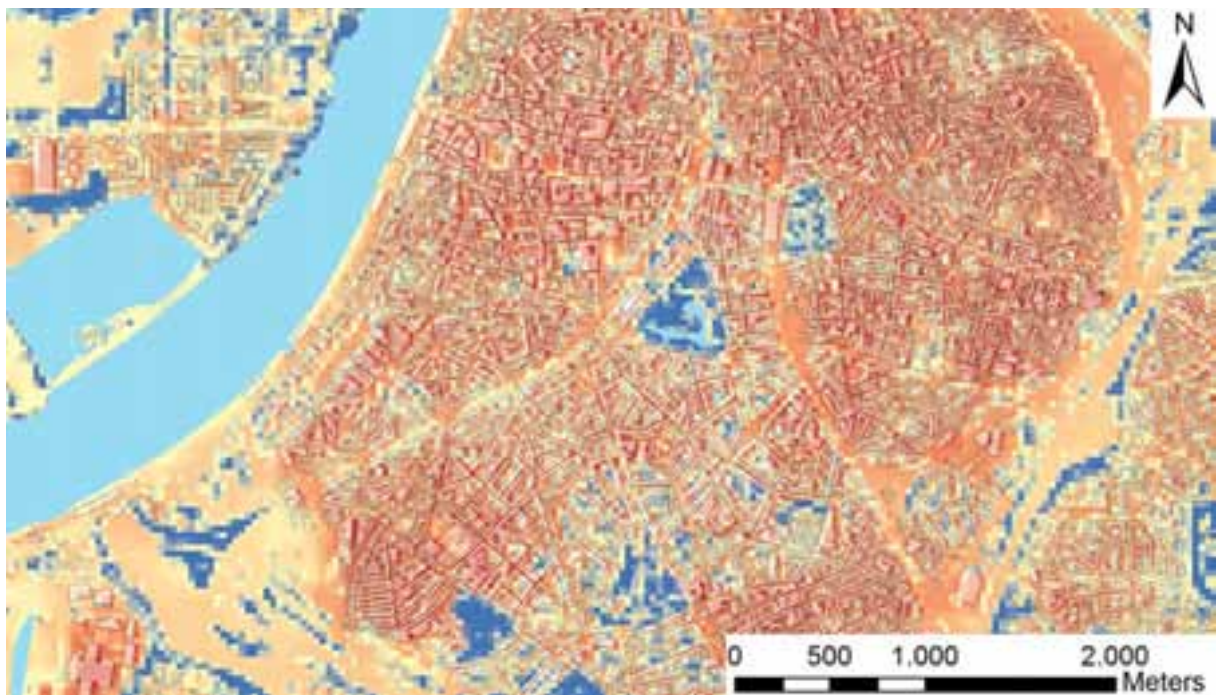
Wanneer we alle componenten samenvoegen volgens de relatie aan het begin van deze paragraaf bekomen we de kaart van Figuur 65, waarbij we als onderliggend ASTER beeld het gedownscalede beeld van 2012/07/24 genomen hebben. **Deze kaart geeft dus een inschatting van het ruimtelijk patroon van de mean radiant temperature en dus de stralingsbelasting op een hete zomerdag in Antwerpen.**

²¹ <http://www.saga-gis.org/en/index.html>

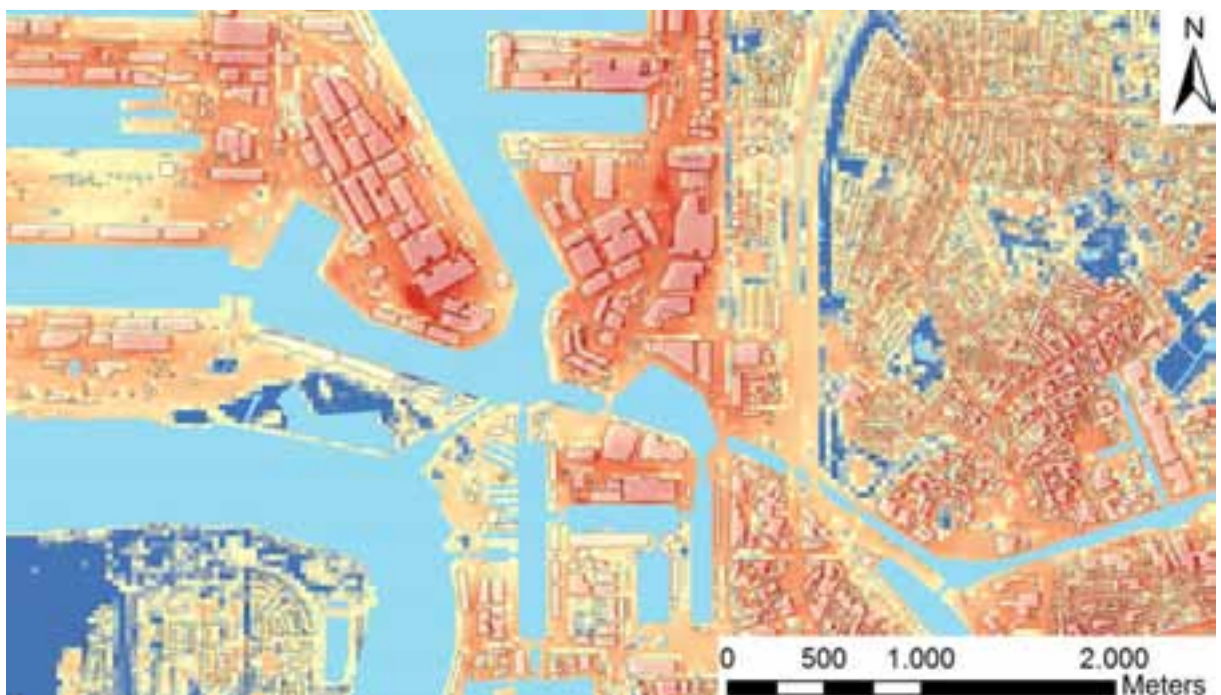


Figuur 65: Potentiële MRT op basis van het gedownscaled ASTER beeld van 2012-07-24.

Een aantal zaken vallen op in de figuur. Zo zien we dat de zones met de allerhoogste potentiële MRT zich niet direct in de stadskern bevinden, maar vooral in grote open industrieterreinen in de haven. We zien in feite een relatief gelijkaardig beeld ontstaan als voor de SUHI kaarten (zie hiervoor), maar met dat verschil dat de stadskern iets beter gespaard blijft door de verhoogde schaduwvorming en beschutting voor directe zonnestraling die we in deze berekening hebben meegenomen. Door het in rekening brengen van de gebouwen en de vegetatie zit er wel duidelijke meer detail en structuur in dit beeld. Onderstaande figuren tonen enkele detailbeelden van bovenstaande kaart.



Figuur 66: Detail van de potentiële MRT voor het centrum van Antwerpen.



Figuur 67: Detail van de potentiële MRT voor een gebied in de haven.

We hebben bovenstaande kaart ook op Google maps gelegd, waardoor het mogelijk is om de details per buurt te bestuderen. Het is duidelijk dat bomen, zelfs in kleinere parkjes en tuintjes, een groot effect hebben op de stralingstemperatuur, zowel door hun schaduwvorming als hun effect op

de oppervlaktetemperatuur. En zelfs grote open grasvelden zoals ten zuiden van het gerechtsgebouw, die gevoelig zijn aan directe zonnestraling, hebben toch een duidelijk lagere MRT dan de meer bebouwde delen van Antwerpen.



Figuur 68: Google-Earth Screenshot van de MRT kaart zoals hoger beschreven.

HOOFDSTUK 5. ANALYSE CANOPY LAYER URBAN HEAT ISLAND

Dirk Lauwaet - VITO

In dit hoofdstuk beschrijven we de analyse van het Canopy Layer Urban Heat Island (CLUHI), dit is het hitte-eiland verschijnsel voor wat betreft de **luchttemperatuur**. We zullen hier gebruik maken van modelberekeningen, gevalideerd en aangevuld met metingen. Uitgangspunt is een modelberekening op een resolutie van 100 m aan de hand van het URBCLIM model (De Ridder et al, 2013). In dit hoofdstuk zullen we beginnen met het beschrijven van de model berekeningen en de opzet van het luchttemperatuurmodel, waarna we de resultaten zullen bespreken voor Antwerpen samen met een validatie van de modelberekeningen. In een finaal luik zullen we nog een aantal afgeleide grootheden berekenen, die relevant zijn voor de impact van het CLUHI.

5.1. MODELBEREKENINGEN AAN DE HAND VAN URBCLIM

5.1.1. WOORD VOORAF

Voor het in kaart brengen van het CLUHI is binnen dit project gekozen voor een deterministische modelmatige aanpak. Op het einde van Hoofdstuk 3 is er via een eenvoudige statistische techniek ook een luchttemperatuurkaart afgeleid op basis van de gemeten luchttemperatuur op een gereden transect uit Hoofdstuk 2. Hoewel dergelijke techniek er technisch wel in slaagt om een globaal beeld te schetsen van de luchttemperatuur in Antwerpen, blijft dit soort kaart een momentopname, afhankelijk van de temperatuurmetingen van het transect. Het beeld dat zo gevormd wordt, is m.a.w. een statisch gegeven en draagt slechts beperkt bij tot het interpreteren van bijvoorbeeld de duidelijke dagcyclus van de CLUHI intensiteit die in de vaste metingen zichtbaar is, of het al dan niet voorkomen van het effect onder veranderende grootschalige meteorologische condities. Ook is het verder uitwerken van bijvoorbeeld toekomst scenario's via dergelijke methodiek niet mogelijk. Een ander duidelijk voordeel van de aanpak die in dit hoofdstuk wordt besproken is de mogelijkheid tot het afleiden van secundaire parameters naast de luchttemperatuur die verband houden met de verhoogde luchttemperaturen in verstedelijkt gebied. Zoals bijvoorbeeld het gemiddeld CLUHI effect of een ruimtelijke expliciete percentielwaarde. Een mooi voorbeeld hiervan zijn de zgh. "*cooling degree hours*", of het totaal aantal graad-uren boven een bepaalde drempelwaarde²² (typisch bv. 25 °C) en dat verband houdt met het gebruik van bv. airconditioning. Deze afgeleide grootheid is bijvoorbeeld typisch veel directer gelinkt aan de totale energieconsumptie dan de luchttemperatuur op zich, alleen zijn hiervoor wel degelijk *uurlijkse* luchttemperatuurvelden nodig om van te vertrekken.

In dit hoofdstuk zullen we dus een modellering bespreken die vertrekt vanaf fysische principes en die met andere woorden poogt de werkelijke processen die aan de basis liggen van het lucht-SHE zo goed mogelijk in rekening te brengen. Dergelijke aanpak heeft uiteraard z'n beperkingen waarvan we ons dienen bewust te zijn. Hier wordt in volgend stukje wat dieper op ingegaan.

²² Of omgekeerd "*heating degree-hours*", welke het totaal is beneden een bepaalde buitentemperatuur.

5.1.2. BESCHRIJVING URBCLIM

→ Kadering van het modelconcept

De aanpak van het URBCLIM model is er één die een hoge²³ ruimtelijke resolutie probeert te combineren met een snelle maar toch accurate en omvattende berekening van de stedelijke luchttemperatuur. Op zich zijn reeds heel wat modellen en methoden beschikbaar die stedelijke luchttemperatuur kunnen berekenen. Elk model of manier van aanpakken voor het modelleren van stedelijke luchttemperatuur heeft echter zijn voor- en nadelen en die wensen we toch even kort op een rij te zetten om beter onze keuze voor het URBCLIM model te kunnen duiden.

Allereerst dienen we een statistische aanpak te vermelden. In zo'n aanpak vertrekt men veelal van in-situ metingen of remote sensing beelden en gaat men aan de hand van een aantal GIS lagen een regressie model opstellen om zo tot een ruimtelijke expliciet beeld van de stedelijke luchttemperatuur te komen. Dergelijke aanpak, hoewel heel snel op vlak van rekentijd heeft zeker zijn beperkingen. Zo is het moeilijk om tot accurate luchttemperaturen te komen en veelal bekomt men slechts een statisch beeld (momentopname) van de luchttemperatuur, waardoor men weinig informatie kan afleiden over bijvoorbeeld de dagcyclus of de relatie van het SHE effect met grootschalige meteorologische condities. Wel is het mogelijk een breed interval van ruimtelijke resoluties af te dekken gezien die gegeven wordt door de ruimtelijke resolutie van de proxy-GIS lagen of de remote sensing beelden. Dit is hierboven reeds aangehaald.

Aan de andere kant van het spectrum vinden we microschaal modellen, veelal gebaseerd op een CFD (computational fluid dynamics) techniek. Het ENVI-met model (<http://www.envi-met.com>), ontwikkeld aan de universiteit van Mainz, is hier een goed voorbeeld van. Dergelijke modellen beschikken over een enorm niveau van detail en slagen erin om de luchtstromingen rond individuele gebouwen te berekenen. Microschaal modellen voor stedelijk klimaat houden ook typisch rekening met uitwisselingsprocessen aan gebouwen (eventueel rekening houdende met binnentemperatuur en wandisolatie), vegetatie en oppervlak door het expliciet te karakteriseren van hun kenmerken (albedo, emissiviteit, kruindichtheid etc...) op materiaal niveau. Hoewel dergelijke modellen een heel complex en gedetailleerd (met een ruimtelijke resolutie in de orde van een meter) beeld kunnen geven van het stedelijk klimaat is hun toepassing in die zin beperkt dat ze een enorme hoeveelheid van invoer data nodig hebben en extreem rekenintensief zijn. Het gevolg is dat men slechts een beperkte zone (wijk-niveau) kan doorrekenen en dat voor slechts een beperkt aantal randvoorwaarden (windrichting en snelheid, en algemene grootschalige meteorologische condities). Het is met de huidige computer-infrastructuur dus praktisch niet mogelijk om bijvoorbeeld het hitte-eiland effect voor een stad zoals Antwerpen te gaan doorrekenen en dergelijke modellering wordt dan ook meestal gebruikt voor detail simulaties van het effect van mitigerende maatregelen, bv. het veranderen van de coatings van gebouwen, het aanplanten van individuele vegetatie elementen etc... Vergelijking met observaties is voor dergelijke modellen ook veelal een probleem gezien het niveau van detail en de representativiteit van de metingen.

Een derde mogelijkheid is het gebruik van typische mesoschaal meteomodellen zoals WRF²⁴ (Skamarock et al., 2008), ALADIN²⁵, of COSMO-CLM²⁶ enzovoort. Dergelijke modellen zijn relatief

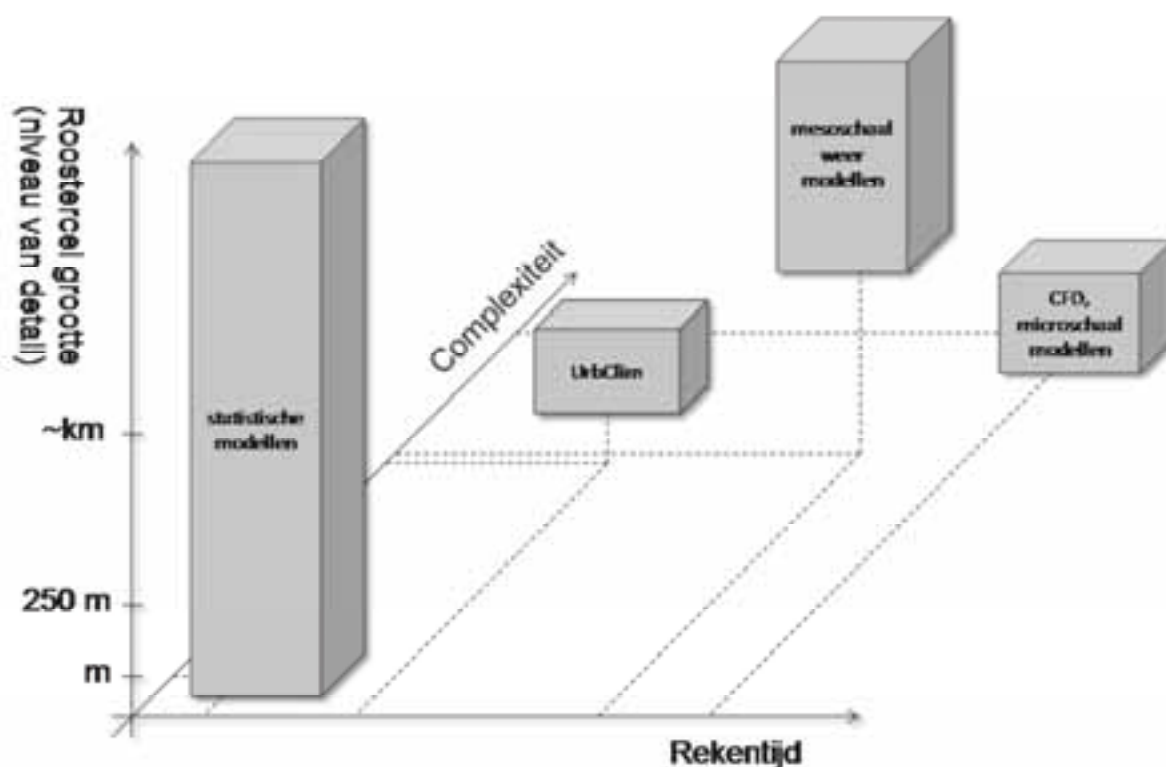
²³ Relatief gezien t.o.v. mesoschaal meteomodellen die typisch niet gedetailleerder dan 1 km kunnen rekenen wegens te rekenintensief.

²⁴ <http://www.wrf-model.org/>

²⁵ <http://www.cnrm.meteo.fr/aladin/>

gedetailleerd in hun beschrijving van grootschalige meteorologische processen. Het grote verschil met CFD modellen is echter dat men in de parameterisaties van het oppervlak geen gebouwen of 3D structuren expliciet gaat modelleren. Men gaat eerder aan de hand van parameterisaties bepaalde eigenschappen toekennen aan een verstedelijkt oppervlak en bestudeert m.a.w. eerder het geaggregeerde effect van een “stuk” stad op de atmosfeer (en omgekeerd). Het is verder ook zo dat dergelijke modellen ook relatief veeleisend zijn qua rekeninfrastructuur, niet in dezelfde mate als CFD modellen, maar wel in die mate dat een ruimtelijke resolutie van 1 km voor dergelijke modellen ongeveer de hoogst haalbare is, wat ze op hun beurt dan ook weer niet zo heel geschikt maakt voor het berekenen van de stedelijke luchttemperatuur voor een stad als Antwerpen.

Onderstaande Figuur 69 probeert deze verschillende aanpakken uit te zetten in een 3D grafiek en het URBCLIM model daartussen te positioneren inzake rekentijd, complexiteit en niveau van detail.



Figuur 69: Schematische voorstelling en trade-off inzake complexiteit, rekentijd en roostercel grootte van stedelijke klimaatmodellen.

Uit bovenstaande figuur blijkt het URBCLIM model tussen bovenstaande kwaliteiten een compromis te vinden, en het model is effectief ook met dit idee in het achterhoofd geconcipieerd. Met het URBCLIM model is geprobeerd een compromis te vinden tussen rekentijd, ruimtelijk detail en complexiteit van de beschrijving van de fysische processen die verantwoordelijk zijn voor de afwijkende stedelijk luchttemperaturen in vergelijking met het omringende rurale gebied. Het model heeft een ruimtelijke resolutie van 100 m en is in staat de stedelijke luchttemperatuur te berekenen voor een volledige zomerperiode van 5 maanden in ongeveer een week rekentijd op een huidige CPU. Op die manier komen uurlijkse luchttemperatuurvelden beschikbaar en kan dus de dynamica van het CLUHI bestudeerd worden, maar kunnen ook bepaalde statistieken berekend worden zoals gemiddelden en extreme temperatuurwaarden. De rekentijd is minstens een

ordegrootte sneller dan typische hogere resolutie (1 km) klimaatmodellen. Tezelfdertijd is het ook mogelijk door de resolutie van 100 m in zeker detail het binnenstedelijk CLUHI effect te bestuderen.

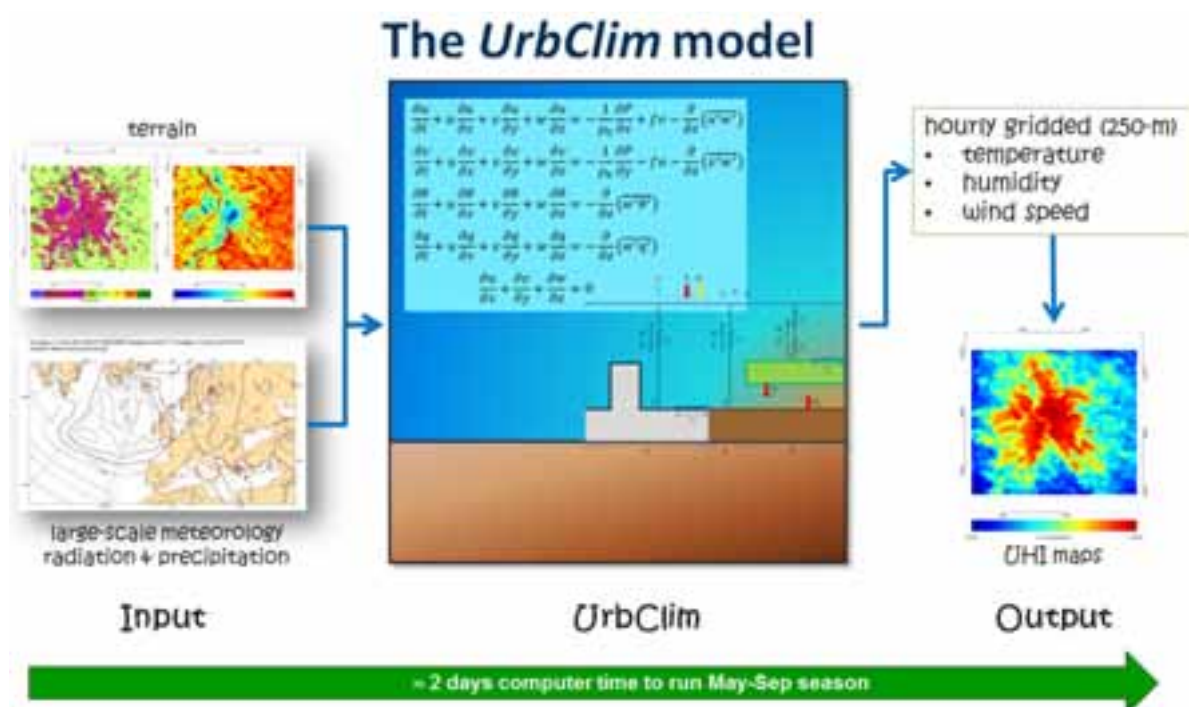
→ Modelbeschrijving

Het URBCLIM model bestaat allereerst uit een “bodem module”, genaamd LAICa (Land Atmosphere Interaction Calculation), origineel ontwikkeld door (Koen De Ridder and Schayes, 1997), die in recente jaren een uitbreiding kende om verstedelijkte oppervlakken in rekening te brengen (Koen De Ridder, 2006; Demuzere et al., 2008; Sarkar and Koen De Ridder, 2010). Deze module berekent de warmtefluxen aan het oppervlak, met andere woorden hoeveel warmte door het stedelijk weefsel aan de atmosfeer wordt afgegeven, maar ook hoeveel warmte in het stedelijk weefsel wordt opgeslagen. We onderscheiden hier in de energiebalans aan het oppervlak :

- *Sensible heat flux (H)*, of voelbare warmte. Door de zon zal het oppervlak (en gebouwen wanden) opwarmen. Door de extra kinetische energie die de moleculen in het oppervlak hebben zal de luchtlaag erboven door botsingen met de moleculen uit het oppervlak eveneens opwarmen. Er ontstaat vervolgens door turbulente menging een netto warmte transport van het warme oppervlak naar de atmosfeer, waardoor de luchttemperatuur toeneemt. Deze voelbare warmte flux kan makkelijk geobserveerd worden in de turbulente wervels die zichtbaar zijn bv. boven heet asfalt. Het is juist deze voelbare warmte flux die in stedelijke omgeving hoger is dan in rurale omgeving zodat deze significant zal bijdragen tot het ontstaan van het CLUHI.
- *Latent heat flux (LE)*. Wanneer de bodem (en vegetatie) een bepaald vochtgehalte heeft zal een deel van de beschikbare energie uit de stralingsbalans op het oppervlak niet gebruikt worden voor het effectief verhogen van de temperatuur, maar voor een faseovergang die vloeibaar water omzet in gasvormig water. Gezien dit niet gepaard gaat met een verhoging van de temperatuur, maar wel energie vergt spreekt men van een latente warmteflux. Deze warmte flux draagt dus niet direct bij tot de opwarming van de atmosfeer (wel wanneer de waterdamp condenseert hogerop in de atmosfeer) en is voornamelijk aanwezig wanneer er veel water in de bodem aanwezig is (typisch na een regenbui).
- *Antropogenic heat flux (A)*. Naast voelbare en latente warmte zal de mens door z’n activiteit ook warmte afgeven aan de omgeving, bijvoorbeeld door de uitstoot van hete uitlaatgassen en warme lucht afkomstig van airco installaties. Dit kan significant bijdragen tot de totale energiebalans. In het URBCLIM model wordt deze antropogene warmte flux geparameteriseerd aan de hand van een CO₂ profiel gemeten in Marseille (Demuzere et al., 2008). Hier werd op basis van CO₂ fluxmetingen een inschatting gedaan van de antropogene warmte. Het profiel werd herschaald voor Antwerpen op basis van de Defense Meteorological Satellite Program – Operational Line Scanner (Elvidge et al, 1999) night lights dataset²⁷. Die brengt de intensiteit van de artificiële verlichting ’s nachts in kaart, wat als proxy kan genomen worden voor de graad van menselijke activiteit in een bepaald gebied.
- *Storage heat flux (G)*. Om de energie balans aan het oppervlak te sluiten dienen we ook rekening te houden met het feit dat een deel van de beschikbare energie in de bodem en de gebouwen zal doordringen en daar de temperatuur verhogen. Ook deze component is significant groter in stedelijke omgeving : er wordt meer energie gestockeerd in het stedelijk weefsel (muren, grond) waardoor die ’s nachts er ook langer over doet om terug te worden afgegeven aan de atmosfeer.

²⁷ <http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/downloadV4composites.html>

Deze bodem module is vervolgens gekoppeld aan een atmosfeer module, die op basis van een beperkt aantal vergelijkingen de transfer van warmte, water en momentum (wind) in de atmosfeer berekent. Deze berekeningen zijn een vereenvoudiging van de typische atmosfeervergelijkingen in een mesoschaal meteomodel, aangezien we hier geen rekening houden met condensatie en neerslagprocessen, hetgeen een significante winst in rekentijd oplevert. We kunnen deze vereenvoudiging doorvoeren omdat dit soort processen zich hoger in de atmosfeer afspelen en minder relevant zijn voor de berekening van het CLUHI, waar het URBCLIM model op focust. Uiteraard is het wel van belang om de effecten van wolken (op de invallende zonnestraling) en neerslag (op het watergehalte in de bodem) mee te nemen in het model, en daarvoor doen we een beroep op de grootschalige patronen, afkomstig uit een globaal of regionaal meteomodel. Deze ruimtelijk ruwe input volstaat voor een correcte berekening van de luchttemperatuur. Een schematische voorstelling van het URBCLIM model is weergegeven in Figuur 70.

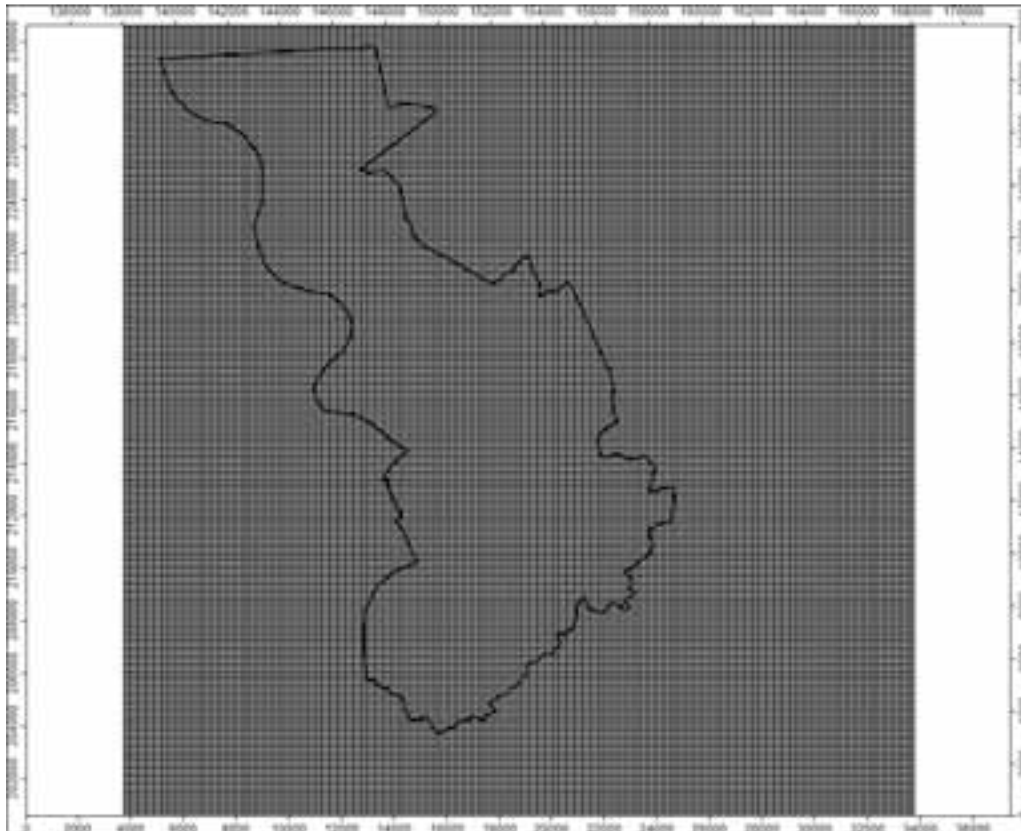


Figuur 70: Schets van de deterministische modellering van stedelijke luchttemperatuur aan de hand van URBCLIM.

In het URBCLIM model wordt de stedelijke atmosfeer opgedeeld in een aantal roostercellen, waarvoor telkens de temperatuur en vochtigheid berekend wordt. Voor Antwerpen hebben we 301 x 301 roostercellen van 100 m in beide horizontale richtingen gebruikt. Voor de verticale richting hebben we 20 telescopische roostercellen gaande van 10 m tot 3 km. Het horizontale grid is hieronder in Figuur 71 afgebeeld. Het atmosferische modelgedeelte zal dus in de onderste laag de voelbare warmte opnemen. Aan de rand van het model domein worden de grootschalige meteorologische condities opgelegd. Dit zijn concreet verticale profielen van windsnelheid en temperatuur. Deze grofmazige randvoorwaarden zijn afkomstig van het globale ECMWF model (www.ecmwf.int) van het Europees weersvoorspellingscentrum te Reading, UK.

Gezien het onderste niveau van het URBCLIM model reeds op 10 m hoogte ligt, is een correctie naar de 2-m temperatuur in de street canyons nodig. De verticale extrapolatie van 10 m naar street canyon luchttemperaturen gebeurt op basis van profiel functies die rekening houden met de

atmosferische stabiliteit. Het correctie schema gaat ervan uit dat de atmosfeer in de urban canopy layer relatief goed en homogeen gemengd is. Deze aanname is op zich niet oninteressant om even te vermelden en wordt door verschillende studies onderbouwd. Nakamura en Oke (1988) observeerden slechts heel kleine luchttemperatuurgradiënten in de canopy layer zolang de meetlocatie niet té dicht bij het oppervlak was. In street canyon metingen in Basel, Zwitserland werd aangetoond dat de luchttemperatuur aan de top van de canyon redelijk representatief is voor de waarden in de street canyon (Rotach et al., 2005). En uit meer gedetailleerde CFD model berekeningen in een geïdealiseerde street canyon vonden Solazzo en Britter (2007) dat de luchttemperatuur nagenoeg uniform was, behalve een dunne laag direct aan de gebouwenwand.



Figuur 71: Afbeelding van het model grid gebruikt voor de modellering in Antwerpen. Het grid telt 301 x 301 roosterzellen van 100m. Het model bevat voorts ook 20 verticale niveaus gaande van 10 m tot 3 km hoogte. Het model werkt in Belgische Lambert 72 coördinaten.

→ Databronnen

Zoals reeds aangehaald heeft het URBCLIM model uiteraard een aantal databronnen nodig. We overlopen hieronder even de belangrijkste:

Landgebruiksinformatie

Allereerst heeft de bodem module informatie nodig over het landgebruik. LAICa werkt met een aantal vaste landgebruiksklassen:

- Urban: de echte stadskern
- Sub-urban : eerder discontinue bebouwing, voorstedelijk gebied
- Industrial zones
- Snow/Ice
- Water
- Bare Soil
- Grass
- Crop
- Shrub
- Woodland
- Broadleaf
- Needleleaf

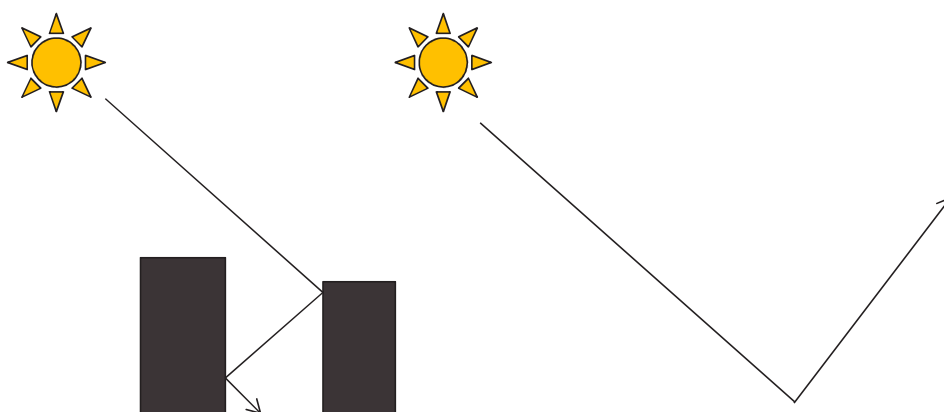
Aan elk van deze klassen worden eigenschappen toegekend die gebruikt worden in het opstellen van de stralingsbalans : dit zijn albedo (fractie gereflecteerde zonnestraling), de emissiviteit (verhouding van de intensiteit van uitgestraalde langgolvlige straling t.o.v. een ideale zwarte straler) en de ruwheidslengte voor momentum.

Tabel 12: Tabel met gebruikte waarden in de URBCLIM modellering voor albedo, emissiviteit en ruwheidslengte (voor momentum). Voor albedo en emissiviteit wordt telkens een waarde opgegeven voor vegetatie en voor afwezigheid van vegetatie. Deze waarden zijn representatief voor gridcellen van de desbetreffende LAICa klasse in de veronderstelling dat die volledig door vegetatie bedekt is, of anderzijds er geen vegetatie aanwezig is. De in het model gebruikte waarde zal dan het aan de hand van de voorkomende fractie vegetatie gewogen gemiddelde tussen beide zijn.

LAICa klasse	Albedo		Emissiviteit		Ruwheids- lengte
	Vegetatie	Geen vegetatie	Vegetatie	Geen Vegetatie	z_{0m} [m]
Urban	0.15	0.12	0.98	0.95	1.5
Sub-urban	0.15	0.15	0.98	0.95	0.5
Industrial	0.15	0.15	0.98	0.95	0.3
Snow/Ice	0.00	0.70	0.00	0.98	0.001
Water	0.00	0.05	0.00	0.99	0.0001
Bare soil	0.20	0.15	0.98	0.98	0.01
Grass	0.20	0.15	0.98	0.98	0.05

Crop	0.20	0.15	0.98	0.98	0.1
Shrub	0.15	0.15	0.98	0.98	0.1
Woodland	0.15	0.15	0.98	0.98	0.5
Broadleaf	0.15	0.15	0.98	0.98	1.2
Needleleaf	0.12	0.15	0.98	0.98	1.2

Het is belangrijk op te merken dat we hier een duidelijk onderscheid maken tussen de karakteristieken voor de vegetatie en voor de niet-gevegeteerde oppervlakken. De toegewezen albedo wordt per gridcel op basis van de fractie vegetatie in de rooster cel herberekend. Op deze manier kan rekening gehouden worden met de veranderende vegetatie fractie in de loop van een zomerseizoen en de impact hiervan op bijvoorbeeld de albedo van het oppervlak. De fractie vegetatie wordt door satelliet data bepaald zoals hieronder is aangegeven. Ook is het belangrijk op te merken dat dit geaggregeerde grootheden zijn. De albedo waarden zijn karakteristieke waarden voor algemeen stedelijk gebied. Gezien we in de URBCLIM modellering geen expliciete gebouwen of materialen specificeren, dienen we de albedo als eigenschap van het stedelijk oppervlak op 100 m resolutie toe te kennen. Derhalve dienen we dus effectieve waarden op te geven die dus ook rekening houden met geometrische effecten. Het is namelijk zo dat de smalle straten en street canyons in stedelijke omgeving ervoor zorgen dat er minder kortegolf straling gereflecteerd wordt dan men puur op basis van de gebruikte materialen (bv. beton) zou verwachten. De *effectieve* albedo van een stad is bijgevolg lager, onderstaande Figuur 72 probeert dit iets grafischer uit te drukken.

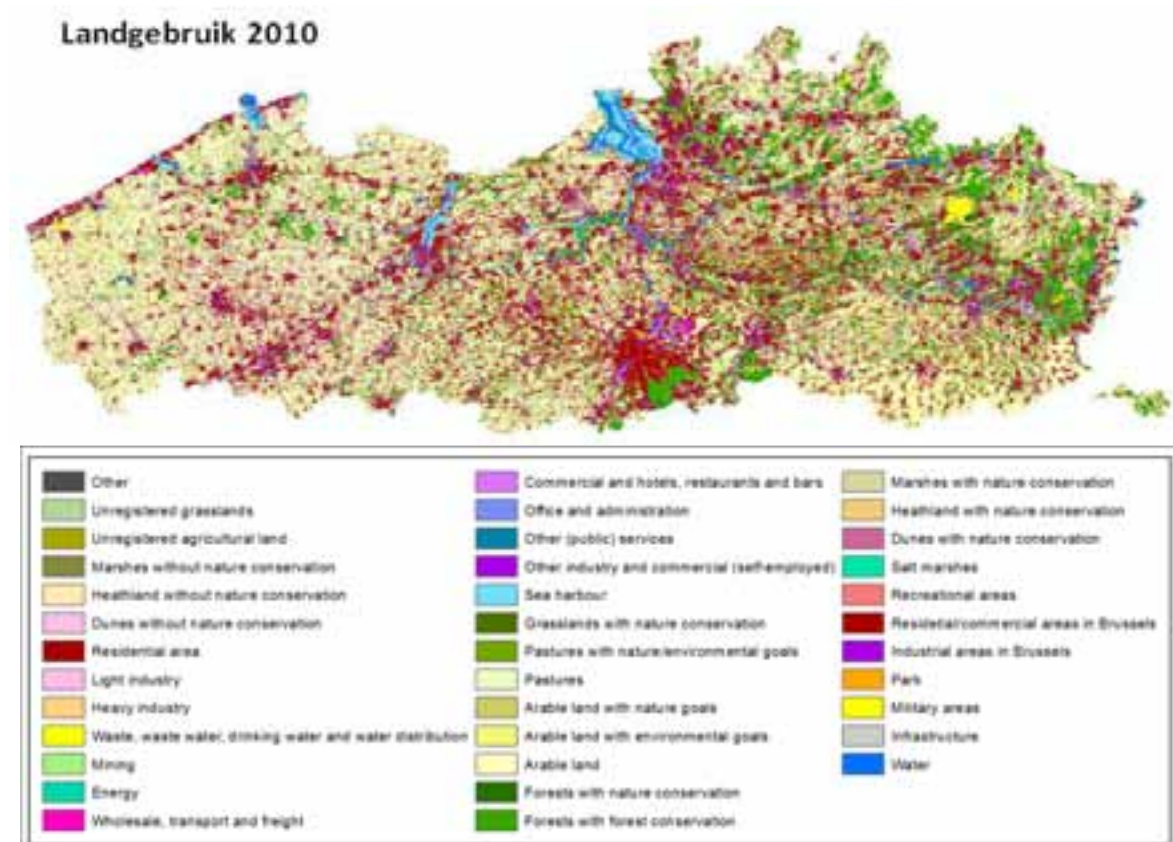


Figuur 72: Schematische voorstelling van de verlaagde effectieve albedo in stedelijke omgeving.

De ruwheidslengte is tenslotte een maat voor hoe “ruw” het oppervlak is. Deze wordt in de modellering gebruikt om het afremmen van het windveld boven de stad te simuleren.

Standaard worden in het URBCLIM model de landgebruiksklassen gedefinieerd op basis van de EEA CORINE dataset. In deze studie echter hebben we geopteerd om te werken met de landgebruikskaarten die in VITO geproduceerd zijn in het kader van de studie : *De Vlaamse Ruimte in 4 Wereldbeelden*, Guy Engelen, Lien Poelmans, Inge Uljee, Jean-Luc de Kok en Leen Van Esch Studie uitgevoerd in opdracht van: Steunpunt Ruimte en Wonen VITO Ref: 2011/RMA/R/363 December 2011. Onderstaande figuur toont de huidige situatie in Vlaanderen. We kozen voor deze kaart omdat we verderop in deze studie (Hoofdstuk 8) ook een toekomst prognose zullen

doorrekenen (waarvoor geen CORINE data beschikbaar zijn) en we daarvoor van dezelfde basiskaart dienen te vertrekken om de vergelijking te kunnen maken.



Figuur 73: Afbeelding van de landgebruiksklassen in Vlaanderen van Engelen et al. (2011).

Zoals reeds beschreven maakt het URBCLIM model gebruik van een 12-tal landgebruiksklassen, in tegenstelling tot de meer gedetailleerder opdeling van Engelen et al. (2011). We dienen hier dus m.a.w. een vertaling te doen van de klassen uit het ruimtelijk dynamisch model naar de URBCLIM klassen. Deze vertaling is hieronder aangegeven. Voor het overgrote deel van de klassen is dit relatief eenvoudig. We merken wel op dat in het landgebruik van Figuur 73 geen onderscheid gemaakt wordt tussen continu en discontinue stedelijk gebied. Er is slechts 1 enkele klasse met “Residential Area”. De opdeling naar functionaliteit is weliswaar iets gedetailleerder, maar naar morfologie van het stedelijk weefsel toe is die minder aanwezig. Het centrum van Antwerpen werd op basis van CORINE overschreven als continu verstedelijkt gebied, terwijl de overige klassen van het ruimtelijk dynamisch model als “sub-urban” dan overgehouden zijn.

Tabel 13: Mapping van de klassen tussen het dynamisch landgebruiksmodel van Engelen et al. (2011) en de LAICa landgebruiksklassen in de URBCLIM modellering.

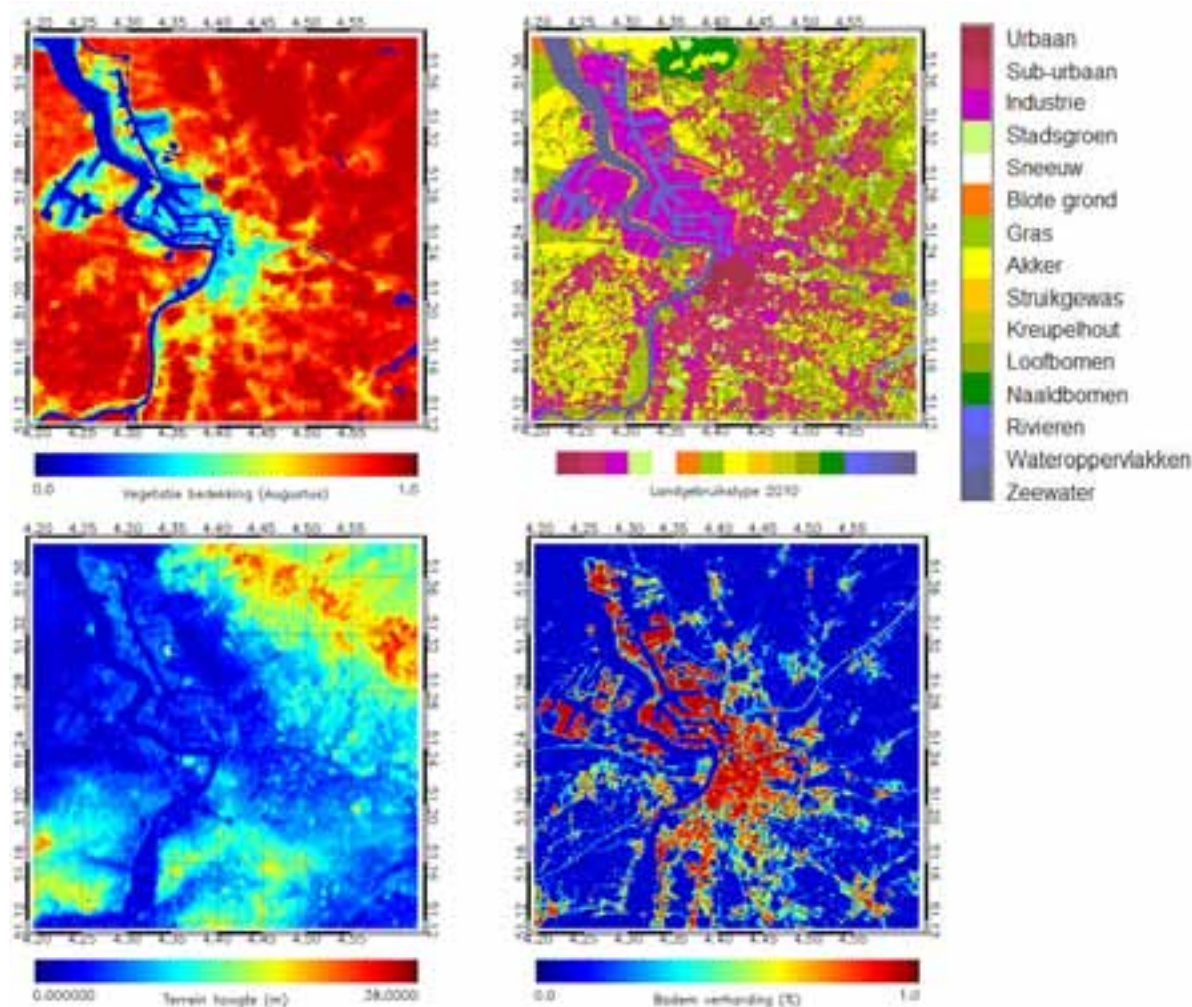
LAICa klasse	Beschrijving	Klassen dynamisch landgebruiksmodel
1	Urban	Overgenomen uit CORINE
2	Sub-urban	6, 31, 12, 13, 14, 15, 30
3	Industrial	0, 7, 8, 9, 10, 11, 16, 17, 32, 35
4	Snow/ice	n/a
5	Water	36
6	Bare soil	5, 28, 29, 34
7	Grass	1, 18, 19, 20
8	Crop	2, 21, 22, 23
9	Shrub	3, 4, 26, 27
10	Woodland	n/a
11	Broadleaf	24, 25, 33
12	Needleleaf	n/a

Andere oppervlakte parameters

Zoals reeds gemeld is een belangrijke parameter in de URBCLIM modellering de fractie vegetatie. Deze wordt afgeleid op basis van onafhankelijke satelliet gegevens afkomstig van het MODIS instrument (<http://glcf.umd.edu/data/ndvi/>). Een vegetatie fractie van 1 houdt in dat een gridcel volledig door vegetatie bedekt is, 0 houdt in dat er geen vegetatie of groen aanwezig is in die gridcel. Gezien de fractie vegetatie in de loop van een seizoen significant kan veranderen is het niet onbelangrijk deze parameter dynamisch in het model mee te nemen. In URBCLIM gebeurt dit op maandelijkse basis.

Naast het landgebruik en de fractie vegetatie wordt in de modellering verder ook nog gebruik gemaakt van de fractie sealed surface, gebaseerd op de karakteristieke waarden die in de CORINE (EEA) dataset gegeven worden. De terrein hoogte voor Antwerpen is geïnterpoleerd uit de GTOPO30 dataset (<http://www1.gsi.go.jp/geowww/globalmap-gsi/gtopo30/gtopo30.html>)

Een ruimtelijk beeld van de verschillende parameters voor de modellering van Antwerpen is weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 74 : Karakterisatie van het oppervlak voor de URBCLIM modellering.

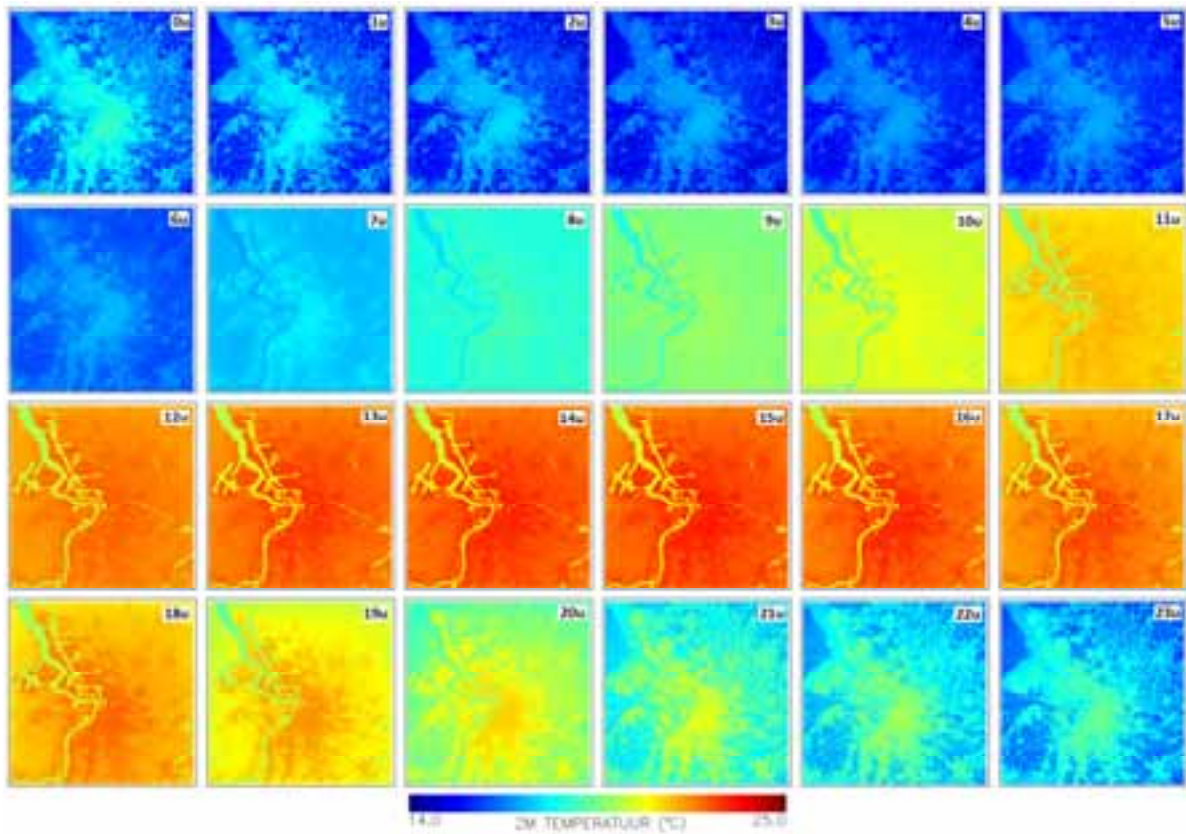
Grootschalige meteorologische informatie

Zoals reeds vermeld worden aan de instroomrand van het model domein profielen van windsnelheid en temperatuur uit het ECMWF model (www.ecmwf.int) opgelegd om de grootschalige meteorologische condities in het model in te brengen. Op die manier wordt in de modellering voor Antwerpen rekening gehouden met de veranderende windsnelheid en windrichting, maar ook grootschalige temperatuur variaties en passage van bv. koude of warme fronten gedurende de periode van de simulatie. Het is belangrijk hier te vermelden dat het URBCLIM model omwille van de vereenvoudigingen die zijn gehanteerd, niet in staat is om het effect van een stad op de lokale circulatie mee te nemen (bv. zogenaamde urban breeze). De redenen hiervoor zijn nogal technisch van aard. Uiteraard is het wel zo dat processen zoals het transport van warme lucht wind afwaarts van de stad en de mengingen van warme lucht met de hogere luchtlagen wel in rekening gebracht worden in de modellering.

Het is tot slot belangrijk om op te merken dat het URBCLIM model generiek is en werkt met vrij beschikbare databronnen. Hierdoor is het makkelijk inzetbaar voor verschillende steden. Een volledige, gedetailleerde beschrijving van het URBCLIM model is beschikbaar in De Ridder et al. (2013).

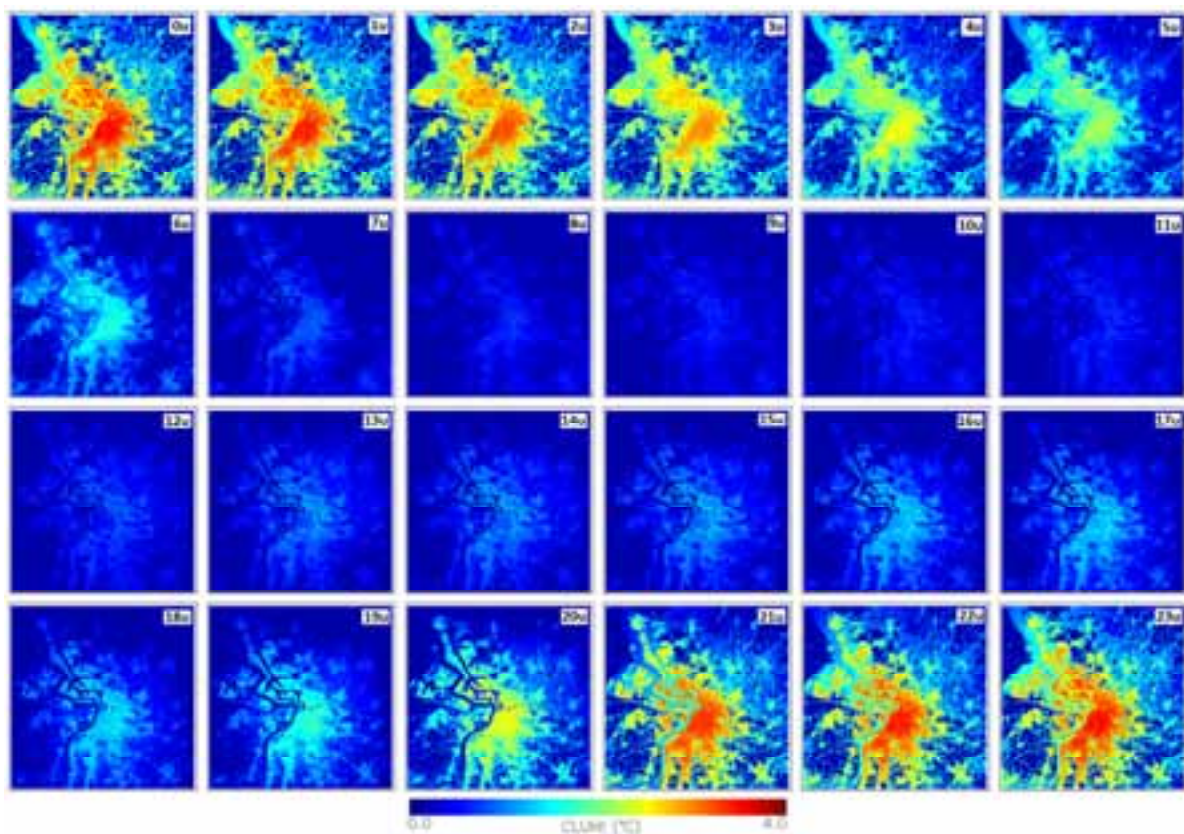
5.1.3. RESULTATEN VAN DE LUCHTTEMPERATUUR MODELLERING

In deze sectie beschrijven we de resultaten van de modellering voor Antwerpen. Als eerste resultaat beelden we in onderstaande figuur de gemiddelde luchttemperatuur per uur van de dag voor de periode juli-augustus af, beginnende om middernacht. Dit wil zeggen dat we per uur de luchttemperatuur uitmiddelen over alle dagen van de zomer, maar wel telkens op het beschouwde uur.



Figuur 75: Gemiddelde luchttemperatuur per uur van de dag over de zomer van 2013 (juli en augustus) in Antwerpen. De figuren starten om middernacht.

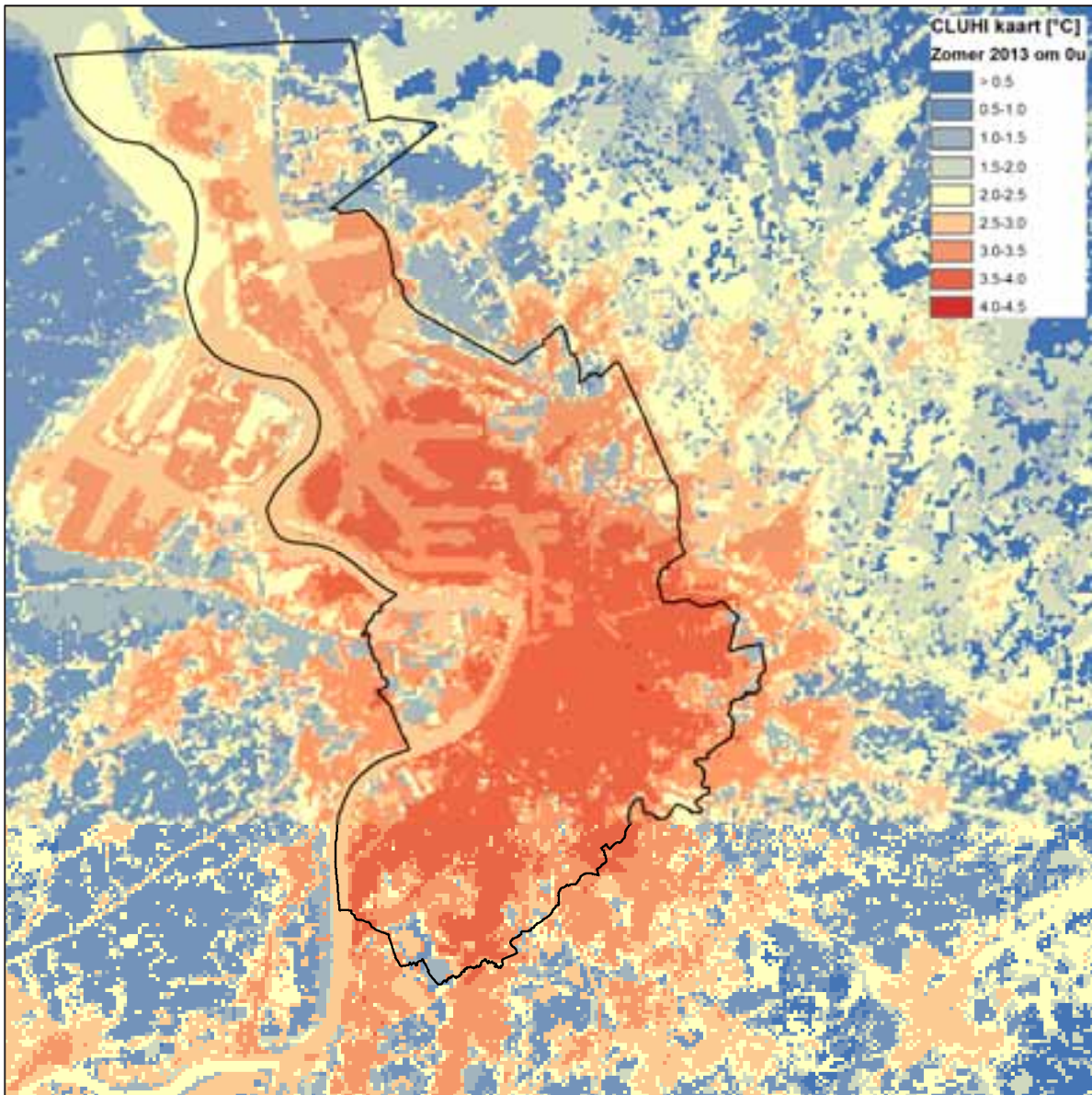
We zien eerst en vooral duidelijk de dagcyclus met een gemiddelde nachtelijke temperatuur rond de 15 °C en een gemiddelde dagtemperatuur rond de 25 °C. We zien ook relatief duidelijk het feit dat, vooral 's nachts, het centrum van de stad iets warmer is, een effect dat bijvoorbeeld in de gemiddelde temperatuur rond 09:00h verdwijnt en de stad niet langer duidelijk afgetekend is t.o.v. de rurale omgeving inzake luchttemperatuur. Dit wordt nog duidelijker geïllustreerd wanneer we de effectieve CLUHI intensiteit gaan weergeven zoals hieronder in Figuur 76.



Figuur 76: Gemiddeld CLUHI(als temperatuurverschil tussen de stad en de mediane temperatuur van het omliggende platteland) per uur van de dag over de zomer van 2013 (juli en augustus) in Antwerpen. De figuren starten om middernacht.

In deze figuur hebben we dezelfde uitmiddeling gedaan als hierboven, maar we hebben wel telkens de rurale referentie temperatuur afgetrokken en dus enkel weergegeven hoeveel warmer de lucht is in de stedelijke omgeving t.o.v. de rurale omgeving. We merken dus duidelijk dat ook uit de modellering, net als uit de metingen, volgt dat het CLUHI effect het meest uitgesproken is rond middernacht met een intensiteit in het centrum van Antwerpen van gemiddeld zo'n 3 à 4°C. Gedurende de nacht verliest de stad geleidelijk aan haar warmte, en het CLUHI bereikt een minimum rond 9 à 10u 's morgens. Onder invloed van de zon warmt de stad overdag terug op. Naar mate de namiddag vordert wordt de opgeslagen warmte in de stad afgegeven aan de lucht en vergroot opnieuw het verschil met de omliggende rurale gebieden en rond 21u lokale tijd bereikt het CLUHI terug z'n volledige intensiteit. Hoewel deze temperatuurverschillen een heel stuk kleiner zijn dan de verschillen in stralingstemperatuur, hebben ze toch een groter effect op de menselijke gezondheid, waarover later meer.

Op onderstaande Figuur 77 is de kaart met de gemiddelde intensiteit om middernacht, wanneer het CLUHI effect het meest uitgesproken is, nogmaals afgebeeld.



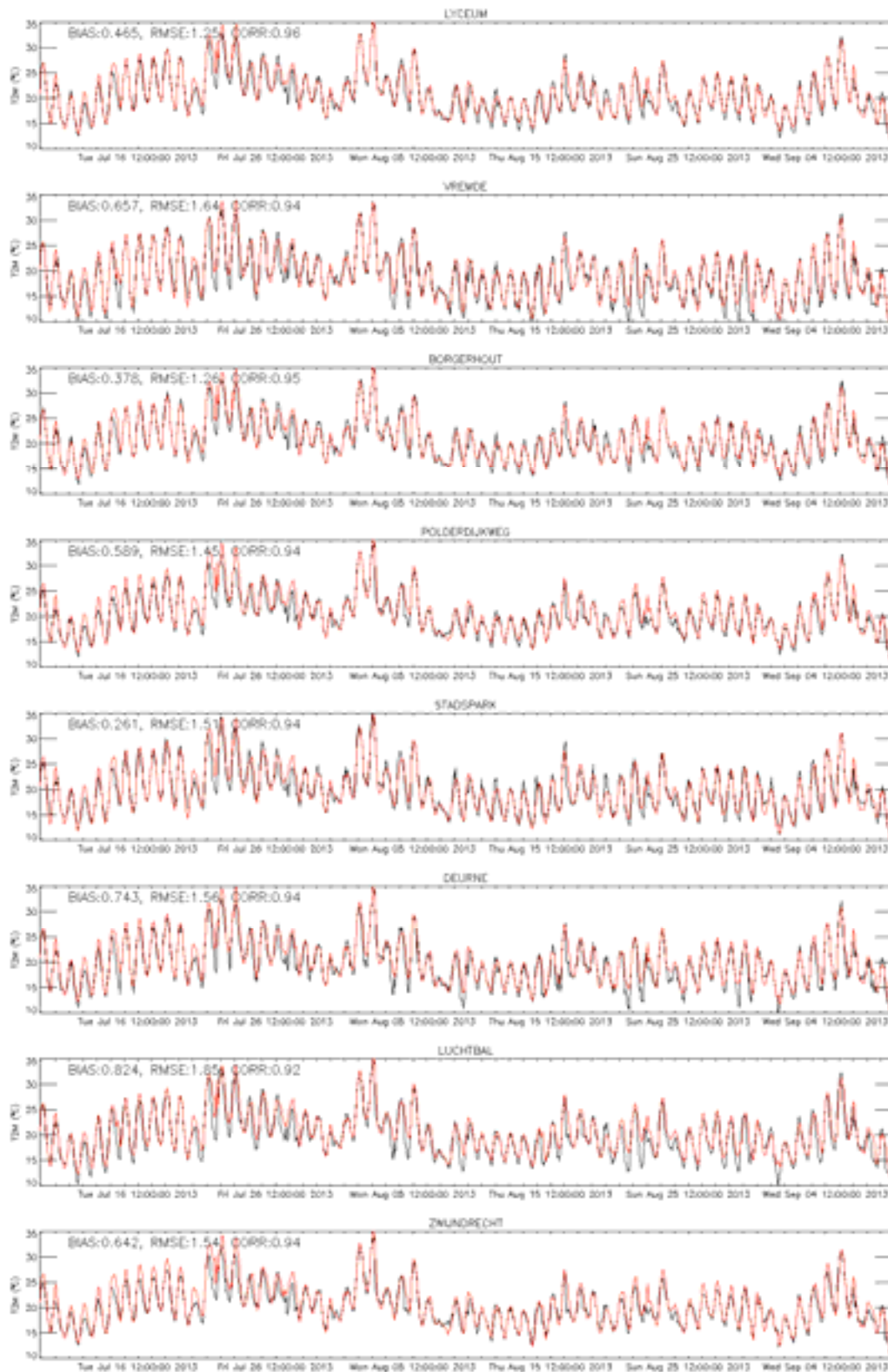
Figuur 77: Uitvergroting van de gemiddelde CLUHI intensiteit voor Antwerpen voor de zomer van 2013 (juli en augustus) om 00:00h lokale tijd op basis van de URBCLIM modellering op 100 m.

5.2. VALIDATIE VAN DE MODELBEREKENINGEN

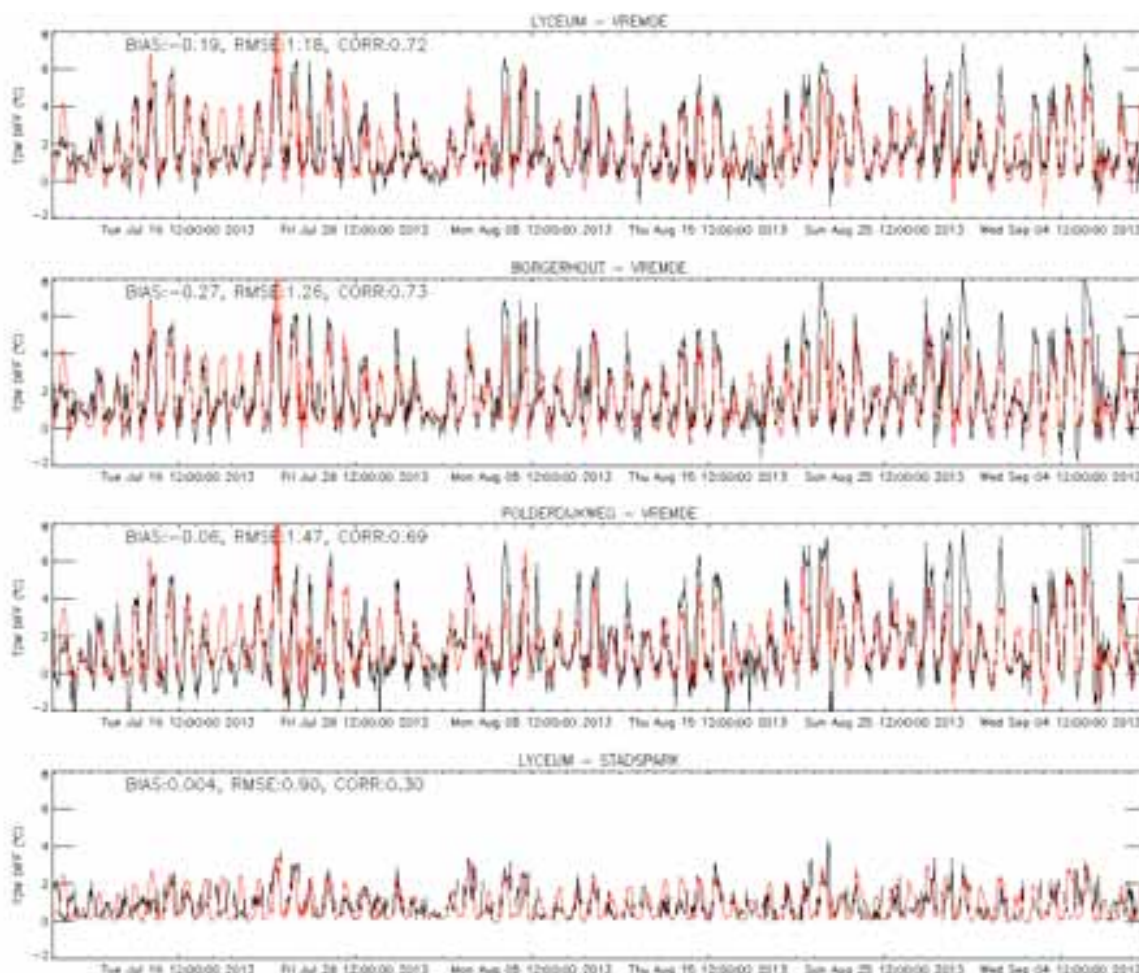
Vooraleer verder te gaan met de afgeleide modelresultaten die we op basis van deze dataset met stedelijke luchttemperatuur kunnen berekenen, zullen we eerst even stilstaan bij de validatie van deze modelresultaten. Uiteraard heeft deze modelmatige aanpak z'n beperkingen en is het cruciaal om de kwaliteit van deze modelberekeningen te analyseren. We doen dit op basis van de in-situ metingen uit de in Hoofdstuk 2 besproken meetcampagne.

5.2.1. TEMPORELE VALIDATIE LUCHTTEMPERATUUR EN CLUHI EFFECT

Eerst en vooral vergelijken we de tijdsreeksen van de gemeten luchttemperaturen en het CLUHI effect. Dit is in volgende figuren afgebeeld, met telkens de **observaties** in het **zwart** en de resultaten van het **URBCLIM** model in het **rood**. Als validatie periode nemen we de periode van 9 juli tot 9 september 2013. Voor deze periode hebben we data van elke meetstation beschikbaar. Op de figuren zijn telkens ook de bijhorende foutstatistieken vermeld: bias (verschil tussen de gemiddeldes), de Root Mean Square Error (RMSE) en de correlatie coëfficiënt.



Figuur 78: Vergelijking van de tijdsreeksen van de gemeten en gemodelleerde luchttemperatuur.



Figuur 79: Analoge figuur als hierboven, maar ditmaal vergelijken we de tijdsreeksen van de temperatuurverschillen (CLUHI effect) t.o.v. de rurale locatie aan de bioboerderij in Vremde.

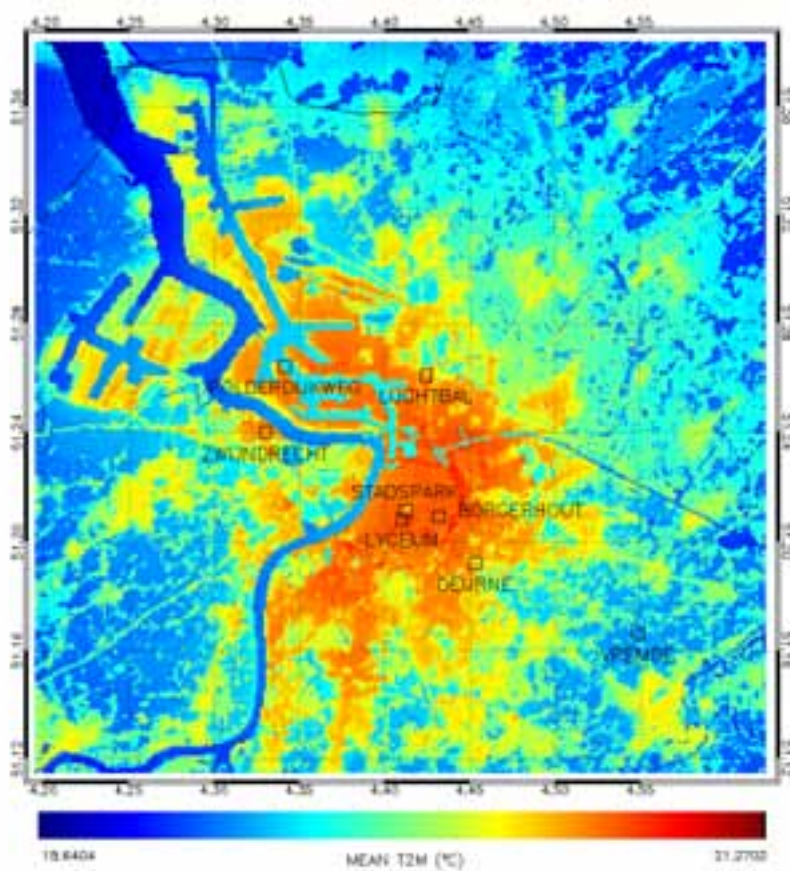
We zien eerst en vooral dat de luchttemperatuur op de verschillende meetlocaties goed wordt weergegeven in het URBCLIM model. Dit is echter in hoofdzaak een verdienste van het grootschalig meteorologisch model (ECMWF) dat we gebruikten om als randvoorwaarden aan de instroom van ons URBCLIM model op te leggen. De echte verdienste van het URBCLIM model ligt er natuurlijk in om het temperatuurverschil tussen een rurale en stedelijke locatie goed weer te geven. Dit is in Figuur 80 weergegeven voor de periode 9 juli – 9 september 2013. We zien dat de gemiddelde fout in het temperatuurverschil tussen rurale en stedelijke meting (BIAS) voor alle stations relatief laag is ($<0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$), wat zeker positief is. Ook de correlatie coëfficiënt (CORR) is voor dit type modellering behoorlijk goed te noemen. Het URBCLIM model slaagt er in om 50 % ($=R^2$) van de temporele variabiliteit van het UHI effect in Antwerpen te verklaren, met uitzondering van het stadspark, maar dat kan deels verklaard worden door de problemen met de metingen die daar zijn geweest (zie Hoofdstuk 2). De RMSE bedraagt voor alle stations minder dan 1.5°C , hetgeen een prima resultaat is voor de modellering van het CLUHI.

We willen er hier nogmaals op wijzen dat deze goede resultaten ook te danken zijn aan de goede en consistente metingen die hier zijn verricht. Dat is geen evidentie, hebben we al in andere steden gemerkt. Het is duidelijk dat een consistente meetmethode belangrijk is en dat kleine afwijkingen in sensor respons door bv. een grotere effectieve warmtecapaciteit van de sensor of een andere

manier van ventilatie direct zichtbaar worden wanneer men het temperatuurverschil beschouwt. En dan wordt een vergelijking met modelresultaten uiteraard sterk bemoeilijkt.

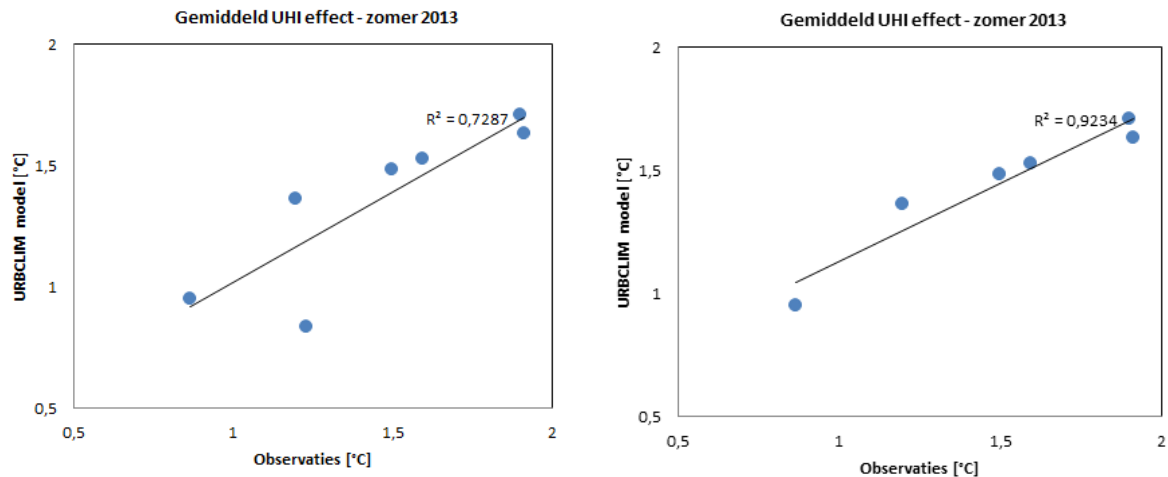
5.2.2. RUIMTELIJKE VALIDATIE LUCHTTEMPERATUUR EN CLUHI EFFECT

Naast een temporele validatie is uiteraard een ruimtelijke validatie ook een belangrijk onderdeel van de model evaluatie. We willen namelijk weten hoe goed het URBCLIM model het ruimtelijk patroon van de gemeten luchttemperatuur in Antwerpen kan verklaren. Onderstaande figuren tonen een validatie van het ruimtelijk patroon, voor de eenvoud herhalen we even een kaart die de locatie van de verschillende metingen aangeeft.

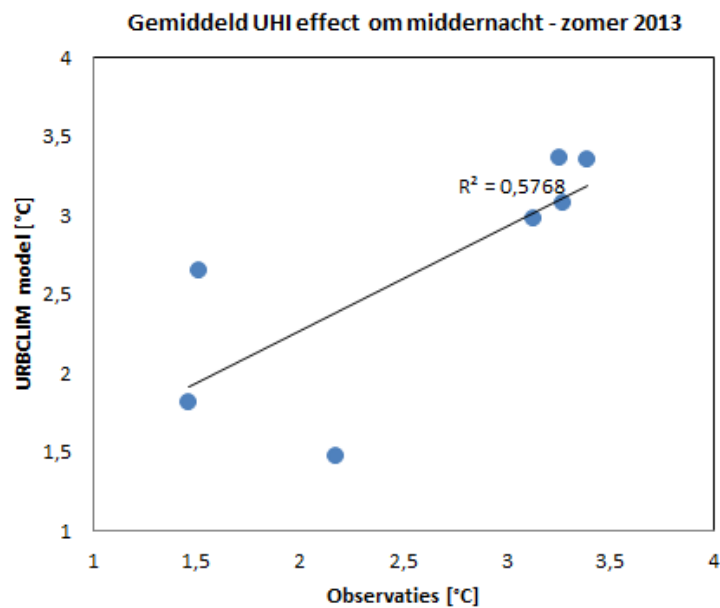


Figuur 80: Illustratie van de locatie van alle meetstations met als achtergrond de gemiddelde luchttemperatuur voor de validatieperiode (9 juli – 9 september 2013).

Onderstaande figuren geven een XY diagram weer dat de gemiddelde gemodelleerde CLUHI intensiteit voor de validatieperiode uitzet t.o.v. de geobserveerde waarden. In de tweede figuur is dit enkele voor middernacht weergegeven, in de eerste figuur onafhankelijk van het uur van de dag. In Tabel 14 zijn enkele validatie statistieken opgenomen die kwantificeren in hoeverre het model erin slaagt de ruimtelijke verdeling van het gemeten CLUHI effect in Antwerpen in kaart te brengen.



Figuur 81: Vergelijking van het gemiddelde CLUHI effect (t.o.v. Vremde) tijdens de zomer van 2013, onafhankelijk van het moment van de dag. De symbolen stellen telkens per meetlocatie de gemiddelde CLUHI intensiteit voor. De linkse figuur bevat het datapunt van het stadspark, de rechtse figuur niet.



Figuur 82: Analoog als hierboven, maar ditmaal beperken we ons tot het nachtelijk CLUHI effect alleen.

Tabel 14: Validatie statistieken voor de ruimtelijke validatie van het CLUHI.

Ruimtelijke Validatie URBCLIM	R^2	RMSE	BIAS
Gemiddeld CLUHI	0.73	0.56 °C	-0.10 °C
Gemiddeld CLUHI (zonder stadspark)	0.92	0.39 °C	-0.04 °C
CLUHI s' nachts	0.58	1.40 °C	0.07 °C

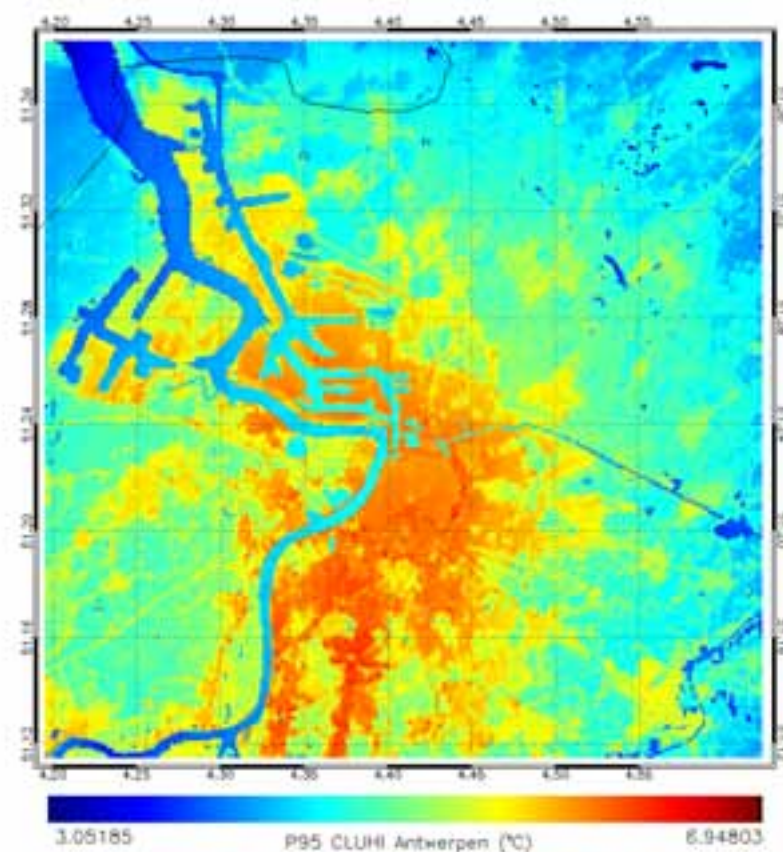
We merken uit de grafieken en uit de tabel eerst en vooral dat de ruimtelijke correlatie coëfficiënt (R^2) bevredigend hoog is. Vooral het gemiddeld CLUHI effect wordt uitstekend gereproduceerd door het model, zeker wanneer we het stadspark uit de analyse weglaten (omwille van de problemen hiervoor aangehaald). In dat geval wordt dik 90 % van de ruimtelijke variabiliteit door het model verklaart. Indien we ons beperken tot de nacht, dan zien we dat deze verklaarde variantie een beetje terugvalt tot 60%, in hoofdzaak te wijten aan twee afwijkende punten, namelijk het stadspark en Luchtbal. We zien voor beide stations niet direct een reden voor deze deviatie, daarvoor zou een dieper gravende analyse nodig zijn, maar daarvoor ontbreekt ons de tijd in het kader van dit rapport. Desalniettemin kunnen we toch stellen dat het UrbClim model uitstekend presteert in de regio Antwerpen, en kunnen we de resultaten van het model vol vertrouwen gebruiken in verdere analyses.

Uiteraard is met deze validatie studie niet alles gezegd over de kwaliteit van de modellering. Het zou bijvoorbeeld nu ook interessant zijn om de model output te vergelijken met de resultaten van de mobiele metingen, of na te gaan of de directionaliteit die we tijdens de meetcampagne bestudeerden getrouw wordt weergegeven door de modelresultaten. Hiervoor was er binnen het kader van deze rapportage echter geen ruimte meer.

5.3. BESPREKING AFGELEIDE GROOTHEDEN

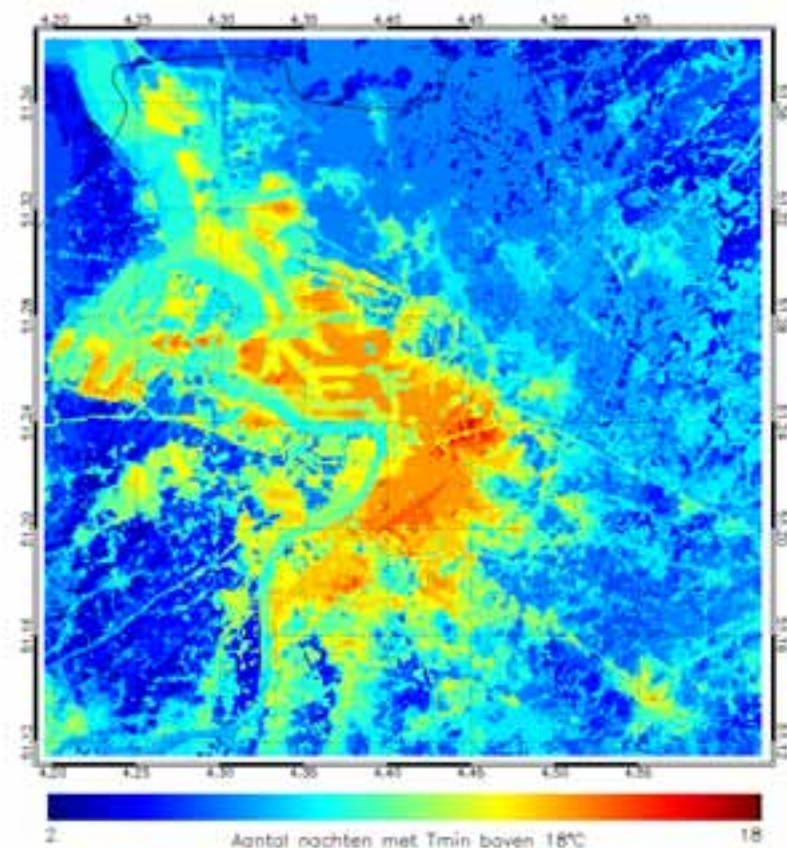
Nu we een goed idee hebben van de kwaliteit van onze URBCLIM model resultaten is het tijd om de meerwaarde van dergelijke deterministische modellering met uurlijkse luchttemperatuurvelden ten volle uit te buiten. Die meerwaarde zit naast scenario analyses en toekomstprojecties uiteraard in het feit dat we over een volledige tijdsreeks beschikken waar we allerlei grootheden kunnen van afleiden.

We beginnen in Figuur 83 met het gemodelleerde 95^{ste} percentiel van de UHI intensiteit gedurende de volledige zomer (Juli-Augustus) van 2013. We merken een intensiteit van een 5-6 °C in het centrum van Antwerpen en de zuidkant van de haven. Dit komt bijzonder goed overeen met de 95^{ste} percentielwaarde van de metingen daar (zie Hoofdstuk 2), hetgeen het vertrouwen in de resultaten van het model nog wat versterkt. In het zuiden van Antwerpen zien we ook erg hoge waarden in de dicht bebouwde omgeving van de A12 en de lintbebouwing langs de N148 richting Hemiksem en Schelle. Dit kan ermee te maken hebben dat we vrij veel noordenwind hebben gehad tijdens deze zomer, waardoor deze gebieden in de 'hitte-schaduw' van Antwerpen lagen op momenten met een hoge CLUHI-intensiteit. Op de gemiddelde CLUHI-kaart scoren deze gebieden toch net iets minder hoog dan het centrum.



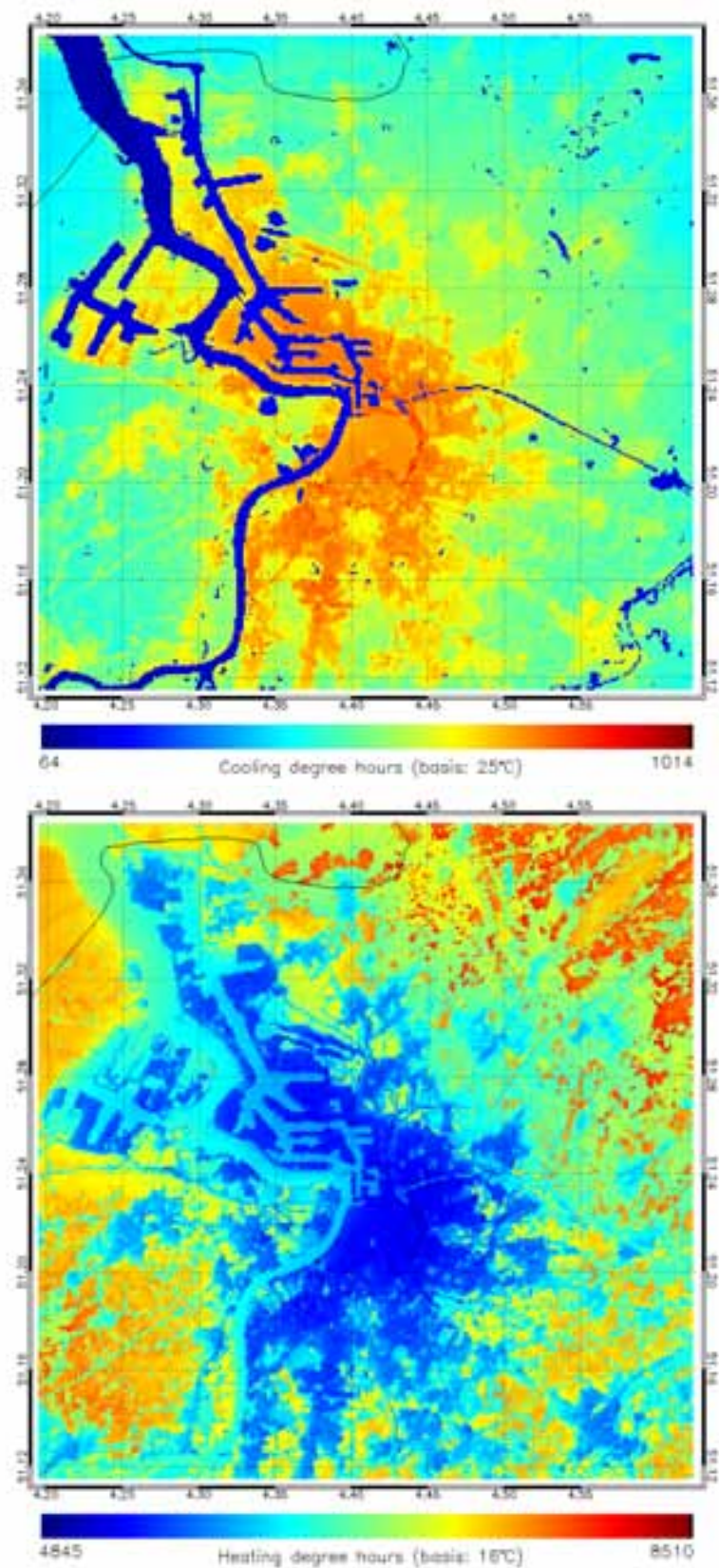
Figuur 83: 95^{ste} percentiel van de UHI intensiteit voor Antwerpen gedurende de zomer 2013 (Juli - Augustus).

Een tweede interessante berekening is die van de nachtelijke minimum temperatuur. In Figuur 84 hieronder is het aantal dagen dat de minimum temperatuur niet onder de 18 °C zakte, het aantal dagen met terrasjesweer gedurende heel de nacht met andere woorden. We zien uit de modellering dat het aantal dagen met een nachtelijk minimum boven de 18 °C een erg duidelijk patroon vertoont. In het centrum zijn er maar liefst twee weken langer “terrasjesweer” in de zomer dan in het platteland errond, waar zo een situatie erg uitzonderlijk is. Vooral in de centrale wijken is dit een leuke insteek naar de toeristische sector. We dienen er wel bij te vermelden dat dergelijke overschrijdingsindicatoren relatief gevoelig zijn en dat dit resultaat met enige voorzichtigheid dient benaderd te worden.

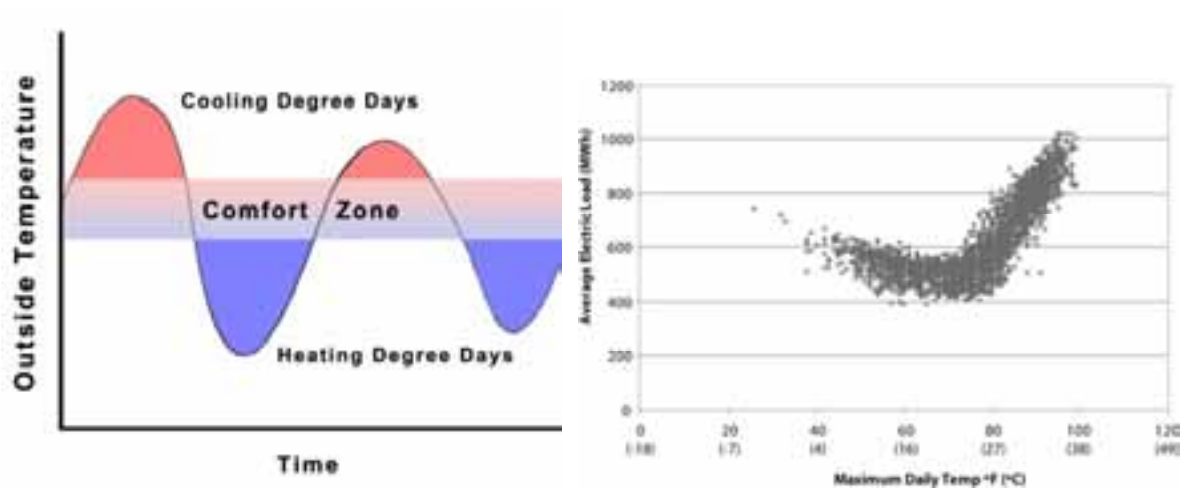


Figuur 84: Berekeningen omtrent de nachtelijke minimum temperatuur gedurende de zomermaanden van 2012.

In onderstaande figuur zijn de zogeheten cooling en heating degree hours afgebeeld, respectievelijk CDH en HDH. Dit zijn de seizoenale equivalenten van de misschien beter gekende “graad-dagen”. Het aantal CDH is het totaal aantal graad-uren boven een bepaalde drempel, die we als 25 °C nemen, waarboven mensen typisch airco installaties gaan gebruiken en dus energie verbruiken voor koeling. Het aantal HDH is dan weer het aantal graad-uren onder een bepaalde drempel, we namen 16 °C hier, wanneer mensen dan weer typisch verwarmingsinstallaties aanzetten en dus energie verbruiken om de huizen op te warmen. Onderstaande Figuur 86 geeft dit grafisch weer. De link met energie consumptie wordt wel meestal bestudeerd als functie van het aantal graaddagen op jaarbasis (waarbij meestal enkel met minimum en maximum temperatuur gewekt wordt voor de berekeningen) en gezien er geen gedetailleerde en ruimtelijk expliciete data hiervoor beschikbaar was, kunnen we in het kader van dit project deze link moeilijk verder in detail exploiteren. De eenvoudige analyse echter toont al onmiddellijk aan dat er hoewel de temperatuurverschillen tussen stad en platteland al bij al nog redelijk beperkt zijn (in de orde van een 3 à 4-tal graden gemiddeld ‘s nachts), zien we toch in het aantal graad-uren een heel uitgesproken verschil tussen de stad en het omringende platteland. Ook naar de HDH, hoewel misschien minder relevant in het zomer seizoen, merken we een heel uitgesproken verschil.



Figuur 85: Cooling degree hours en heating degree hours : Het totaal aantal graad-uren boven de 25 °C, gelinkt aan energieverbruik voor koeling (airco), en het aantal graad-uren onder de 16 °C, gelinkt aan energieverbruik voor verwarming.



Figuur 86: Links: Grafische voorstelling van cooling en heating degree days. Bron: <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/temperature>, rechts: energie verbruik als functie van de dagelijkse maximum temperatuur in New Orleans (Sailor en Muñoz, 1997).

HOOFDSTUK 6. POTENTIËLE IMPACT

Joris Aertsens en Dirk Lauwaet - VITO

6.1. INLEIDING

In dit hoofdstuk geven we een literatuuroverzicht van de mogelijke gevolgen van het SHE. In eerste instantie denken velen vooral aan de negatieve impact op gezondheid en zelfs het verband met (voortijdige) overlijdens. In dit hoofdstuk besteden we hier ook het meeste aandacht aan. Er zijn echter ook andere effecten waar we korter op ingaan, zoals de relatie tussen het SHE en een verhoogd energieverbruik voor koeling (airco), faling van infrastructuur (bv. koelwater, spoorwegen, ...). Ook enkele positieve impacts van het SHE worden kort besproken, met name het verlengde groeiseizoen tot 10 km rond steden en een mogelijke positieve impact op de omzet op de Antwerpse terrasjes.

6.2. GEZONDHEID EN WELZIJN

Het SHE heeft een invloed op het welzijn en de gezondheid. De negatieve impact van het milieu op ziektelast en voortijdige overlijdens wordt vaak uitgedrukt in DALY (*Disability Adjusted Life Year*). DALYs staan voor de potentieel verloren gezonde levensjaren door ziekte (morbiditeit) of voortijdige overlijdens (mortaliteit). Buekers et al. (2012), bestudeerden recent de ziektelast te wijten aan 18 milieufactoren in Vlaanderen. De totale ziektelast in Vlaanderen van deze milieufactoren komt jaarlijks overeen met 100.000 DALYs afgerond. Milieufactoren zijn verantwoordelijk voor ongeveer 8% van de totale ziektelast in Vlaanderen. Het aantal DALYs jaarlijks gerelateerd aan hitte in Vlaanderen ligt in de grootteorde van 1000, dus ongeveer 1% van het totaal aantal DALYS veroorzaakt door milieufactoren.

We bespreken in dit deel de impact van hitte op nachtrust (deel 6.2.1), gerelateerde ziektebeelden (6.2.2) en voortijdige overlijdens (6.2.3). We starten telkens met een kwalitatieve bespreking, maar wanneer we deze informatie terugvonden, geven we ook kwantitatieve informatie, die in later onderzoek bruikbaar kan zijn om de maatschappelijke kosten van het SHE in te schatten.

6.2.1. NACHTRUST

De omgevingstemperatuur is één van de belangrijkste factoren die het slaappatroon beïnvloeden (Okamoto-Mizuno en Mizuno; 2012). Bijgevolg zijn verschillende onderzoeken gebeurd naar optimale slaapt temperatuur, gedefinieerd als de temperatuur die de slaper ideaal vindt, waarbij hij/zij noch een warmere, noch een koudere omgevingstemperatuur zou wensen. Muzet et al. (1984) hebben gevonden dat de ideale kamertemperatuur 19°C bedraagt en dat bij hogere of lagere temperaturen mensen aangeven dat ze minder goed slapen. Het slaappatroon wijzigt dan ook, met een toename van het aantal en de duur van periodes van slapeloosheid (wakefulness). Hite kan dus het slaappatroon verstoren en aangezien alle mensen nood hebben aan slaap, kan de totale negatieve impact hiervan groot zijn (Gupta et al., 2012; Foley et al., 2010; Johnson et al. 2004). Op basis van de huidige onvolledige kennis van de invloed van hitte op slaap en de economische impact van slaapt tekort, kan geen onderbouwde inschatting gemaakt worden over de grootteorde van de maatschappelijke kost van deze oorzaak-gevolg keten.

Onderzoeken i.v.m. relatie tussen hitte en slaap

Onderzoek van Di Nisi et al. (1989) waarbij het slaappatroon van mannen bij thermo-neutraliteit (30°C) is vergeleken met het slaappatroon op een hete nacht (35°C), toonde aan dat tijdens de hete nacht, een voorafgaande blootstelling aan hitte overdag leidde tot een meer rusteloze en minder efficiënte nachtrust. Gelijkaardig onderzoek van dezelfde onderzoeksgroep (Libert et al., 1998; 1991) bij jonge mannen toonde aan dat het slaappatroon bij kamertemperatuur van 35°C verstoord is in vergelijking met een thermo-neutrale kamertemperatuur van 20°C. De totale slaapduur was significant verkort en de periodes van slapeloosheid ("wakefulness") waren langer. Libert et al. (1991) toonde ook aan dat hitte de nachtrust sterker kan verstoren dan geluidsoverlast.

Onderzoek van Ohnaka en Takeshita (2005), waarbij de frequentie van lichaamsbeweging van 12 jonge vrouwen tijdens hun slaap werd gevolgd van juni tot oktober en de kamertemperatuur varieerde van 22 tot 31°C geeft ook aan dat er significant meer lichaamsbewegingen waren in de eerste 30 minuten van de slaap. Bij de hogere temperaturen was er ook significant meer tijd nodig om in slaap te vallen.

6.2.2. HITTE EN GERELATEERDE ZIEKTEBEELDEN (MORBIDITEIT)

Knowlton et al. (2009) vermelden op basis van een literatuurstudie dat er in het algemeen meer ziekenhuisopnames zijn gedurende hitte golven en dit zowel bij oudere als jongere volwassenen. De meeste opnames zijn te wijten aan directe hitte-gerelateerde verschijnselen zoals "uitputting door hitte" ("heat exhaustion", cf. volgende tabel) en hitte-slag ("heat stroke"), dehydratatie, verstoring van de elektrolytenbalans (zouten) en acuut nierfalen ([Kovats en Ebi 2006](#); [Mastrangelo et al. 2006](#); [Semenza 1999](#); [Semenza et al. 1999](#)). Sommige opnames zijn te wijten aan neurologische problemen, psychologische problemen of geweld-gerelateerde oorzaken ([Nitschke et al. 2007](#)).

Blootstelling aan (extreme) hitte is een bedreiging voor de menselijke gezondheid en voor het menselijke welzijn in het algemeen (Patz *et al.*, 2005). Het opwarmen van het menselijk lichaam bij hitte wordt aangeduid als hyperthermie (Desforges en Simon, 1993). Vooral wanneer deze opwarming langdurig is, kan dit leiden tot hitte gerelateerde ziekten zoals krampen, flauwtes, beroertes en zelfs de dood (Kilbourne, 1997). Uitputting is het eerst optredende en daarom ook meest voorkomende gevolg van een verhoogde omgevingstemperatuur (Lugo-Amador *et al.*, 2004). Symptomen hierbij zijn dorst, hevig zweten, een gevoel van zwakte, bleekheid, een ongemakkelijk gevoel, een angstig gevoel, duizeligheid, vermoeidheid, flauwvallen, misselijkheid gepaard met braken en hoofdpijn. De lichaamstemperatuur in dergelijke situaties zal nog geen verandering tonen net als de huid die nog steeds koud en vochtig kan zijn. Echter, indien men uitputting door hitte gekenmerkt door de zojuist opgesomde symptomen, niet tijdig detecteert, kan een persoon overgaan tot een beroerte. Een beroerte door hitte gaat gepaard met een stijging van de lichaamstemperatuur boven de 40 °C en de huid zal droog en warm aanvoelen. Daarnaast zal het centrale zenuwstelsel niet meer naar behoren functioneren wat kan leiden tot stuip trekkingen, waanzin of coma (Bouchama en Knochel, 2002; Kilbourne, 1997). Het risico op hyperthermie verhoogt indien een persoon hartproblemen heeft (Desforges en Simon, 1993).

Gezondheidseffect	Oorzaak	Symptomen
Zonneslag	blootstelling van het hoofd aan de zon	hoofdpijn, slaperigheid, bewustzijnsverlies hoge koorts, verbrande huid
Hitte krampen (heat cramps)	dehydratatie volgend op fysieke activiteit, hevig zweten met verlies aan elektrolyten en zouten	spier spasmen
Hitte uitputting (heat exhaustion)	verschillende dagen blootstelling aan hoge temperaturen, dehydratatie	duizeligheid, hevig zweten, spierzwakte, slapeloosheid
Hitte slag (heat stroke)	langdurige blootstelling aan hoge temperaturen, verstoorde thermoregulatie, fysieke toestand/medicatie die het zweten belemmeren	hoge koorts, verstoord hart ritme, warme, rode, droge huid, hoofdpijn, duizeligheid, spasmen, bewusteloosheid, coma, dood

bron: vertaald naar Brits et al., 2009.

Knowlton et al. (2009) onderzochten en rapporteerden het relatief risico voor verschillende ziektebeelden tijdens de hittegolf van 2006 (15 Juli tot 1 Augustus) in Californië. Spoedopnames voor hitte-gerelateerde ziektepatronen stegen met een factor 6. Niet-spoedopnames aan hitte gerelateerd stegen met een factor 10. Voor 4 "ziektepatronen" zijn de resultaten in onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 15: Relatief risico voor 4 "ziektepatronen" in Californië tijdens de hitte golf van 15 Juli tot 1 Augustus 2006 (versus de referentie periode (8–14 Juli en 12–22 Augustus 2006))

	Hitte-gerelateerd		Elektrolyten balans		Acuut nierfalen		Nierontsteking	
	spoed	normaal	spoed	normaal	spoed	normaal	spoed	normaal
Totaal	6.30	10.15	1.16	1.09	1.15	1.11	1.06	1.05
0–4 jaar	6.17	onvoldoende data	1.19	1.06	-	ns	0.81	ns
5–64 jaar	5.43	7.00	1.18	1.08	1.21	1.15	1.07	1.06
≥ 65 jaar	10.87	14.23	1.15	1.10	1.12	1.10	1.05	1.04

legende: - = onvoldoende data; ns = niet significant.

→ FACTOREN DIE DE GEVOELIGHEID VOOR HITTE BEINVLOEDEN

Het achterhalen van wie er nu meer of minder gevoelig is aan een bepaalde stijging in temperatuur is verre van eenvoudig, elke persoon ervaart een hittegolf anders (Clark, 1998). Het is een combinatie van fysiologische, sociale en ecologische variabelen (Harlan *et al.*, 2006). Toch staat dit niet in de weg om een aantal algemene conclusies te trekken.

(1) Voorafgaande ziekte

Personen met cardiovasculaire problemen en een slechtere werking van de nierfunctie zijn extra kwetsbaar voor hitte (Semenza *et al.*, 1996).

Het nemen van medicatie²⁸ die invloed heeft op de zout- en waterbalans, kan de gevoeligheid voor hitte nog verhogen (Desforges en Simon, 1993; Lubert en McGeehin, 2008; McGeehin en Mirabelli, 2001).

Gelijkaardig kan ook het drinken van alcohol of het nemen van drugs het risico op gezondheidsrisico's ten gevolge van hitte vergroten (Bytowski en Squire, 2003; Semenza *et al.*, 1996).

(2) Leeftijd

Ten eerste kan geconstateerd worden dat vooral leeftijd een rol speelt en dan vooral in de leeftijdsgroepen tot 4 jaar en boven 65 jaar (Knowlton *et al.*, 2008; Huynens *et al.*, 2001).

Dit is omdat ouderen en jonge kinderen **minder hitte-regulerende mechanismen** hebben (Bartlett, 2008; CDC, 1993). Fysiologisch hebben ouderen een verminderde thermoregulatie, verminderde cardiovasculaire gezondheid en een slechtere werking van de nierfuncties wat hen kwetsbaar maakt voor hitte (Semenza *et al.*, 1996).

Jonge kinderen zijn gevoelig voor hitte door vooral hun mindere adaptieve acties (Kovats en Kristie, 2006). Kinderen die daarenboven ziek zijn, met name diarree, ademhalingsproblemen en neurologische defecten hebben, zijn extra kwetsbaar (McGeehin en Mirabelli, 2001).

[Kovats et al. \(2004\)](#) vonden geen significante toename voor het totaal aantal ziekenhuisopnames tijdens hittegolven, maar wel specifiek voor aandoeningen van de ademhalingswegen en nieren bij kinderen van 0 tot 4 jaar en bij 75-plussers.

Sheffield en Landrigan (2010) identificeerden 6 factoren die kinderen meer kwetsbaar maken voor hitte in vergelijking met volwassenen. Zij verwijzen ook naar een studie van de Wereld Gezondheids Organisatie (WHO) die schat dat meer dan 88% van de “ziektelast” veroorzaakt door klimaatverandering kinderen treft onder de 5 jaar, zowel in ontwikkelde als in ontwikkelingslanden.

(3) Sociale factoren

⇒ Sociale isolatie

Ten tweede zijn er ook op sociaal vlak enkele algemene vaststellingen te maken. Allereerst is er sociale isolatie, waarmee bedoeld wordt dat deze personen weinig contact hebben met anderen,

²⁸ Deze medicaties zijn bijvoorbeeld diuretica die urineafvoer stimuleren; anticholinergica, die het aanmaken van urine verminderen; en slaapmiddelen en antipsychotica die invloed hebben op het zweten (Lubert en McGeehin, 2008)

een significante voorspeller voor personen die lijden onder de hitte (Klinenberg, 2003; McGeehin en Mirabelli, 2001). Tijdens de hittegolf van 2003 waren liefst 92% van de slachtoffers ten gevolge van deze hittegolf alleenstaanden (Poumadère *et al.*, 2005). Alleenstaanden worden doorgaans onvoldoende door hun omgeving gewezen op de gevaren van hitte en problemen van uitdroging. Vanzelfsprekend zijn alleenstaande ouderen in deze groep extra gevoelig, maar opvallend was dat tijdens de hittegolf in 2003 in Parijs twee derde van de alleenstaanden die slachtoffer werden van de hittegolf wonende was in een bejaardentehuis en een derde nog zelfstandig wonende was (Kovats en Kristie, 2006; Poumadère *et al.*, 2005).

⇒ Taal-onkundigen

Mensen die de lokale taal niet spreken zijn meer vatbaar voor de gevolgen van hitte (Haines *et al.*, 2006; LoVecchio *et al.*, 2005) omdat ze minder kennis hebben van, specifiek voor Vlaanderen, het Nederlands, wat ervoor zorgt dat communicatie, bijvoorbeeld via radio, tussen overheid en deze groepen in geval van hittegolfwaarschuwingen, minder goed verloopt. Daarbovenop komt dat de culturele verschillen die er bestaan tussen de Belgen en van origine niet-Belgen, een hinder kunnen zijn naar hulpverlening toe door misverstanden over de soort of ernst van de problemen (Thrush *et al.*, 2005).

⇒ Lage inkomensgroepen

Lage inkomensgroepen zijn meestal meer vatbaar voor hitte door een combinatie van (Dodman, 2008): (1) een grotere blootstelling door het wonen in de delen van de stad waar het SHE het grootst is; (2) een lagere adaptieve capaciteit (dit is bijvoorbeeld het verhuizen naar beter geïsoleerde huizen of het aanpassen van die huizen); (3) een lagere graad van bescherming (fysiologisch, door onbekendheid, maar ook minder afgesloten verzekeringen etc.).

(4) Fysieke inspanningen

Het Amerikaanse College of Sport Medicine²⁹ raadt aan om sportevenement af te lasten boven een natteboltemperatuur van 28°C; dat is doorgaans de drempel waarboven men op natuurlijke manier, dit is via zweten, niet meer genoeg kan afkoelen (ACSM, 1987; Desforjes en Simon, 1993). Boven deze drempel stijgt het risico op hitteproblemen sterk en dit ook bij gezonde personen van middelbare leeftijd (Desforjes en Simon, 1993; [Johnson et al. 2005](#); [Kovats and Ebi 2006](#)).

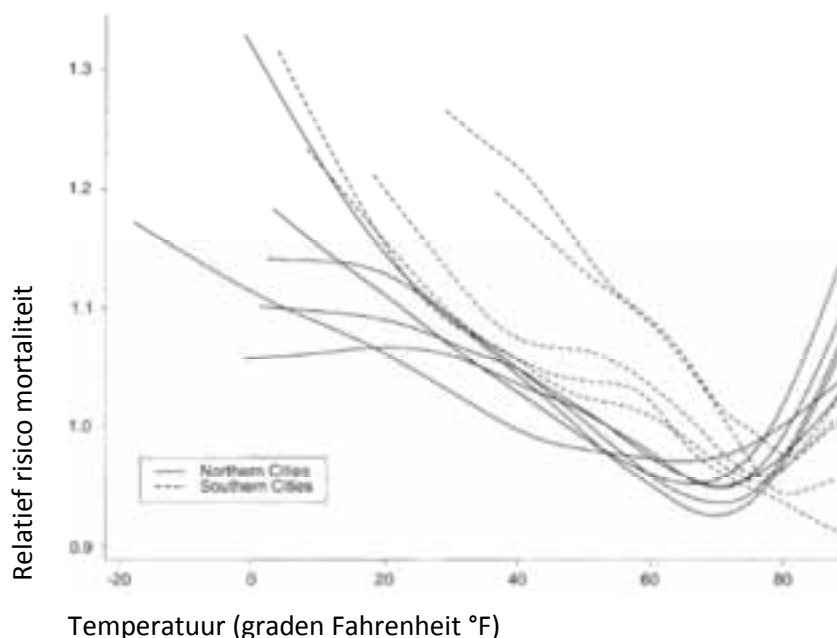
6.2.3. VOORTIJDIGE OVERLIJDENS (MORTALITEIT)

Liefst 95% van de geregistreerde sterftegevallen als gevolg van natuurlijke rampen in postindustriële samenlevingen, is gelinkt aan extreme temperaturen (Kazmierczak, 2012). In de Verenigde Staten en Australië doden hittegolven meer mensen dan tornado's, orkanen, blikseminslagen en overstromingen gecombineerd (Poumadère *et al.*, 2005). De relatie tussen een bepaalde stijging in temperatuur en de daaruit volgende stijging in menselijk onbehagen en stijging in sterfte varieert sterk naargelang de breedtegraad en de klimatologische zone. Mensen in meer gematigde landen zijn bijvoorbeeld meer kwetsbaar voor langdurige hitte dan mensen in warmere landen doordat deze laatste meer gewend zijn aan hogere temperaturen (McMichael, 2006). De kwetsbaarheid wordt dus groter indien een hittegolf minder frequent voorkomt, zeker tijdens periodes waarin dit zeer uitzonderlijk is (Kalkstein en Greene, 1997; McGeehin en Mirabelli, 2001). Voor België betekent dit dat mensen meer kwetsbaar zijn voor hittegolven dan bijvoorbeeld mensen uit Zuid-Europa, waar men meer gewend is aan hitte(golven). Deze kwetsbaarheid is des te

²⁹ <http://www.acsm.org>

groter in stedelijke omgevingen, zoals Antwerpen, waar het effect van hittegolven versterkt wordt door het optreden van het SHE effect (Haines *et al.*, 2006).

De relatie tussen temperatuur en mortaliteit heeft een “V vorm” (zie volgende figuur). De sterfte neemt toe wanneer het kouder en warmer wordt dan een optimum temperatuur waarbij sterfte het laagst is (Curriero *et al.*, 2002). De waarde van dit optimum is afhankelijk van streek tot streek en wordt beïnvloed door de gemiddelde lokale temperatuur. Zoals men kan verwachten zijn mensen uit warme streken doorgaans beter bestand tegen hitte en inwoners van koude streken beter tegen koude (Healy, 2003; McMichael, 2006). Dit blijkt ook uit onderstaande figuur waar noordelijke en zuidelijke steden in de Verenigde Staten worden vergeleken en de optimale temperatuur bij de zuidelijke steden hoger ligt. Daarnaast zijn er externe factoren zoals airconditioning, isolatie van huizen, gezondheidszorg en socio-economische factoren in het algemeen, die een invloed hebben op de sterftekans (Kovats and Ebi, 2006). Op langere termijn kunnen mensen zich ook deels aanpassen aan temperatuursveranderingen (Anderson and Bell, 2009).



*Figuur 87: Temperatuur-mortaliteit relatieve risico functies voor 11 steden in de V.S.A.. Veertig graden Fahrenheit (°F) komt overeen met 4 graden Celcius (°C), 60°F met 16°C en 80°F met 27°C. Noordelijke steden: Boston, Massachusetts; Chicago, Illinois; New York, New York; Philadelphia, Pennsylvania; Baltimore, Maryland; Washington, DC; Zuidelijke steden: Charlotte, North Carolina; Atlanta, Georgia; Jacksonville, Florida; Tampa, Florida; Miami, Florida. Graden Celcius = $5/9 \times (°F - 32)$. Figuur uit Curriero *et al.* (2002).*

Huynen *et al.* (2001) vonden een zeer sterke significante relatie tussen hitte en mortaliteit te wijten aan respiratoire aandoeningen (+12,8% per °C boven de optimale temperatuur in de voorafgaande maand), maar ook voor cardiovasculaire ziektes (+ 1,86% per °C boven de optimale temperatuur) en in iets beperktere mate voor mortaliteit te wijten aan kankers (+0.47%).

In 2003 was er in Europa een hittegolf met dramatische gevolgen. Verscheidene analyses van de mortaliteit veroorzaakt door deze hittegolf zijn reeds gebeurd (Kovats en Ebi, 2006; IPCC, 2007). In Frankrijk waren er naar schatting zo een 15000 extra doden terwijl dit aantal voor heel Europa

geschat werd op 35000 (Kovats en Ebi, 2006; IPCC, 2007). Sterfte door respiratoire aandoeningen was aanzienlijk. Voor België werd dit aantal gedurende de hitteperiode geschat op 1230 (Cox et al., 2008).

Mortaliteit gerelateerd aan hitte is geassocieerd met een korte(re) latentietijd (zelfde dag of dag voordien), t.o.v. mortaliteit gerelateerd aan koude (tot 25 dagen voordien) (Huynen et al., 2001; Anderson en Bell, 2009). Veel studies (Anderson en Bell, 2009; Doherty et al., 2009; Pattenden et al., 2010) vergelijken de extra kans op sterfte bij een relatieve temperatuurstijging van bijvoorbeeld het 90ste tot het 99ste percentiel of maken gebruik van een drempelwaarde (bijvoorbeeld P93) waaronder verondersteld wordt dat er geen effect is (Gasparrini et al., 2011).

Huynen et al. (2001) berekenden de impact van warme en koude periodes op mortaliteit in Nederland voor de periode van 1979 tot 1997. Ook zij vonden een V-vormige relatie tussen temperatuur en mortaliteit van +65 jarigen met een minimale sterfte bij 16,5°C. Voor temperaturen boven dit optimum nam de sterfte toe met 2,72% voor elke graad Celcius boven het optimum in de voorgaande maand. Indien dit niet t.o.v. de temperatuur van de voorgaande maand beschouwd werd, maar t.o.v. de temperatuur van de voorgaande dag, bedroeg deze toename 1,59% voor elke graad boven de optimum temperatuur. De impact van hitte op mortaliteit in de groep jonger dan 65 jaar bleek (zeer) beperkt.

Buekers et al. (2012) baseerden zich op het model van Huynen et al. (2001) om het aantal DALYs gerelateerd aan warme periodes voor 65- plussers in Vlaanderen te schatten. Aangezien Huynen et al. (2001) een stijging in de mortaliteit vonden met 2,72% voor elke graad Celcius boven het optimum van 16,5°C in de voorgaande maand, bedraagt het relatief risico 1,0272 per graad boven 16,5°C voor de groep 65-plussers. Om het aantal verloren levensjaren te wijten aan “temperaturen boven de optimale temperatuur” te berekenen kan men als volgt te werk gaan. Stel dat in de maand x de gemiddelde temperatuur gelijk is aan 19,5°C (+3°C t.o.v. de optimum temperatuur) en het aantal sterfgevallen bij 65-plussers in die maand is gelijk aan y, dan kan men op basis van Huynen et al. (2001) inschatten dat 11,2% ($=3 \times 2,72\%$) van deze overlijdens te wijten zijn aan de hogere temperaturen t.o.v. de optimale temperatuur. Het aantal verloren jaren bij deze groep is dan afhankelijk van de levensverwachting van deze 65-plussers. Voor een gemiddelde persoon van 65-jaar bedraagt de levensverwachting ongeveer 20 jaar.

Buekers et al. (2012) schatten op basis hiervan voor Vlaanderen een jaarlijks verlies aan “gezonde levensjaren” van ongeveer 1000 DALYs, op basis van voortijdige sterfte bij 65-plussers. Indien ook andere leeftijdsgroepen en andere impacts naast voortijdig overlijden zouden in rekening genomen worden, zou de maatschappelijke kost hoger liggen. Als we enkel op basis van bevolkingsaantal de resultaten van Vlaanderen (6,25 miljoen inwoners) extrapoleren naar Antwerpen (493.000 inwoners), kunnen we een **jaarlijks gemiddeld verlies aan verloren levensjaren ten gevolge van hitte in Antwerpen ramen op minimaal een 80-tal DALYS per jaar**. Buekers et al. (2012) rekenen met een kost voor een verloren levensjaar door premature mortaliteit die gelijk gesteld wordt aan 40.000 euro. In dat geval kan de **maatschappelijke kost** voor hitte door voortijdige overlijdens in Antwerpen grofweg geschat worden op ongeveer **3,2 miljoen euro**. Op basis van meer concrete data voor Antwerpen, i.v.m. het aantal overlijdens per maand/per dag in de groep 65+ en de overeenkomende temperatuur in die periode, kan een meer accurate inschatting gemaakt worden van het effect van warmte op overlijdens.

Deze inschatting op basis van Huynen et al. (2001) geeft de relatie tussen de gemiddelde temperatuur en extra overlijdens, maar de formule van Huynen is lineair zodat een gemiddelde temperatuur stijging van 16,5°C naar 17,5°C in de formule van Huynen tot evenveel extra

overlijdens zou leiden in de groep 65-plussers als een stijging van 34°C naar 35°C. In die zin geeft ze wellicht een onderschatting, van het hitte-effect (cf. de zomer van 2003 in Parijs) waarvan we verwachten dat een extra graad bij reeds hoge temperaturen leidt tot extra overlijdens.

De gemiddelde en de maximale dagelijkse temperatuur zijn sterke voorspellers voor de temperatuur gerelateerde sterfte. Er blijft evenwel veel onzekerheid over het inschatten van het aantal jaren verloren door sterfte t.g.v. temperatuursverandering omdat tal van externe factoren zoals isolatie, airconditioning, gezondheidszorg, etc. ook een rol spelen.

Omdat meestal de oudere populatie (>65j), die reeds onderhevig is aan chronische ziekten, sterker gevoelig is aan periodes van hitte, is de hypothese geopperd dat de extra sterfte die hittegolven met zich meebrengen slechts een kleine verschuiving in het tijdstip van overlijden is, een fenomeen dat ook wel “harvesting” genoemd wordt. Toch was er voor de hittegolf in 2003 in Frankrijk slechts een beperkte verschuiving van het aantal sterfgevallen in de tijd, m.a.w. het “harvesting” effect was bescheiden (Toulemon and Barbieri, 2008; Le Tertre et al., 2006).

In de periode van 1954 tot 1983 (20 jaar) waren er in België 4 hitte golven (5 dagen met maximum temperatuur boven 25°C met ten minste 3 dagen boven 30°C). In de laatste 20 jaar (1994-2013) waren er 12 hittegolven. Maar liefst een verdriedubbeling! (Wikipedia, 2013, http://nl.wikipedia.org/wiki/Hittegolf#Hittegolven_in_Belgi.C3.AB)

6.3. ENERGIEVERBRUIK

Om op warme dagen het microklimaat te reguleren en een aangename temperatuur te bereiken, wordt vaak veel energie verbruikt (Akbari et al., 2001). Het aantal nachten waar de minimumtemperatuur 's nachts niet onder de 18 °C zakt, geeft een goede indicatie van de vraag naar het gebruik van airco-installatie. Op basis van onze resultaten voor de zomer van 2013 in Antwerpen (Hoofdstuk 5), vonden we een gradiënt van 2 dergelijke nachten in de landelijke omgeving rond Antwerpen tot 18 dagen in het centrum van de stad. Een meer gedetailleerde benadering kan gebeuren op basis van het aantal uren dat de temperatuur boven de 25°C ligt, een temperatuur waarboven mensen vaak airco installaties gaan gebruiken indien beschikbaar. Op basis van de modelresultaten bleken er in de landelijke omgeving in de periode van 1 juni tot 30 september ongeveer 50% minder uren boven 25°C voor te komen ten opzichte van het centrum van Antwerpen. Het SHE leidt dus ongeveer tot een verdubbeling van het aantal uren waarop mensen geneigd zijn om hun airco op te zetten. Deze gegevens geven duidelijk aan dat het SHE een belangrijke invloed zal hebben op de vraag naar energie voor koeling.

Voor het meer noordelijke Toronto (Canada; 2,5 miljoen inwoners) is geschat dat een gemiddelde daling van de zomertemperatuur in de stad met 2°C, een jaarlijkse besparing van de energiekosten zou opleveren van 12,3 miljoen dollar (Bade et al, 2011; Banting et al. 2005). Wat dus overeenkomt met een gemiddelde besparing van 5 euro per inwoner.

Bade et al. (2011) schatten dat wanneer het hitte eilandeffect in het centrum voor Rotterdam (deels) teniet wordt gedaan door de aanleg van groen, het elektriciteitsgebruik van bedrijven en winkels met 6% kan worden verminderd. Dit zou leiden tot een besparing van 2.100 kWh per bedrijf of bij aannahme van een 5.000-tal kantoren tot een totale besparing van 10 miljoen kWh. Tegen een gemiddelde energieprijis van 0,25 euro per kWh vertegenwoordigt dit een besparing van 2,5 miljoen euro per jaar. De “gemeente” Rotterdam telt ongeveer 600.000 inwoners (Groot Rotterdam 1,2 miljoen inwoners). Wat dus leidt tot een besparing van ongeveer 5 euro per inwoner wat betreft energieverbruik in kantoren.

Simpson (1998) schatte dat schaduw van bomen in Sacramento (~470.000 inwoners) aanleiding gaf tot 12 % minder energieverbruik voor koeling. Dit zou een besparing opleveren van 10,7 miljoen US\$ (in 1998) of ongeveer 20 euro per inwoner.

De hierboven vermelde studies geven een indicatie van het effect van (het temperen van) het SHE op het energieverbruik in steden. De waarde hiervan blijkt in de grootteorde van 5 tot 20 euro per inwoner.

6.4. FALING VAN INFRASTRUCTUUR

Overmatige hitte kan leiden tot het (tijdelijk) falen van bepaalde infrastructuren, zoals (spoor)wegen en elektriciteitscentrales. We gaan hier in de volgende delen verder op in.

6.4.1. SNELLERE DEGRADATIE VAN WEGEN EN VERVORMING VAN TREINSPOREN

Kumar en Imam (2013) hebben recent een uitgebreide review gemaakt van het mogelijke effect van klimaatverandering op infrastructuur. Uit de studie blijkt dat hogere temperaturen zullen leiden tot snellere achteruitgang van bepaalde basismaterialen (bv. asfalt, betonklinkers, ...) van (spoor)weginfrastructuren en bruggen. Sterkere thermische expansie en contractie kan resulteren in meer problemen. Kumar en Imam (2013) verwachten bijvoorbeeld een toename in het aantal gevallen van vervorming van treinsporen door extreme zomertemperaturen, hetgeen zal leiden tot meer verstoringen van het treinverkeer. De hittegolf van 2003 resulteerde in het Verenigd Koninkrijk in heel wat vervormde sporen met belangrijke vertragingen tot gevolg met een totale geschatte kost van meer dan £3.5 miljoen. Ook in Vlaanderen werd er begin augustus 2013 melding gemaakt van lichte vervorming van treinsporen op de ophaalbrug over het kanaal Veurne-Nieuwpoort met stapvoets verkeer tot gevolg.

Een recente studie van Anyala et al. (2011) rapporteert dat de degradatie van voetpaden ten gevolge van klimaatverandering tegen 2050 drie keer sneller zou gaan dan vandaag door de verwachte toegenomen temperaturen.

6.4.2. TEKORTEN AAN KOELCAPACITEIT ZULLEN VAKER LEIDEN TOT ELEKTRICITEITSPANNES

In het voorbije decennium waren er in Europa regelmatig periodes met tekorten aan “koelwater”. Reeds in de warme zomer van 2003, moesten 30 nucleaire energiecentrales hun productie verlagen omwille van beperkingen om koelwater te lozen. In 2009 veroorzaakte een hittegolf ernstige tekorten aan koelcapaciteit in Frankrijk. Een derde van deze centrales werden tijdelijk gesloten. Dit tekort kon toen opgevangen worden door stroom geïmporteerd uit het Verenigd Koninkrijk (**Error! Hyperlink reference not valid.** en Vögele; 2011). Met uitzondering van het Verenigd Koninkrijk waar de nucleaire centrales gelegen zijn aan de kust, zijn in de meeste Europese regio's de centrales gelegen aan rivieren, waardoor ze tijdens hittegolven in de problemen kunnen komen. Volgens **Error! Hyperlink reference not valid.** en Vögele (2011) zal de dreiging van tekorten aan koelcapaciteit voor elektriciteitscentrales in de toekomst een belangrijke issue worden. Dit probleem wordt niet direct beïnvloed door het stedelijk hitte-eiland effect, maar omwille van de belangrijke productie van elektriciteit in Doel nabij Antwerpen, vonden we het de moeite om het hier kort te vermelden.

6.5. POSITIEVE EFFECTEN VAN HET SHE

6.5.1. GROEISEIZOEN 10 KM ROND STEDEN VERLENGD MET 2 WEKEN

Op basis van satellietbeelden van 70 steden in het noordoosten van Amerika is ontdekt dat het groeiseizoen van planten tot op een afstand van 10 kilometer van de stadsrand verlengd is. Het groeiseizoen is daar ongeveer 15 dagen langer dan in de landelijke zone verderaf van de steden (Gretchen, 2004). De oppervlaktetemperaturen in deze steden waren gemiddeld 2.3°C hoger dan in de omliggende landelijke zone. In de late herfst tot winter, waren de stadstemperaturen gemiddeld 1.5°C hoger dan de landelijke omgeving. Dit leidde ertoe dat het groeiseizoen ongeveer 7 dagen eerder startte in de lente en 8 dagen langer duurde in het najaar. In de lente is er ook eerder bloei, ongeveer 3 dagen eerder per graad Celsius temperatuurverschil met de landelijke omgeving buiten de invloedzone.

6.5.2. TERRASJESWEER

Zoals eerder aangegeven betekent het SHE vooral dat het 's avonds trager afkoelt in de stad dan in de landelijke omgeving. Dit doet vermoeden dat het SHE een positieve invloed heeft op de omzet van horecazaken met terras. Hoewel dit een leuk onderzoeksthema lijkt, vonden we hierover geen cijfermateriaal terug in de wetenschappelijke literatuur.

6.6. CONCLUSIE

In dit hoofdstuk werd duidelijk dat hitte een belangrijke maatschappelijke impact kan hebben. Deze impacts kunnen versterkt worden door het SHE. Hite heeft een negatieve impact op nachtrust. Dit effect treft de hele stedelijk bevolking hetzij door een minder goede nachtrust, hetzij door een hogere energierekening wanneer airco wordt ingeschakeld. **Om de maatschappelijke kost van hitte op nachtrust te monetariseren bestaat momenteel nog onvoldoende informatie.** Over de negatieve impact van hitte op morbiditeit en voortijdige overlijdens bestaan meer gedetailleerde gegevens die bij koppeling aan concrete gegevens voor Antwerpen zouden toelaten om de grootteorde van de maatschappelijke kost in te schatten. **De kost van voortijdige overlijdens gekoppeld aan temperaturen boven de optimale temperatuur van 16,5°C, waarbij er een minimum aan overlijdens plaatsvindt, kan voor Antwerpen grofweg geraamd worden op ongeveer 3,2 miljoen euro.** Voor de maatschappelijke kost van extra ziektes door hitte kan verder onderzoek ook indicaties geven, door het koppelen van cijfers over de verhoogde kans van ziekenopnames voor bepaalde ziektebeelden aan de gerelateerde kosten.

Op basis van eerdere onderzoeken in verschillende Westerse steden, blijkt de jaarlijkse kost van (het temperen van) het SHE door **verhoogd energieverbruik** in de grootteorde van 5 tot 20 euro per inwoner.

Er zijn ook positieve gevolgen te koppelen aan het SHE, met name een langer groeiseizoen in een omgeving tot 10 km rondom steden en meer uren met aangenaam terrasjesweer.

HOOFDSTUK 7. KWETSBAARHEIDSANALYSE

Dirk Lauwaet - VITO

7.1. INLEIDING

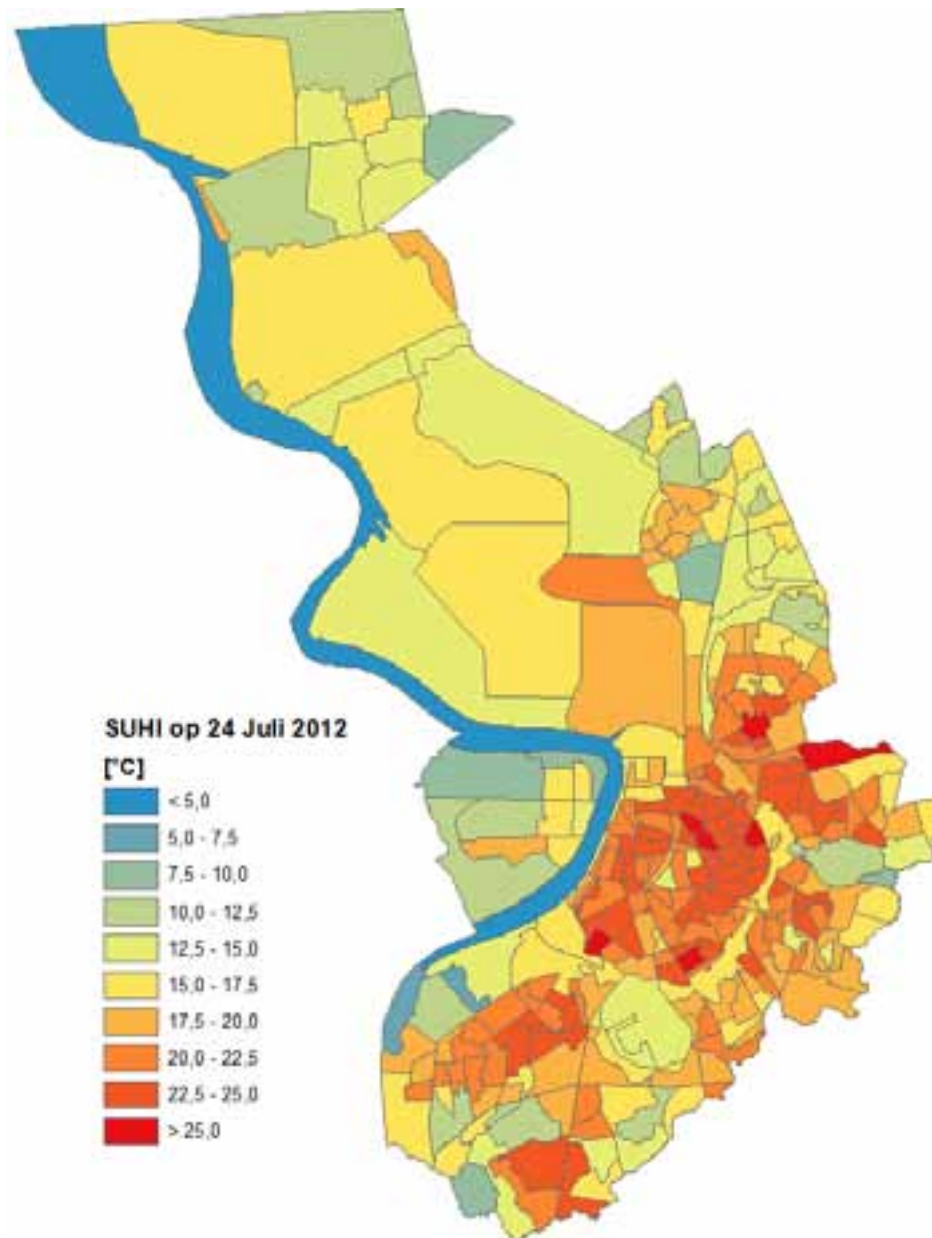
In navolging van Bernstein *et al.* (2007) wordt voor dit onderzoek uitgegaan van een combinatie van drie factoren voor het bepalen van de kwetsbaarheid van een gebied met betrekking tot het stedelijk hitte-eiland effect:

- a) het zich voordoen van het stedelijk hitte-eiland effect (exposure)
- b) de gevoeligheid van bevolking hieraan en
- c) de adaptieve capaciteit van het gebied om daaraan iets te doen.

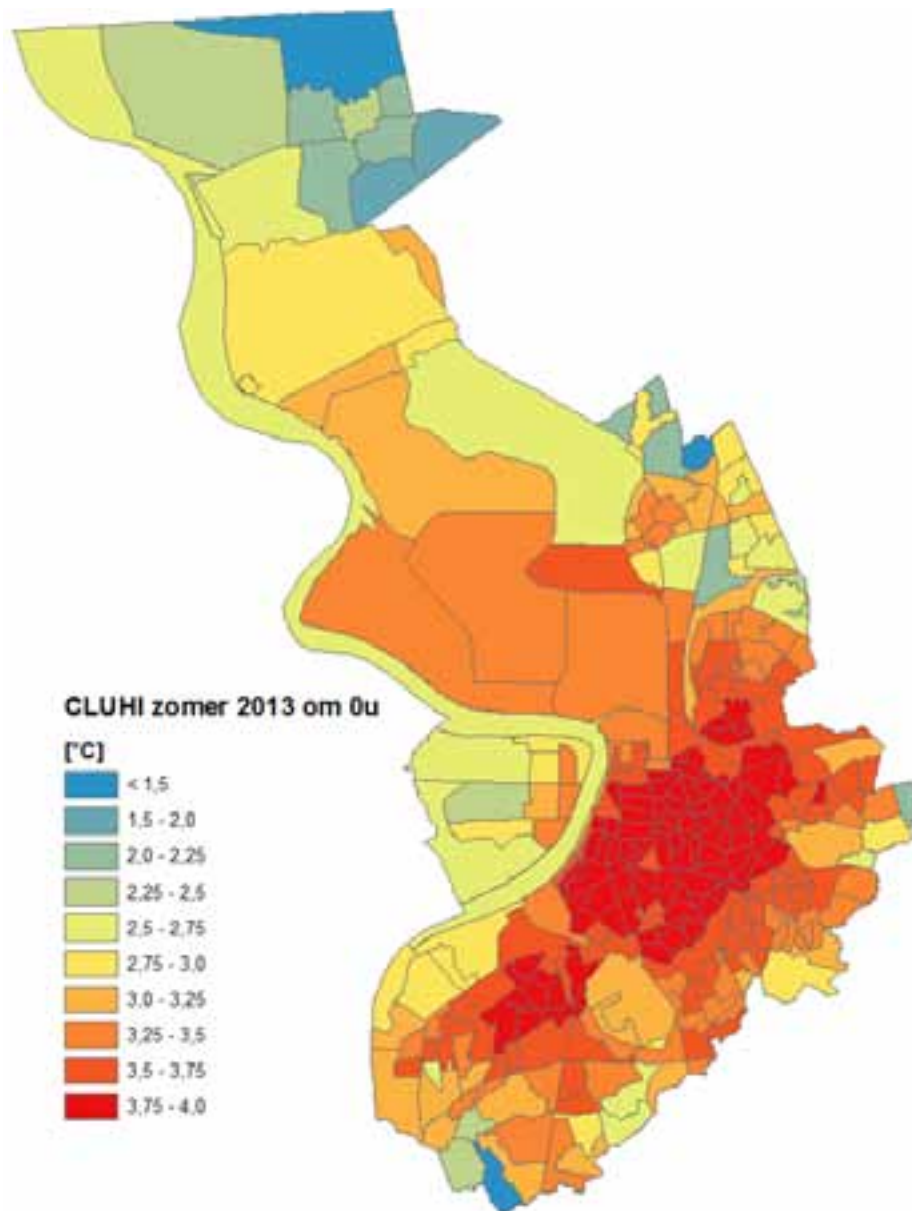
In de voorbije hoofdstukken zijn we reeds ingegaan op onderdeel (a) en onderdeel (b). In dit hoofdstuk zullen we onderdeel (b) in kaart trachten te brengen voor Antwerpen, en tevens een eerste aanzet geven voor onderdeel (c). Dit laatste zal echter vooral een doorwerking krijgen in Hoofdstuk 9, waar we de conclusies en beleidsaanbevelingen zullen formuleren. Zoals in de vorige hoofdstukken aangehaald, kent het SHE zowel een dag- als nachtcomponent. Wil men dus de kwetsbaarheid bekijken van de bevolking aan het SHE, dan moet dit ook voor deze twee componenten gebeuren. Zoals reeds aangehaald is in het vorige hoofdstuk is het verre van eenvoudig om te achterhalen wie er nu meer of minder gevoelig is aan een bepaalde stijging in temperatuur, elke persoon ervaart een hittegolf immers anders. Het is een combinatie van fysiologische, sociale en ecologische variabelen.

7.2. KWETSBAARHEID OP BUURTNIVEAU IN ANTWERPEN

Tegen deze (theoretische) achtergrond, hebben we in eerste instantie voor geheel Antwerpen een kwetsbaarheidsanalyse uitgevoerd van de 298 statistische sectoren van de stad. De basis voor de kwetsbaarheidsanalyse zijn de SUHI en CLUHI kaarten die in de vorige hoofdstukken zijn opgesteld, geaggregeerd per statistische sector.



Figuur 88: SUHI op 24 Juli 2012 om 12u per statistische sector in Antwerpen. Deze kaart is een indicatie voor de dagstress die mensen buiten ondervinden op een hete zomerdag.



Figuur 89: CLUHI om 0u, gemiddeld voor de hele zomer van 2013, per statistische sector in Antwerpen. Deze kaart is een indicatie voor de nachtstress die mensen ondervinden.

De centrale vraag hierbij was: welke buurt in Antwerpen is nu het meest gevoelig voor het hitte-eiland effect in relatie tot de voornoemde fysiologische, sociologische en economische factoren, zowel op het gebied van de dagstress (SUHI-waarden), als de nachtstress (CLUHI-waarden). We doen dit op basis van een statistische analyse op de verkregen CLUHI (nachtstress) en SUHI (dagstress) kaarten, op elk van de criteria afzonderlijk. De aanwezige GIS-gegevens zijn daartoe in eerste instantie gecorreleerd met de CLUHI- en SUHI-waarden voor respectievelijk het gemiddelde op middernacht tijdens de zomer van 2013 en 24 juli 2012. Gegeven de literatuurverkenning, zijn daarbij de volgende parameters gehanteerd, onderverdeeld naar demografische, sociaaleconomische factoren en kwetsbare functies :

Tabel 16: Parameters SHE kwetsbaarheid naar dag- en nachtstress. Bron: Buurtmonitor Antwerpen - <http://www.antwerpen.buurtmonitor.be/>

		CLUHI (nachtstress)	SUHI (dagstress)
Demografie	Gevoelige leeftijd (0-9 jaar)	x	x
	Gevoelige leeftijd (> 65 jaar)	x	x
	Totaal aantal inwoners	x	x
	Aantal alleenstaanden	x	x
	Aantal vreemdelingen	x	x
Sociaal-economisch	Ondermodaal inkomen	x	x
	Werkloosheidsgraad	x	x
Kwetsbare functies	Ziekenhuis	x	x
	Rusthuis	x	x
	Dagzorg		x
	Kinderopvang		x
	Kleuteronderwijs		x

We willen hierbij opmerken dat we geen cijfers tot onze beschikking hadden wat betreft de niet-Nederlandstaligen in Antwerpen, voor de analyse hebben we daarom gebruik gemaakt van het aantal vreemdelingen per buurt, zoals ter beschikking op de online Antwerpse buurtmonitor.

Hieronder zal in Box 1 de gevolgde methode in detail besproken worden. Vervolgens worden per set parameters de belangrijkste conclusies van deze statische analyses besproken.

BOX 1 : Op het niveau van de stad is gewerkt met een statische, ongewogen analyse van de kwetsbaarheid van de 298 buurten. Wat hiermee bedoeld wordt is :

- dat allereerst de gemiddelde SUHI en CLUHI waarden per buurt zijn bepaald in ArcGIS en dat deze vervolgens zijn gestandaardiseerd op een schaal van 0-1:

		CLUHI	SUHI
A00-	ANTWERPEN KERN - OUDE STAD (SP WALL)	0,003817	0,003892
A01-	KLAPDORP - BROUWERSVLIET	0,003936	0,003846
A02-	GROENPLAATS (SPAANSE WALLEN)	0,004099	0,004154
A03-	HOOGSTRAAT (SPAANSE WALLEN)	0,003908	0,004057
A04-	OUDAAN (SPAANSE WALLEN)	0,004172	0,004460
A05-	GEVANGENIS (SPAANSE WALLEN)	0,004169	0,004227
A081	SCHELDEKADEN NOORD	0,002769	0,002836
A10-	MEIR - LEYSSTRAAT (SPAANSE WALLEN)	0,004156	0,004363
A11-	KIPDORP - ST.-JACOBS (SPAANSE WALLEN)	0,004135	0,004302
A12-	KNS - NAT. BANK (SPAANSE WALLEN)	0,004209	0,004092
A13-	STADSWAAG-BEIJNHOF (SPAANSE WALLEN)	0,004092	0,004101
A14-	TABAKSVEST (SPAANSE WALLEN)	0,004203	0,003725
A15-	HESSENHUIS (SPAANSE WALLEN)	0,004029	0,004187
...	...	...	...
TOTAAL		1,000	1,000

- vervolgens is aan de hand van de beschikbare data, per parameter bepaald hoe groot het percentueel aandeel van de 298 buurten op het betreffende criterium is. Dat percentage is vermenigvuldigd met de bovengenoemde SUHI- en CLUHI-waarden per buurt. Dat levert bijgaande tabel op:

		> 65 jaar	CLUHI	SUHI
A00-	ANTWERPEN KERN - OUDE STAD (SP WALL)	0,0052	0,0000199	0,0000203
A01-	KLAPDORP - BROUWERSVLIET	0,0018	0,0000072	0,0000071
A02-	GROENPLAATS (SPAANSE WALLEN)	0,0017	0,0000071	0,0000072
A03-	HOOGSTRAAT (SPAANSE WALLEN)	0,0019	0,0000073	0,0000075
A04-	OUDAAN (SPAANSE WALLEN)	0,0019	0,0000079	0,0000084
A05-	GEVANGENIS (SPAANSE WALLEN)	0,0041	0,0000172	0,0000175
A081	SCHELDEKADEN NOORD	0,0000	0,0000000	0,0000000
A10-	MEIR - LEYSSTRAAT (SPAANSE WALLEN)	0,0023	0,0000098	0,0000103
A11-	KIPDORP - ST.-JACOBS (SPAANSE WALLEN)	0,0024	0,0000099	0,0000103
A12-	KNS - NAT. BANK (SPAANSE WALLEN)	0,0019	0,0000082	0,0000079
A13-	STADSWAAG-BEIJNHOF (SPAANSE WALLEN)	0,0047	0,0000191	0,0000192
A14-	TABAKSVEST (SPAANSE WALLEN)	0,0020	0,0000084	0,0000074
A15-	HESSENHUIS (SPAANSE WALLEN)	0,0013	0,0000054	0,0000056
...	...	...	...	...
TOTAAL		1,0000	0,00373	0,00386

- Bijvoorbeeld: Antwerpen Kern telt iets meer dan 0.5% van de 65-plussers van Antwerpen. Vermenigvuldigd met de CLUHI-waarde 0,003817, levert dat het parameter-gewicht 0,0000199. Voor de presentatie in de tabellen van dit hoofdstuk worden deze parameter gewichten vermenigvuldigd met het getal 1.000.000; dus resultaat 19,9.
- Dat is zo gedaan voor alle voornoemde parameters. Aangezien geen nadere gegevens beschikbaar waren van de omvang, aard en gevoeligheid van de kwetsbare functies; is voor Tabel 19 gewerkt met de aantallen kwetsbare functies in de betreffende buurt, vermenigvuldigd met de bovengenoemde SUHI- en CLUHI-waarden (elke kwetsbare functie telt hier dus even zwaar).
- In de onderstaande tabellen zijn telkens de **30 meest gevoelige buurten** per set parameters weergegeven; waarbij de **top 3** voor iedere kolom is aangeduid in rode, oranje en gele kleur respectievelijk.

7.2.1. DEMOGRAFISCHE PARAMETERS

Zoals uitgelegd in Box 1 staan hieronder de demografische parameters per buurt vermenigvuldigd met de daar optredende SUHI- en CLUHI-waarden voor de 30 meest gevoelige buurten.

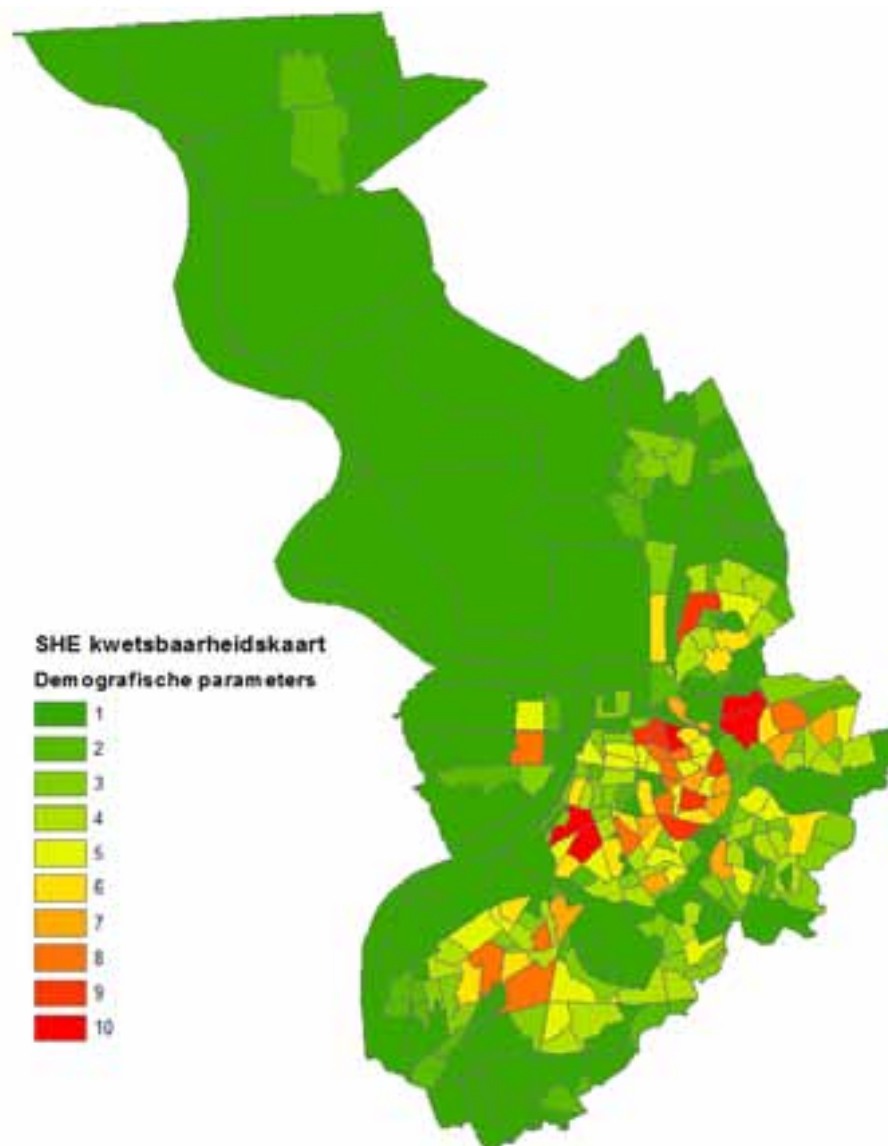
Tabel 17: Statistische analyse op buurtniveau in Antwerpen, naar demografische gevoeligheid SHE

	# 0-9 jaar		# >65 jaar		totaal # inwoners		# alleenstaanden		# vreemdelingen		
BUURT	CLUHI	SUHI	CLUHI	SUHI	CLUHI	SUHI	CLUHI	SUHI	CLUHI	SUHI	TOTAAL
MUSEUMWIJK (ZUIDWIJK)	28,7	28,6	28,9	28,8	48,0	47,8	86,9	86,5	61,9	61,6	507,8
BELL (ZUIDWIJK)	40,0	41,4	38,3	39,6	46,0	47,5	68,2	70,5	52,5	54,3	498,3
KRONENBURG	66,4	75,3	25,8	29,2	44,7	50,7	24,6	28,0	61,8	70,1	476,6
TEN EEKHOVE	70,0	71,9	31,4	32,2	48,6	49,9	27,2	27,9	57,7	59,2	476,0
STUIVENBERG - WEST	52,7	53,5	18,2	18,4	40,1	40,6	42,0	42,6	81,5	82,6	472,1
DAGERAADPLAATS – OOSTSTATIE	49,5	52,2	21,1	22,3	45,1	47,6	51,3	54,1	54,2	57,2	454,5
ST.-JANSPLEIN - TRAPSTRAAT	31,3	33,2	20,6	21,9	34,1	36,1	53,2	56,4	72,7	77,0	436,6
LAMBRECHTSHOEKEN	38,2	40,5	63,5	67,3	43,1	45,7	36,6	38,8	28,1	29,8	431,5
BORGERHOUT - GEMEENTEHUIS	52,7	57,7	26,8	29,3	39,7	43,4	34,2	37,4	52,5	57,4	431,2
ST.-AMANDUS (NOORDWIJK)	44,4	47,7	10,9	11,8	32,7	35,1	36,9	39,7	77,3	83,1	419,6
ST.-ANNA	57,4	64,1	24,0	26,8	38,4	42,8	24,6	27,4	48,7	54,4	408,6
DE ZAVEL (NOORDWIJK)	45,6	49,7	18,1	19,7	32,8	35,8	30,3	33,1	63,2	68,9	397,2
BOOMSE STWG - BEERSCHOT (KIEL)	47,8	52,3	22,1	24,1	36,3	39,7	26,3	28,7	55,6	60,9	393,8
OFFERANDESTRAT (STATIONSWIJK)	31,2	34,9	20,5	22,9	29,0	32,4	40,4	45,2	61,9	69,2	387,5
PROVINCIESTRAT (STATIONSWIJK)	33,9	36,1	10,4	11,0	29,9	31,8	40,8	43,4	67,0	71,3	375,5
ZWAANTJES	47,9	50,9	30,6	32,5	39,9	42,4	24,3	25,8	35,9	38,1	368,3
DAMBRUGGESTRAAT-N. (STATIONSWIJK)	25,1	28,2	19,4	21,8	26,6	29,9	40,1	45,0	61,5	69,1	366,7
ST.-VINCENTIUS (OOSTWIJK)	45,5	45,1	20,6	20,4	33,6	33,3	33,4	33,1	49,5	49,1	363,5
VALAAR - DE BREM	37,3	36,3	52,7	51,3	40,7	39,6	31,3	30,5	21,8	21,2	362,7
BISSCHOPPENHOF	26,4	24,2	62,6	57,3	35,4	32,4	37,6	34,5	27,1	24,9	362,4
LINKEROEVER - ZUID (LINKEROEVER)	35,2	34,1	38,7	37,5	31,3	30,3	45,6	44,1	32,2	31,2	360,0
CHARLOTTALEI (OOSTWIJK)	52,5	48,3	17,6	16,2	33,3	30,6	29,2	26,8	52,2	48,0	354,7
DE PEPERBUS	49,9	53,4	14,0	15,0	34,5	37,0	19,6	21,0	49,4	52,9	346,7
HET LAAR	43,2	44,0	23,7	24,1	32,0	32,6	29,1	29,6	40,8	41,5	340,6
GALLIFORT	36,1	42,7	27,7	32,8	30,5	36,1	26,3	31,1	31,2	36,8	331,3
OP TEN BERGH	32,2	38,7	20,4	24,6	28,7	34,5	27,9	33,5	39,7	47,7	328,0
KOLONIELAAN (CAM. HUYSMANS LAAN)	26,5	23,9	37,0	33,4	31,2	28,2	46,1	41,7	30,9	27,9	327,0
Fonteinstraat	40,9	42,8	26,5	27,7	28,8	30,1	26,8	28,0	35,7	37,4	324,8
GITSCH	26,7	27,2	34,3	35,0	30,1	30,7	36,2	36,9	26,5	27,0	310,5
VENNEBORG	24,4	26,3	44,9	48,4	29,4	31,7	30,8	33,3	17,6	18,9	305,6

Wat opvalt aan deze tabel is dat de SHE-gevoeligheden van iedere buurt sterk verschillen naar gelang de parameter die beschouwd wordt. De algemene rangorde is sterk gerelateerd aan het totaal aantal inwoners, hetgeen vrij logisch is. Opvallend is de torenhoge SHE-gevoeligheid wat betreft de alleenstaanden van de Museumwijk en de Bell, die deze buurten de eerste twee

plaatsen in de algemene ranking opleveren. De sterkste gevoeligheden wat betreft de kinderen, ouderen en vreemdelingen zitten telkens in andere buurten hetgeen aangeeft dat er een sterke segregatie is van leeftijd en origine in de verschillende Antwerpen buurten. Dit biedt uiteraard ook kansen naar een gerichte aanpak van de SHE-problematiek op buurtniveau, aangezien ouderen andere noden en zorgen hebben dan jonge kinderen tijdens een hittegolf.

Het volledige beeld voor Antwerpen wat betreft de kwetsbaarheid voor het geheel aan demografische parameters is weergegeven in onderstaande figuur. Om de leesbaarheid van de figuur te verhogen zijn de scores herleid naar 10 categorieën, op basis van een 'gelijke interval' indeling. Hierdoor belanden de 10 meest kwetsbare buurten in de hoogste categorie. We zien dat de kwetsbare buurten zich voornamelijk in de binnenstad en het noordoosten van de stad bevinden.



Figuur 90: SHE kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen voor de combinatie van alle demografische parameters, zowel voor dag- als nachtstress.

De kaarten voor alle individuele parameters, zowel voor de dag- als de nachtstress, zijn toegevoegd in Bijlage B.

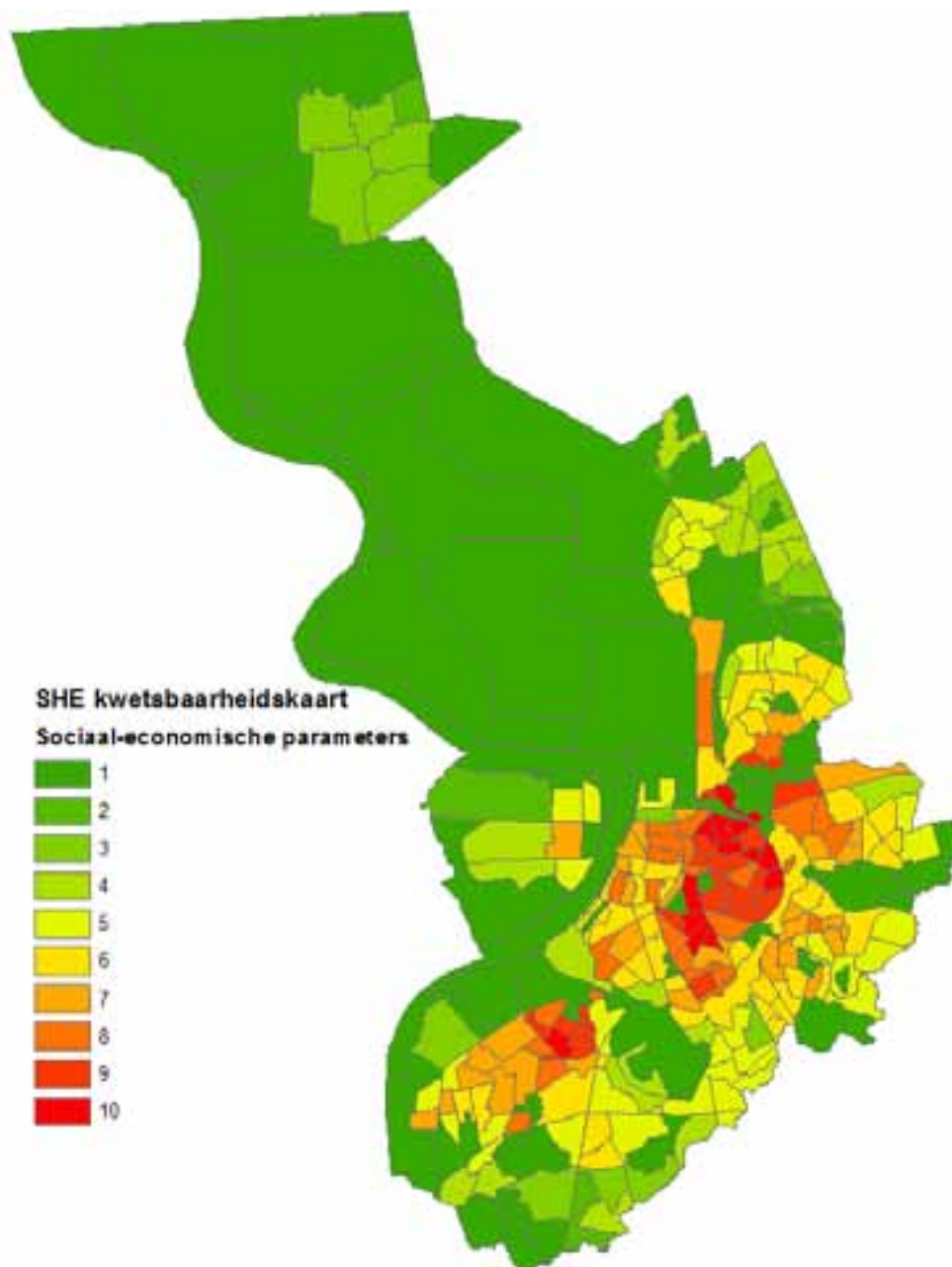
7.2.2. SOCIAAL-ECONOMISCHE FACTOREN

Zoals uitgelegd in Box 1 staan hieronder de sociaaleconomische parameters per buurt vermenigvuldigd met de daar optredende SUHI- en CLUHI-waarden voor de 30 meest gevoelige buurten.

Tabel 18: Statistische analyse op buurtniveau in Antwerpen, naar sociaaleconomische gevoeligheid SHE

	Ondermodaal inkomen (2010)		Werkloosheidsgraad (2010)		
BUURT	CLUHI	SUHI	CLUHI	SUHI	TOTAAL
DE ZAVEL (NOORDWIJK)	31,7	34,5	26,9	29,3	122,4
ASTRID BAD (OOSTWIJK)	32,7	33,1	27,9	28,3	122,1
STUIVENBERG - WEST	32,4	32,8	27,8	28,2	121,2
ST.-ANNA	31,1	34,7	26,0	29,0	120,8
STUIVENBERGPLEIN (NOORDWIJK)	31,6	32,2	27,0	27,6	118,4
ST.-AMANDUS (NOORDWIJK)	31,2	33,6	25,0	26,9	116,8
DE PEPERBUS	30,5	32,7	24,7	26,4	114,3
CHARLOTTALEI (OOSTWIJK)	32,5	29,8	26,9	24,7	113,8
VAN DIEPENBEECKSTRAAT (OOSTWIJK)	30,3	31,7	24,8	25,9	112,7
POTGIETERSTRAAT (NOORDWIJK)	29,6	32,7	23,9	26,3	112,6
PELIKAANSTRAAT (STATIONSWIJK)	30,9	30,6	25,5	25,3	112,3
BEERSCHOT - STADION (KIEL)	30,2	29,0	26,5	25,5	111,2
SLACHTHUISWIJK (DAM - SCHIJNPOORT)	29,6	32,0	23,4	25,4	110,4
DAMBRUGGESTRAAT-N. (STATIONSWIJK)	28,0	31,5	23,5	26,4	109,4
DE CONINCPLEIN - Z. (STATIONSWIJK)	28,8	30,7	23,9	25,4	108,8
PROVINCIESTRAAT (STATIONSWIJK)	28,9	30,7	23,0	24,5	107,1
KRONENBURG	28,8	32,7	21,0	23,8	106,4
DEN BLEEKHOF	29,0	30,7	22,4	23,7	105,8
KROONSTRAAT - WEST	28,3	30,1	23,0	24,4	105,8
Fonteinstraat	28,9	30,2	22,8	23,9	105,8
MAURITS SABBELAAN (KIEL)	29,4	26,8	25,5	23,2	105,0
EIGEN HEERD	27,4	31,6	21,1	24,2	104,3
STUIVENBERG ZIEKENHUIS (NOORDWIJK)	28,9	30,4	21,9	23,0	104,3
KATTENBERG	28,1	29,4	22,2	23,2	102,9
ST.-WILLEBRORDUS (NOORDWIJK)	27,7	29,5	22,1	23,6	102,9
DE BRUYNLAAN - NOORD	27,8	28,7	22,6	23,3	102,4
JAN DE VOSLEI (KIEL)	26,2	26,6	24,5	24,9	102,3
OFFERANDESTRAAT (STATIONSWIJK)	27,0	30,2	20,7	23,2	101,1
KIEL - CENTRUM (KIEL)	26,8	29,3	21,3	23,3	100,7
OP TEN BERGH	25,9	31,1	19,9	23,9	100,7

Deze tabel oogt duidelijk erg verschillend van de tabel voor de demografische gevoeligheid. Het zijn vooral de buurten met veel vreemdelingen en kinderen die hier terug opduiken. De verschillen in sociaal-economische SHE-gevoeligheid tussen de verschillende buurten zijn vrij klein, er springt geen enkele buurt echt uit voor een bepaalde parameter. Dit vertaalt zich ook in onderstaande kwetsbaarheidskaart, waarop we zien dat quasi de volledige binnenstad, en zeker het noordoosten ervan, rood kleurt. De indeling in categorieën gebeurde hier opnieuw op basis van gelijke intervallen.



Figuur 91: SHE kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen voor de combinatie van alle sociaal-economische parameters, zowel voor dag- als nachtstress.

7.2.3. KWETSBARE FUNCTIES

Wat de kwetsbare functies betreft hebben we zoals uitgelegd in Box 1 gekeken naar de aantallen daarvan per buurt, aangezien er niet voldoende gegevens beschikbaar waren wat de omvang betreft. Onderstaande tabel wordt sterk gedomineerd door de aanwezigheid van ziekenhuizen, aangezien er maar weinig zijn, maar de tabel is aangepast zodat de top 3 van iedere parameter vertegenwoordigd is.

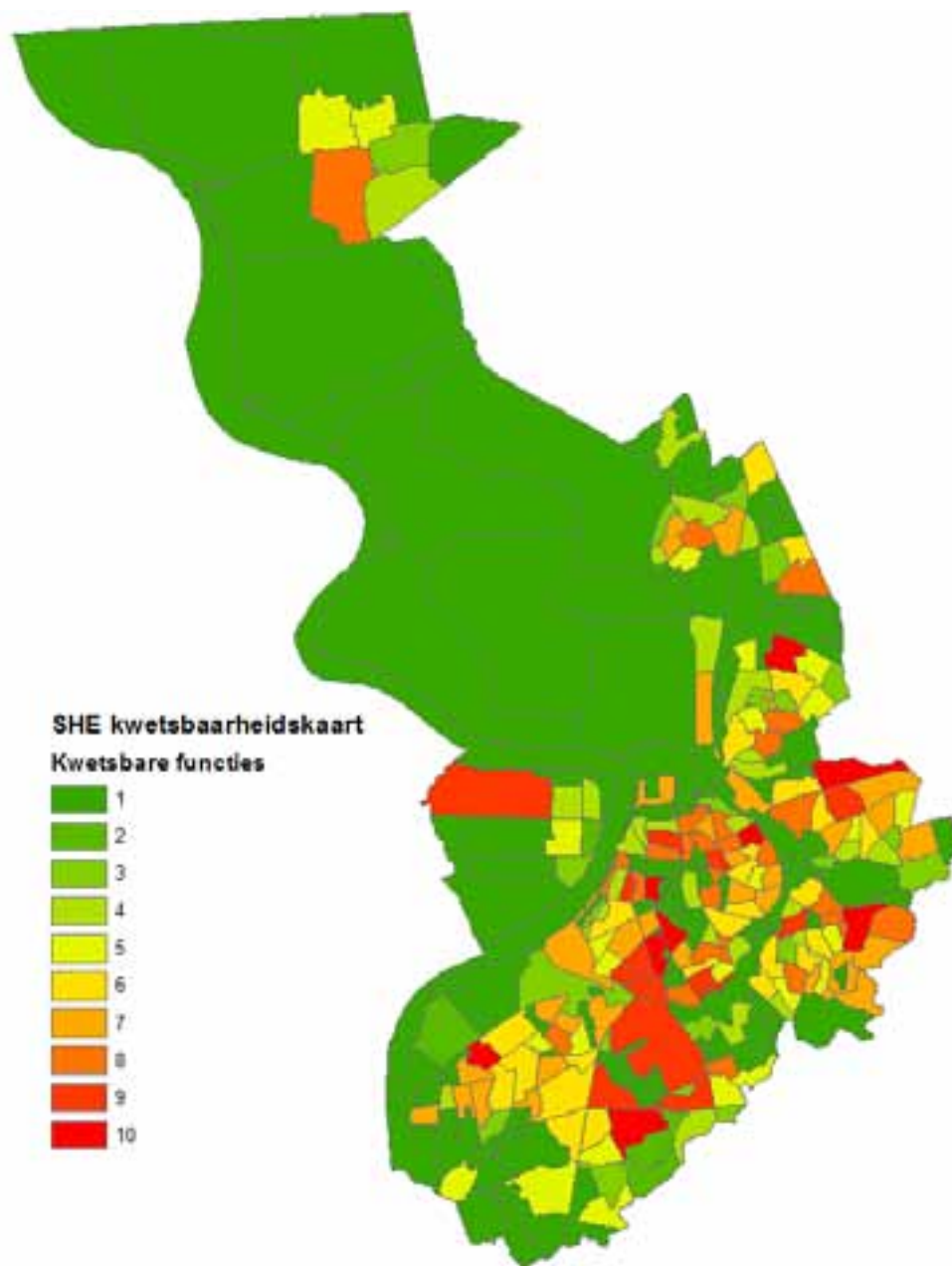
Tabel 19: Statistische analyse op buurtniveau in Antwerpen, naar SHE gevoeligheid kwetsbare functies.

	ziekenhuis		rusthuis		dagzorg	kleuterschool	kinderopvang	
BUURT	CLUHI	SUHI	CLUHI	SUHI	SUHI	SUHI	SUHI	TOTAAL
STUIVENBERG ZIEKENHUIS (NOORDWIJK)	688,1	723,7	0,0	0,0	0,0	0,0	37,8	1449,6
HARMONIE (ZUIDWIJK)	332,3	294,6	159,5	141,4	271,9	75,2	15,4	1290,3
DRIEKONINGEN	295,7	291,6	141,9	140,0	0,0	74,5	68,5	1012,1
TUINWIJK	271,7	251,3	65,2	60,3	231,9	0,0	26,2	906,6
ST.-VINCENTIUS (OOSTWIJK)	341,4	338,6	81,9	81,3	0,0	0,0	8,8	852,0
LICHTENBERG	306,8	329,0	73,6	79,0	0,0	0,0	0,0	788,4
KRUININGE	0,0	0,0	231,1	287,8	184,5	0,0	0,0	703,3
YPERMAN - STEYTELINCK	0,0	0,0	132,9	119,0	343,2	63,3	38,8	697,1
KNS - NAT. BANK (SPAANSE WALLEN)	350,8	341,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	691,8
VAN DE PERRELEI	321,6	337,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	658,7
SINT - AUGUSTINUS	267,5	269,8	0,0	0,0	0,0	68,9	35,2	641,4
BISSCHOPPENHOF	0,0	0,0	76,5	70,1	404,6	74,6	15,2	641,0
HOFVELD	0,0	0,0	161,9	162,8	313,1	0,0	0,0	637,9
GEVANGENIS (SPAANSE WALLEN)	0,0	0,0	166,8	169,1	162,6	0,0	9,2	507,6
STADSWAAG-BEIJNHOF (SPAANSE WALLEN)	0,0	0,0	81,8	82,0	315,5	0,0	0,0	479,3
NACHTEGALENPARK (WILRIJKSPLEIN)	247,8	178,4	0,0	0,0	0,0	45,6	0,0	471,7
FRANSEN PLAATS (ZUIDWIJK)	0,0	0,0	149,3	145,7	140,1	0,0	7,9	443,0
OP TEN BERGH	0,0	0,0	81,5	97,9	188,3	0,0	63,8	431,5
ST.-ANNABOS (LINKEROEVER)	191,3	88,3	45,9	21,2	81,5	0,0	0,0	428,1
KAREL OOMSTRAAT	0,0	0,0	74,2	66,9	257,3	0,0	0,0	398,4
ST.-LAURENTIUS (ZUIDWIJK)	0,0	0,0	78,6	85,3	164,0	0,0	37,1	364,9
HONDSNEST - MOLENVELD	0,0	0,0	71,4	66,1	127,1	0,0	50,3	314,9
OFFERANDESTRAAT (STATIONSWIJK)	0,0	0,0	84,2	94,2	0,0	100,2	30,7	309,3
OUDAAN (SPAANSE WALLEN)	0,0	0,0	83,4	89,2	0,0	94,9	9,7	277,2
ST.-ANNA	0,0	0,0	83,1	92,8	0,0	0,0	90,7	266,6
TEN EEKHOVE	0,0	0,0	80,8	83,0	0,0	0,0	81,2	244,9
MORKHOVEN	0,0	0,0	76,5	69,5	0,0	73,9	15,1	234,9
EKEREN - DORP	0,0	0,0	67,0	71,4	0,0	75,9	15,5	229,8
STUIVENBERG	0,0	0,0	79,1	83,3	0,0	0,0	63,4	225,9
OUDE BAEN	0,0	0,0	69,6	73,4	0,0	78,1	0,0	221,2
PROVINCIESTRAAT (STATIONSWIJK)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	189,8	29,1	218,9
'T MESTPUTTEKE	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	186,0	28,5	214,5

DAMBRUGGESTRAAT-N. (STATIONSWIJK)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	200,8	10,3	211,1
STUIVENBERG - WEST	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	179,5	27,5	207,0
...	...	...	...	...	...	...	...	...
DE BRUYNLAAN - ZUID	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	131,7	131,7

Uit deze tabel komt een totaal verschillend beeld naar voren qua SHE meest gevoelige buurten per parameter. In de buurt *Stuivenberg Ziekenhuis* worden twee ziekenhuizen gesitueerd, hetgeen de waarde voor deze buurt erg de hoogte in jaagt. De buurt *Harmonie* scoort erg hoog op zowat iedere functie en is allicht de meest SHE-gevoelige naar functies toe. Verder valt op dat de overlap met de vorige tabellen erg klein is, de functies bevinden zich in Antwerpen duidelijk in andere buurten dan waar de meerderheid van de bevolking woont. Enkel voor de kinderopvang zien we overeenkomsten met de buurten waar de meeste SHE-gevoeligheid is wat betreft jonge kinderen.

Onderstaande kwetsbaarheidskaart brengt dit ook visueel in beeld, de kwetsbaarheid is dit keer veel meer gespreid over de volledige stad. Aangezien de verschillen in de tabel erg groot waren, hebben we de indeling naar categorieën hier gedaan op basis van een numerieke functie waarbij een hogere klasse telkens een dubbel zo grote range heeft als de klasse eronder. Bijlage B bevat opnieuw de kaarten voor alle kwetsbare functies apart.



Figuur 92: SHE kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen voor de combinatie van alle kwetsbare functies, zowel voor dag- als nachtstress.

7.3. ANALYSE KWETSBAARHEID VOOR ENKELE CASE STUDIES

Nu we een volledig beeld hebben van de SHE kwetsbaarheid in de Antwerpse buurten, is het interessant om eens in meer detail te gaan kijken naar de lokale situaties. Het is uiteraard onmogelijk om zulke analyse te doen voor alle buurten, daarom hebben we 5 kwetsbare buurten geselecteerd, die van elkaar verschillen wat betreft hun karakteristieken en achtergrond. De keuze is gevallen op volgende buurten:

- Noordwijk (Stuivenberg/De Zavel/St. Anna)
- Museumwijk (Zuidwijk)
- Harmonie (Zuidwijk)
- Ten Eekhave
- Lambrechtshoeken

De Noordwijk cluster (*Stuivenberg/De Zavel/St. Anna*) omdat deze combinatie van buurten in iedere categorie erg hoog scoort en omwille van de aanwezigheid van een groot ziekenhuis. *Museumwijk* omdat deze als meest kwetsbare op demografisch vlak naar voor komt, *Harmonie* omwille van de hoge SHE-gevoeligheid naar kwetsbare functies, *Ten Eekhave* vanwege de leidersplaats in kwetsbaarheid naar jonge kinderen en aantal inwoners, en *Lambrechtshoeken* omdat de score er het hoogst is naar 65-plussers.



Figuur 93: Keuze buurten Antwerpen.

7.3.1. NOORDWIJK

Deze cluster van buurten rond het Stuivenberg ziekenhuis komt uit de SHE-kaarten en de kwetsbaarheidsanalyse duidelijk naar voren als belangrijkste 'hotspot' en aandachtsgebied van Antwerpen. De sociaal-economische situatie is er het slechtst naar SHE-kwetsbaarheid, met hoge werkloosheidscijfers en lage inkomens, er wonen bovengemiddeld veel allochtonen, het totaal aantal inwoners is er erg hoog, waarbij er ook veel jonge kinderen zijn. Het luchtbeeld en de foto's hieronder brengen de problematiek duidelijk in beeld: de wijk bestaat uit een aaneenschakeling van volgebouwde, kleine straatjes, met oude huizen die allicht slecht geïsoleerd zijn, en grote betonnen woonblokken. Buiten een aantal verspreide bomen rond het ziekenhuis is er van groen weinig sprake.



Figuur 94: Visueel beeld van de Noordwijk. Bron: Google Earth.

Om het visuele beeld van de wijk te versterken, werd er ook een kwantitatieve analyse uitgevoerd, waarbij in SAGA-GIS de score van alle buurten berekend werd voor de verklarende variabelen van

het SHE-effect (zie Hoofdstuk 3). Het getoonde cijfer geeft de gemiddelde waarde weer van een variabele voor alle pixels van de onderliggende 90m-resolutie kaart die binnen de grenzen van de statistische sector vallen. Om te kunnen vergelijken met de standaardwaarden voor Antwerpen zijn in onderstaande tabel ook de gemiddelde waarden voor alle statistische sectoren van Antwerpen toegevoegd.

De cijfers in de tabel bevestigen duidelijk het visuele beeld: deze wijk scoort voor alle verklarende variabelen een heel stuk slechter dan het Antwerpse gemiddelde. Er is geen open water aanwezig in de hele wijk. De fractie vegetatie, zelfs in de buurt van het ziekenhuis, is slechts half zo hoog als het Antwerpse gemiddelde. De belangrijkste factor lijkt hier de versteningsgraad, die quasi maximaal is. De weinige bomen die er zijn staan duidelijk apart of in verhardingen en grasveldjes of groene tuinen met doorlaatbare bodem zijn er niet of nauwelijks. Ook de sky view factor is hier erg laag door de vele kleine straatjes met hoge gebouwen, waardoor de invallende en uitgaande straling efficiënt ingevangen wordt. Er is in deze wijk duidelijk nood aan - en heel veel opportuniteiten voor - beleidsmaatregelen, die uitgewerkt worden in Hoofdstuk 9.

Tabel 20: Analyse van Noordwijk voor de verschillende SHE-verklarende variabelen.

Buurt	Fractie water [%]	Fractie vegetatie [%]	Versteningsgraad [%]	Sky view factor [%]
STUIVENBERG ZIEKENHUIS (NOORDWIJK)	0,0	25,4	92,2	47,4
DE ZAVEL (NOORDWIJK)	0,0	17,0	99,8	38,2
ST.-ANNA	0,0	20,1	98,0	46,8
STUIVENBERG - WEST	0,0	19,6	98,2	47,2
Gemiddelde	0,0	20,5	97,0	44,9
Gemiddelde Antwerpen	3,3	38,2	61,2	73,7

7.3.2. MUSEUMWIJK

De Museumwijk in het zuiden van Antwerpen stad scoort hoog qua SHE-kwetsbaarheid door zijn grote aantal inwoners en een hoog aandeel aan alleenstaanden. De sociaal-economische en functionele kwetsbaarheid van de buurt is minder hoog. In een eerste zicht op onderstaand satellietbeeld en foto's lijkt de situatie wel mee te vallen, de wegen zijn hier vrij breed, met enkele grotere open pleinen, en er vallen geregeld ook wat bomen te bespeuren. De pleinen en straten zijn natuurlijk wel steenvlaktes, die overdag makkelijk opgewarmd worden, en de huizen en appartementen zijn hoog en staan dicht tegen elkaar.



Figuur 95: Visueel beeld van de Museumwijk. Bron: Google Earth.

De kwantitatieve analyse laat zien dat de situatie in deze buurt toch minder goed is dan op het eerste zicht leek. Er is hier geen open water aanwezig, en de fractie vegetatie is toch erg laag. Ook in deze wijk is de versteningsgraad enorm hoog, en hoewel de straten en pleinen wel breed zijn, belemmeren de hoge gebouwen het zicht op de hemel waardoor de warmte in de buurt blijft hangen.

Tabel 21: Analyse van de Museumwijk voor de verschillende SHE-verklarende variabelen.

Buurt	Fractie water [%]	Fractie vegetatie [%]	Versteningsgraad [%]	Sky view factor [%]r
MUSEUMWIJK (ZUIDWIJK)	0,0	22,4	91,0	47,2
Gemiddelde Antwerpen	3,3	38,2	61,2	73,7

7.3.3. HARMONIE

De buurt Harmonie scoort erg hoog op het vlak van kwetsbare functies, op alle categorieën, maar is niet in beeld bij de demografische of socio-economische kwetsbaarheid. Visueel oogt de situatie hier veel rooskleuriger dan in de voorgaande buurten, met een duidelijk belangrijkere aanwezigheid van groen in deze buurt, en meer alleenstaande huizen, omgeven door tuintjes. Toch zijn er ook wel een aantal street canyons aanwezig, zoals te zien is op de foto. De huizen en kantoorgebouwen ogen van betere kwaliteit, en zijn allicht ook beter geïsoleerd, dan in de noordelijke wijken van Antwerpen.

Dit beeld wordt bevestigd door de cijfers: de fractie vegetatie scoort mooi in lijn met het gemiddelde voor Antwerpen, en ook de versteningsgraad is minder dramatisch dan in de voorgaande wijken. Enkel de hoeveelheid open water is opnieuw erg laag, net als de sky view factor. Maar dit zijn zaken die moeilijker aan te pakken zijn, de beleidsmaatregelen voor een wijk als deze kunnen zich dus beter op andere zaken richten, maar daarover meer in Hoofdstuk 9.





Figuur 96: Visueel beeld van de Harmonie. Bron: Google Earth.

Tabel 22: Analyse van Harmonie voor de verschillende SHE-verklarende variabelen.

Buurt	Fractie water [%]	Fractie vegetatie [%]	Versteningsgraad [%]	Sky view factor [%]
HARMONIE (ZUIDWIJK)	0,1	38,1	71,1	54,1
Gemiddelde Antwerpen	3,3	38,2	61,2	73,7

7.3.4. TEN EEKHOVE

Gelegen net buiten de Antwerpse ring aan het sportpaleis, blijkt deze buurt erg gevoelig te zijn voor SHE-effecten vanwege het hoge aantal inwoners en jonge kinderen, alsmede de kinderopvang. De sociaal-economische situatie is er wel beter dan aan de overkant van de ring in de Noordwijk. De buurt telt vele kleine straatjes met lage rijhuizen en kleine tuintjes. Er zijn wel grote grasvlaktes en bomenrijen aanwezig, maar die liggen buiten de woonzone aan de parking van het sportpaleis. Indien het geplande Oosterweeltraject uitgevoerd wordt zal het nog te bezien zijn of deze groene elementen zullen overleven, en zal de situatie er allicht niet op beteren. Deze buurt ligt ook windafwaarts (ten noord-oosten, met een dominante zuid-westen wind) van Antwerpen stad, waardoor er veel stedelijke warmte naar hier getransporteerd wordt, die nog extra kan worden opgewarmd boven de grote steenvlaktes van de spoorlijnen, de havenindustrie en de ring.



Figuur 97: Visueel beeld van Ten Eekhave. Bron: Google Earth en gva.be.

De kwantatieve analyse laat zien dat er inderdaad wel wat water en vegetatie aanwezig is, maar zoals gezegd is de locatie ervan niet ideaal voor de woonwijk. De versteningsgraad is opnieuw erg hoog voor deze buurt, zelfs met de grote grasvlakte inbegrepen. De Sky view factor scoort gemiddeld, de lage huizen lijken het zicht op de hemel niet te sterk te belemmeren.

Tabel 23: Analyse van Ten Eekhave voor de verschillende SHE-verklarende variabelen.

Buurt	Fractie water [%]	Fractie vegetatie [%]	Versteningsgraad [%]	Sky view factor [%]r
TEN EEKHOVE	2,3	33,1	83,5	74,2
Gemiddelde Antwerpen	3,3	38,2	61,2	73,7

7.3.5. LAMBRECHTSHOEKEN

Tenslotte is er de buurt Lambrechtshoecken, gelegen in het noorden van Antwerpen. Deze buurt kent een erg hoog aandeel aan 65-plussers, op de andere kwetsbaarheidsfactoren scoort ze minder hoog. De buurt is een cluster van grote flatgebouwen en lagere appartementsblokken met tussenin behoorlijk wat ruimte voor pleintjes en groen. De straten zijn vrij breed en aan de randen van de wijk liggen grotere natuur- en recreatiegebieden. De SHE-situatie is in deze wijk dan ook minder erg dan in het centrum van Antwerpen (Figuren x en x). Toch is het belangrijk om ook aandacht te hebben voor dit thema in zulke buurten, vanwege de grote kwetsbaarheid van ouderen voor hittestress die uit iedere gezondheidsstudie naar voren komt.



Figuur 98: Visueel beeld van Lambrechtshoecken. Bron: Google Earth en antwerpen.be.

De cijfers tonen aan dat het met de groenheid van deze wijk behoorlijk meevalt, zoals we al konden inschatten op het satellietbeeld. De versteningsgraad is wel bovengemiddeld, en er is (bijna) geen open water aanwezig. De Sky view factor scoort wel goed, de gebouwen staan ver genoeg uit elkaar om het zicht niet te belemmeren.

Tabel 24: Analyse van Lambrechtshoeken voor de verschillende SHE-verklarende variabelen.

Buurt	Fractie water [%]	Fractie vegetatie [%]	Versteningsgraad [%]	Sky view factor [%]
LAMBRECHTSHOEKEN	0,1	33,6	79,0	70,8
Gemiddelde Antwerpen	3,3	38,2	61,2	73,7

HOOFDSTUK 8. TOEKOMSTPROJECTIE

Dirk Lauwaet - VITO

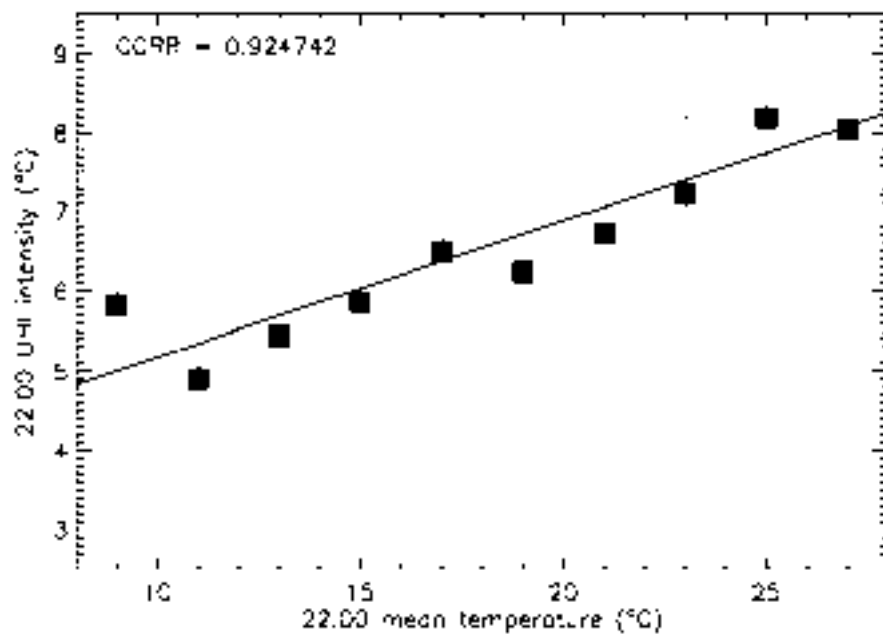
In dit onderdeel bekijken we in meer detail de evolutie van het stedelijk hitte-eiland effect, rekening houdende met de verwachte klimaatverandering en evolutie van het landgebruik in Antwerpen. Om dergelijke scenario analyses te kunnen uitvoeren dienen we ons te beroepen op een modellering gezien we niet kunnen vertrekken van meetgegevens of satelliet data die we in de toekomst zullen verzamelen. Deze toekomstprojectie wordt dus enkel voor het CLUHI effect doorgerekend.

8.1. INLEIDING

8.1.1. KLIMAATVERANDERING

De projectie bestaat uit 2 facetten. Eerst en vooral dienen we de veranderingen mee te nemen ten gevolge van het **veranderde klimaat**. Uit de IPCC (2013) rapporten en de literatuur blijkt dat de huidige concentratie broeikasgassen in de atmosfeer zal leiden tot een geschatte wereldgemiddelde temperatuurstijging van bijna 2 °C in de komende decennia. Modelmatige inschattingen variëren van 1.8 °C toename in 2090-2099 t.o.v. 1980-1999 tot zelfs 4.0°C (IPCC, 2013) voor bepaalde broeikasgas emissie scenario's. Klimaatonderzoekers verwachten ook dat het aantal hittegolven en zeer warme dagen nog verder toeneemt. Uit een preliminaire analyse van de resultaten van het ESA Urban Heat Island project³⁰, waarin lange historische tijdreeksen van stedelijke luchttemperatuur door VITO zijn doorgerekend, blijkt dat de intensiteit van het hitte-eiland effect toeneemt bij hogere temperaturen, m.a.w. hoe warmer, hoe intenser het hitte-eiland effect. Dit wordt geïllustreerd door onderstaande grafiek, waarbij de CLUHI intensiteit in Parijs om 22:00 h UT wordt uitgezet t.o.v. de gemiddelde luchttemperatuur.

³⁰ <http://www.urbanheatisland.info>



Figuur 99: De symbolen geven de gemiddelde intensiteit (en standaardafwijking) van het UHI effect in Parijs op de luchttemperatuur telkens om 22:00 UT gedurende mei - september 2003. De waarden zijn weergegeven in intervallen van 2°C van de gemiddelde luchttemperatuur. Bron: VITO – Urban Heat Islands project (ESA-DUE).

Om dergelijke klimaatprognoses rigoureus door te rekenen, dienen we te beschikken over globale of regionale klimaatberekeningen gedurende langere periodes (typisch 10 – 30 jaar). Die klimaatprognoses bevatten dan de verwachte randvoorwaarden voor de toekomst en geven bijvoorbeeld aan of er in deze contreien meer of minder condities zullen optreden die een sterk SHE effect in de hand werken. Het gaat hier dus niet alleen om de temperatuur, maar bijvoorbeeld ook het relatieve voorkomen van bv. situaties met oostenwind en heldere hemel, waarvan geweten is dat die een sterker effect veroorzaken. Dergelijke modeluitvoer van klimaatprognoses is echter voor dit project niet ter beschikking en het effectief nesten van het URBCLIM model in dergelijke klimaatprognoses valt buiten de scope van dit project.

Om dan toch een idee te krijgen van wat we in de toekomst mogen verwachten, zullen we kijken naar een jaartal uit het verleden waarvoor de zomerperiode exceptioneel warm was. 2003 was duidelijk zo'n jaar en zou dus min of meer kunnen dienen als een voorbeeld van een zomerperiode waarvan we verwachten dat we er in Europa in de toekomst meer zullen te verwerken krijgen (Schär et al., 2004). Het voordeel hiervan is ook dat we eenvoudigweg de modellering kunnen aansturen met ECMWF meteo - randvoorwaarden van 2003, volledig analoog zoals we dat deden voor de zomerperiode van 2013.

8.1.2. EVOLUTIE VAN HET LANDGEBRUIK IN EN OM ANTWERPEN

Een tweede facet aan dergelijke toekomstprognose dat we dienen in rekening te brengen is het veranderende **landgebruik**. Een stad is uiteraard geen statisch gegeven en zal zich deels afhankelijk van de macro-economische toestand gaan ontwikkelen. Dergelijke prognose specifiek voor

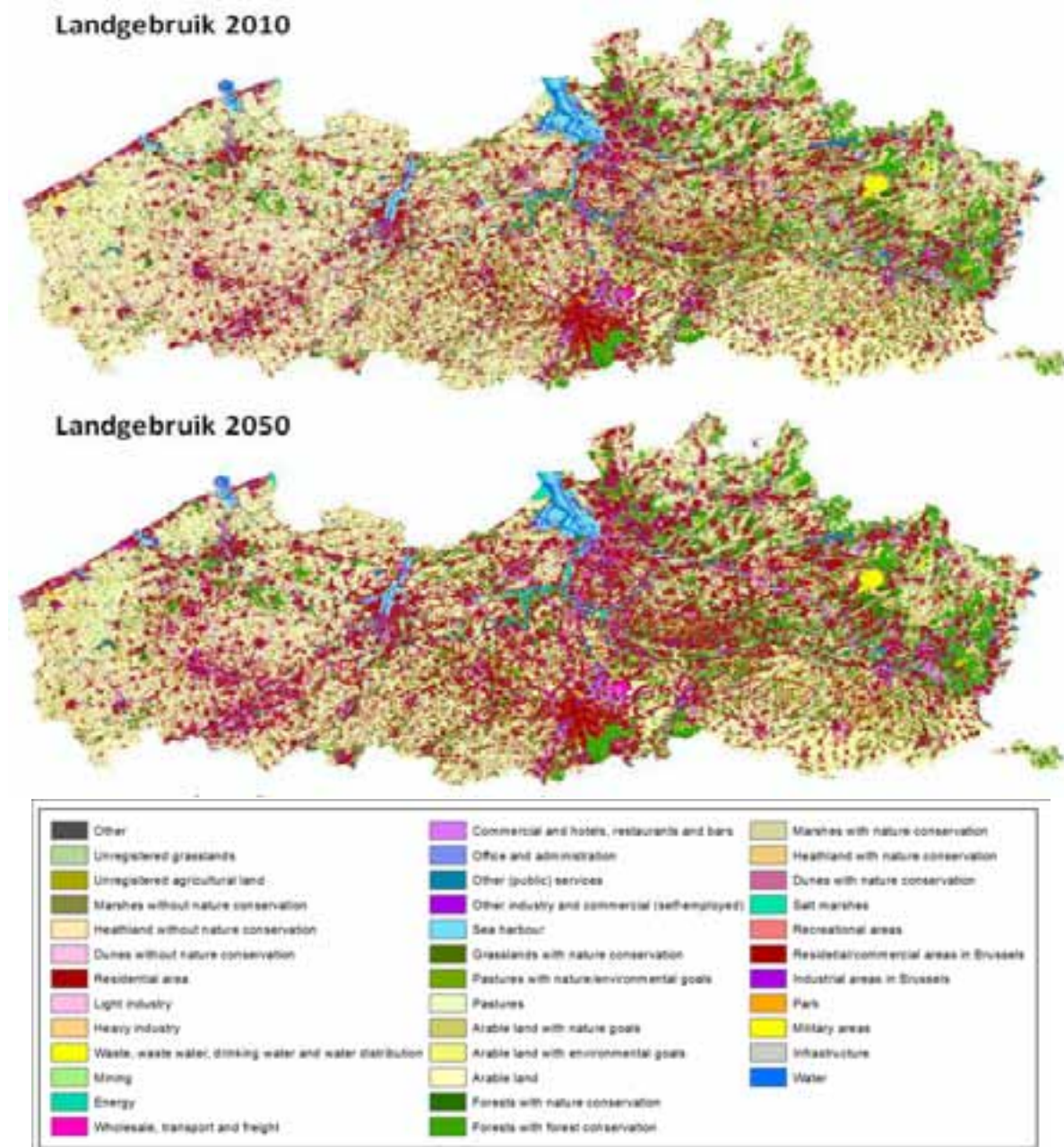
Antwerpen is een studie op zich en valt buiten het kader van dit project. We beschikken echter wel over de resultaten van de studie “De Vlaamse Ruimte in 4 Wereldbeelden”, uitgevoerd door VITO in opdracht van het steunpunt ruimte en wonen van de Vlaamse regering (Engelen et al., 2011). In die studie wordt een dynamisch landgebruiksmodel doorgerekend voor de periode 2010 – 2050 en dat voor een aantal macro-economische scenario’s. Voor een meer gedetailleerde bespreking van de scenario’s verwijzen we naar (Engelen et al., 2011).

Op het cellulaire niveau berekent het landgebruiksmodel jaar per jaar de verandering in het landgebruik van elke 1ha cel en genereert aldus een nieuwe landgebruikskaart per jaar. De toestandsverandering van een cel is afhankelijk van 4 elementen, zijnde vestigingsfactoren van de met het landgebruik geassocieerde socio-economische functie. Te weten:

1. de **functionele omgeving** van de cel, uitgedrukt als het landgebruik van de cellen in zijn onmiddellijke omgeving: een cirkelvormig gebied met een straal van maximaal 800 m. De afstandsafhankelijke aantrekking of afstoting tussen het landgebruik van de cel en dat van haar buurcellen, m.a.w. de wederzijdse ruimtelijke beïnvloeding. Dit is het echte dynamische element in het model. De volgende 3 elementen zijn statisch of quasi statisch maar zijn kenmerkend voor het heterogene karakter van de geografische ruimte waarin de dynamiek zich ontwikkelt;
2. de **bio-fysische geschiktheid** (het vermogen om het landgebruik te ondersteunen) van de cel. Het betreft een voor het landgebruik berekende waarde op basis van o.a. bodemtype, helling, overstromingskans, ...;
3. de **beleidsstatus** (institutionele, legale toestand) van de cel, bepaald op basis van de bestaande gewestplannen, RSV en RUPs, Natura 2000, speciale beschermingszones landschap en natuur, economische knooppunten, Voor perioden verder in de toekomst worden verschillende veronderstellingen gemaakt per scenario. In de scenario’s waarin de private belangen primeren is de rol van de beleidsstatus weinig bepalend;
4. de **ontsluiting** van de cel, berekend op basis van de verkeersinfrastructuur: wegen, waterwegen, spoor, openbaar vervoer, Het betreft een ontsluiting die specifiek wordt berekend voor elk type landgebruik, en, in de tijd kan veranderen als een functie van nieuwe projecten die gerealiseerd worden. De missing links worden in de scenario’s ingevoerd op het moment dat ze gerealiseerd zijn. Ook de lightrail- en sneltramverbindingen uit het 2020-plan van De Lijn worden verondersteld gerealiseerd te zijn in fasen. In de scenario’s waarin de private belangen primeren worden enkel die lijnen gerealiseerd waarvan men mag veronderstellen dat ze rendabel te exploiteren zijn.

In deze studie zullen we gebruik maken van een business as usual scenario (BAU) en dat voor een projectie naar 2030. Dit BAU scenario beschrijft een waarschijnlijke ontwikkeling van Vlaanderen tot 2050, onder de aanname dat de huidige waargenomen en gekende trends zich zullen voortzetten. De noodzakelijke gegevens werden direct, of via een tussenberekening, ontleend aan Vlaamse en Federale statistische- en GIS-bronnen. In de studie wordt rekening gehouden met een bevolkingstoename op basis van cijfers van het Federaal planbureau per arrondissement. Ook werd het model voor het BAU-scenario gekalibreerd aan de hand van sociaaleconomische gegevens en modeluitkomsten die beschikbaar kwamen uit MIRA-S-2009 scenario oefeningen (Gobin et al., 2009). In het bijzonder werd het model gekalibreerd met de resultaten van de PLANET (Desmet et al., 2008) en SELES (Gavilan et al., 2006) modellen. De veranderingen in natuurlijke landgebruiken zijn gebaseerd op de aannames van de NARA-S-2009 studie (Dumortier et al., 2009).

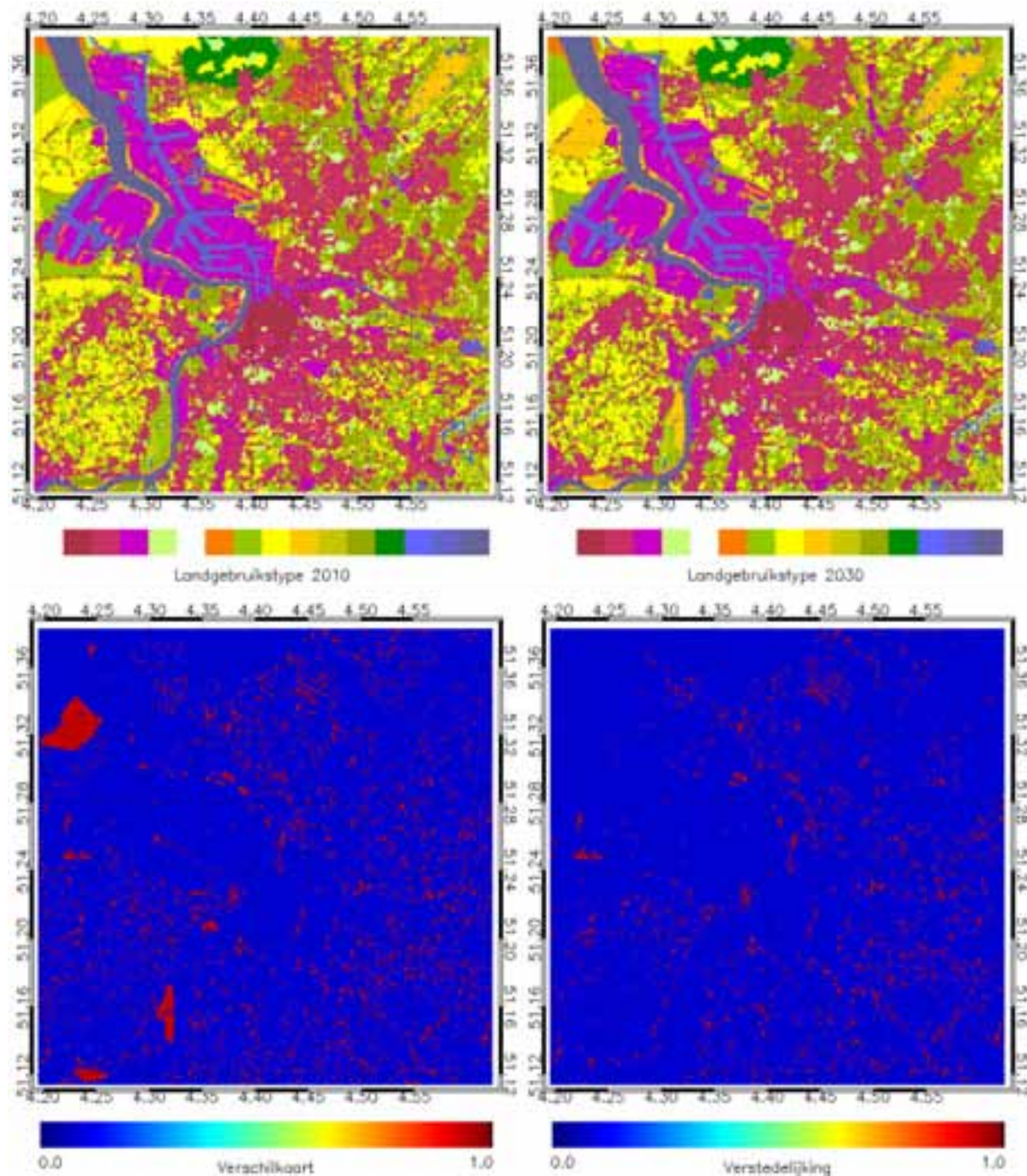
De huidige situatie (2010) en het BAU scenario voor 2050 worden in onderstaande figuur weergegeven.



Figuur 100: Dynamische landgebruiksmodellering voor Vlaanderen : basis jaar anno 2010 (boven), business as usual scenario 2050 (onder).

Zoals in Hoofdstuk 5 reeds beschreven maakt het URBCLIM model gebruik van een 12-tal landgebruiksklassen, in tegenstelling tot de meer gedetailleerder opdeling van (Engelen et al., 2011). We dienen dus m.a.w. een vertaling te doen van de klassen uit het ruimtelijk dynamisch model naar de URBCLIM klassen. Dit gebeurde op exact dezelfde manier als beschreven in Hoofdstuk 5. Het resultaat hiervan is te zien in Figuur 101. We zien dat er toch wel een aantal veranderingen worden verwacht in het landgebruik in en om Antwerpen, en dat die veranderingen

ruimtelijk erg verspreid zijn. In relatie tot het CLUHI is vooral de verdere verstedelijking relevant, en die zou volgens dit scenario op een redelijk ongestructureerde manier verlopen, verspreid over alle randgemeenten.



Figuur 101: Landgebruikskarten in de LAICa klassen afgeleid op basis van de landgebruiksprojecties van (Engelen et al., 2011). Boven links: situatie in 2010, rechts : verwachte situatie in 2030 volgens business as usual scenario. Onder links: Lokalisatie van alle verschillen tussen beide kaarten, rechts: de verstedelijkte gebieden.

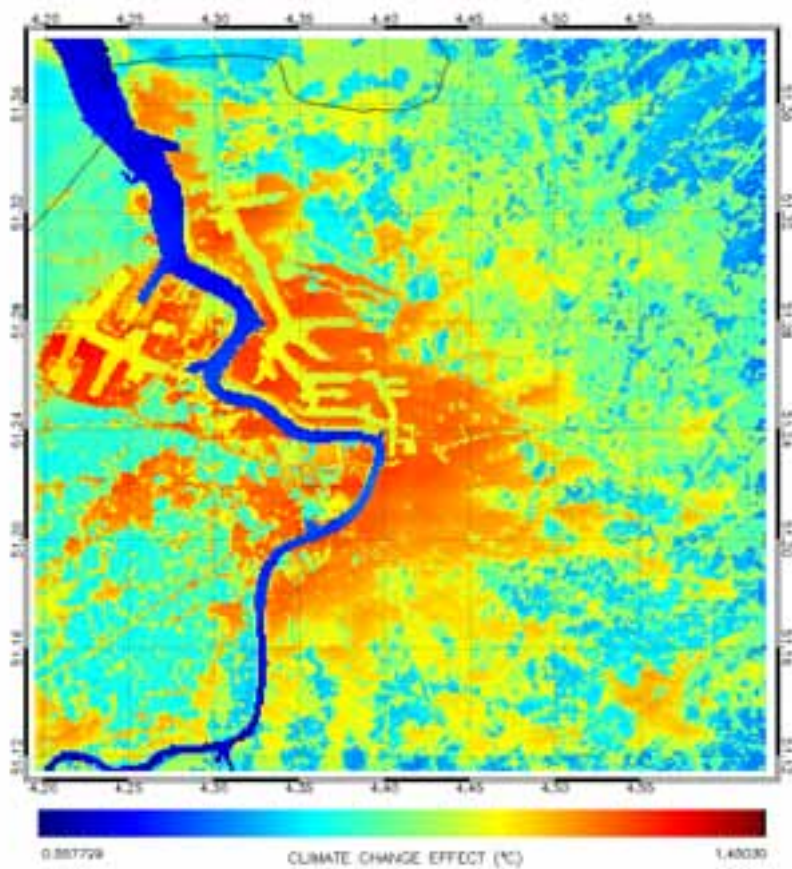
8.2. ANALYSE TOEKOMST SCENARIO

Hier zullen we nu de resultaten bespreken van de toekomstprojecties. Om een opdeling te kunnen maken tussen de effecten van het veranderende landgebruik in het BAU scenario (zie hoger) en de impact van de grootschalige meteorologische condities (klimaatverandering), zullen we deze twee facetten apart bekijken.

8.2.1. EFFECT VAN DE KLIMAATVERANDERING

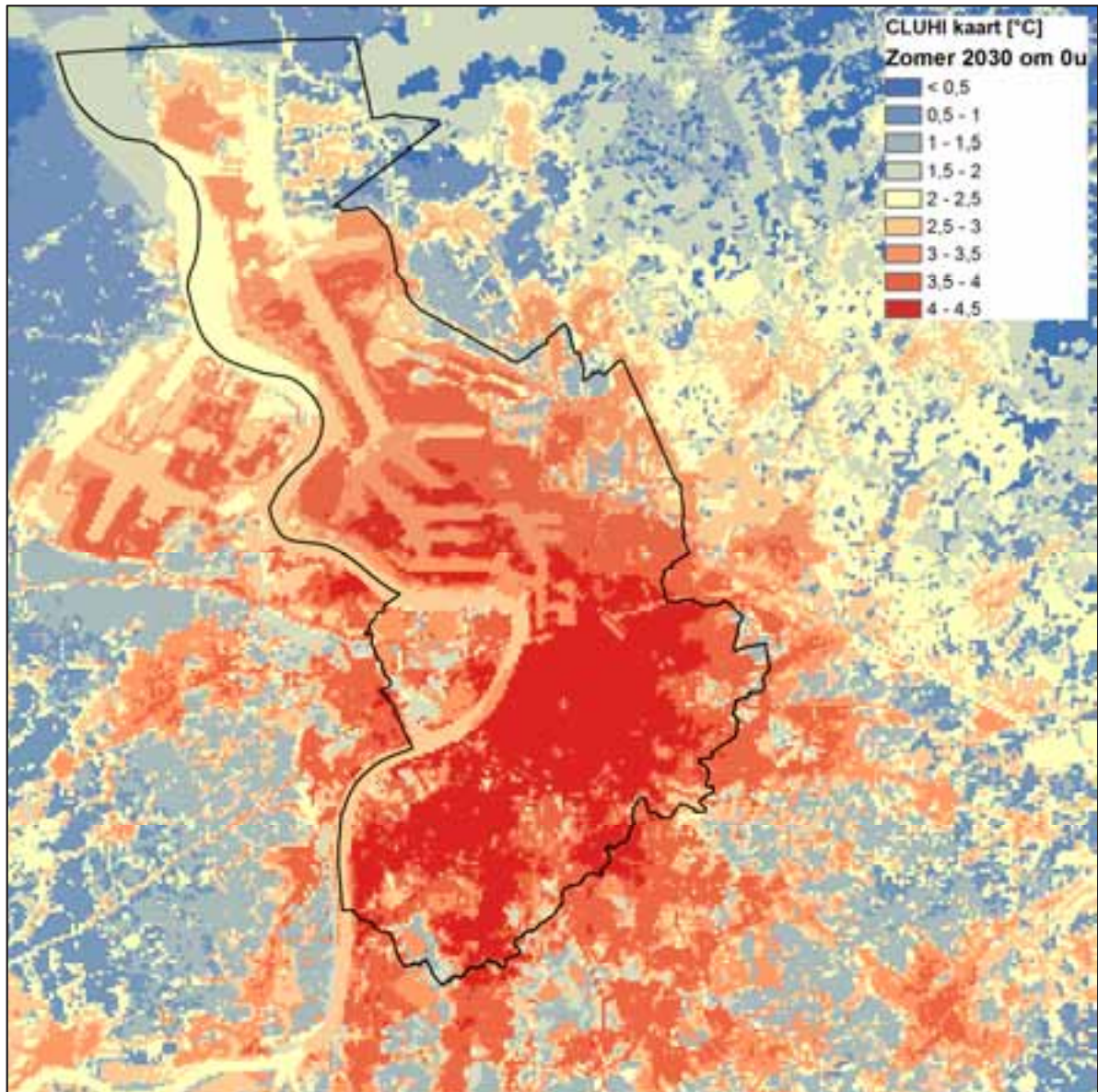
Zoals gezegd zal er een toename van het stedelijk hitte eiland effect te verwachten zijn ten gevolge van de klimaatverandering. Hiertoe, zoals hoger reeds gemotiveerd, hebben we de meteorologische condities van de zomer van 2003 als randvoorwaarde opgelegd. We bekijken hieronder het verschil in de modelresultaten. Gezien we hier uiteraard slechts 1 enkele zomerperiode in rekening brengen is de analyse gevoelig aan de exacte meteorologisch condities gedurende de beschouwde periode en dient deze analyse geenszins beschouwd te worden als een werkelijke toekomstprojectie van het verwachte UHI effect in Antwerpen, eerder als indicatie van wat zich in de toekomst vaker zal voordoen.

Onderstaande figuur geeft het gemiddeld temperatuurverschil weer tussen de zomer van 2003 en de zomer van 2013. We zien dat de temperatuur globaal gezien toeneemt met ongeveer 1°C, maar ook dat de stad en het havengebied nog een iets sterkere toename kennen tot 1.5°C. Het stedelijk warmte-eiland zorgt er dus voor dat de temperatuurstijging als gevolg van de klimaatverandering nog met ongeveer 50% wordt verhoogd in de stad.



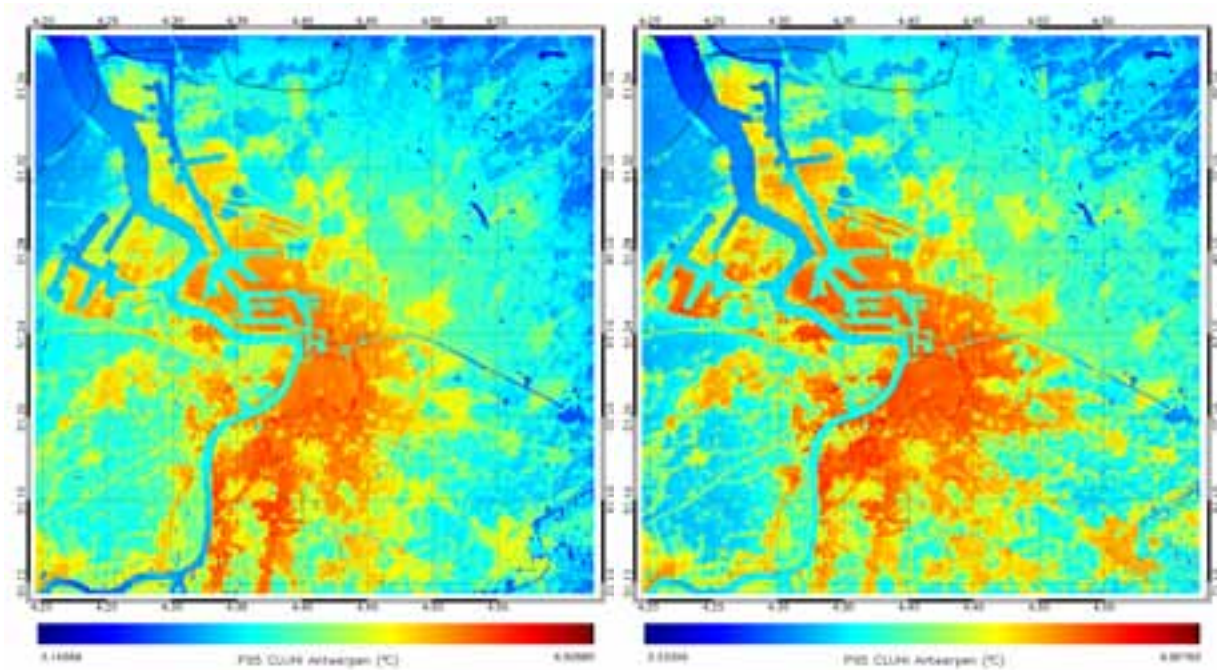
Figuur 102: Verschil in de gemiddelde temperatuur in Antwerpen als gevolg van de opgelegde klimaatverandering.

De resulterende CLUHI kaart is in Figuur 103 weergegeven. In vergelijking met de kaart voor de huidige situatie (zie Figuur 77) zien we dat de **maximale waarden** in de verstedelijkte zones van Antwerpen verder toenemen van 4 tot 4.5 °C. Gezien het hier gaat om een gemiddelde waarde voor de volledige zomer is dit toch een aanzienlijke stijging, en dat voor een erg groot gedeelte van het Antwerpse grondgebied.



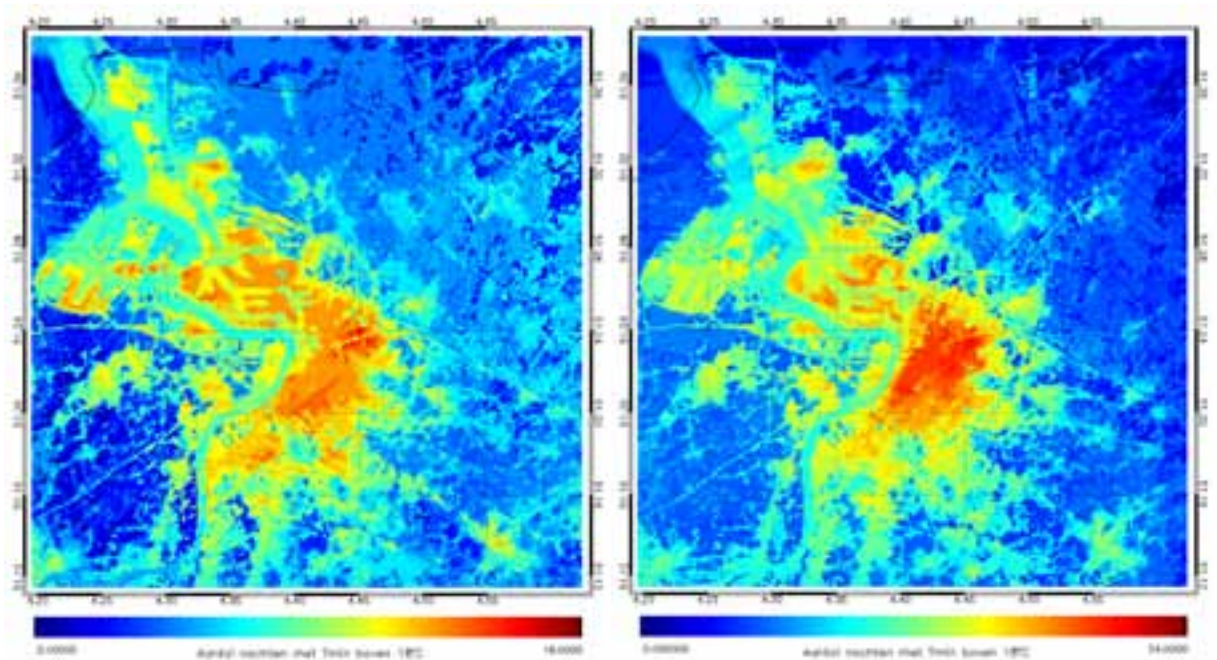
Figuur 103: De gemiddelde CLUHI intensiteit voor Antwerpen voor de zomer van 2003 (juli en augustus) om 00:00h lokale tijd.

Naast het gemiddeld CLUHI effect op zich is het interessant te gaan kijken hoe de extreme waarden van de SHE intensiteit zijn toegenomen. Onderstaande figuur vergelijkt de 95 percentiel waarden van de CLUHI intensiteit. Al bij al lijkt de stijging in de extreme waarden mee te vallen, er komt ongeveer een 0.5°C bij in het centrum van de stad, evenredig aan de algemene temperatuurstijging. Wel merken we dat het centrum in het toekomstscenario scherper staat afgetekend op de kaart, de verschillen met het omliggende platteland lopen dus op, net zoals bij de gemiddelde kaart.



Figuur 104: Vergelijking tussen de P95 van de CLUH intensiteit voor het basis scenario (links) en rechts de P95 intensiteit voor het toekomst scenario.

Analoog zien we hieronder dat het aantal dagen met een nachtelijke minimum temperatuur in de binnenstad met een 6-tal dagen is toegenomen gedurende de periode Mei-September.

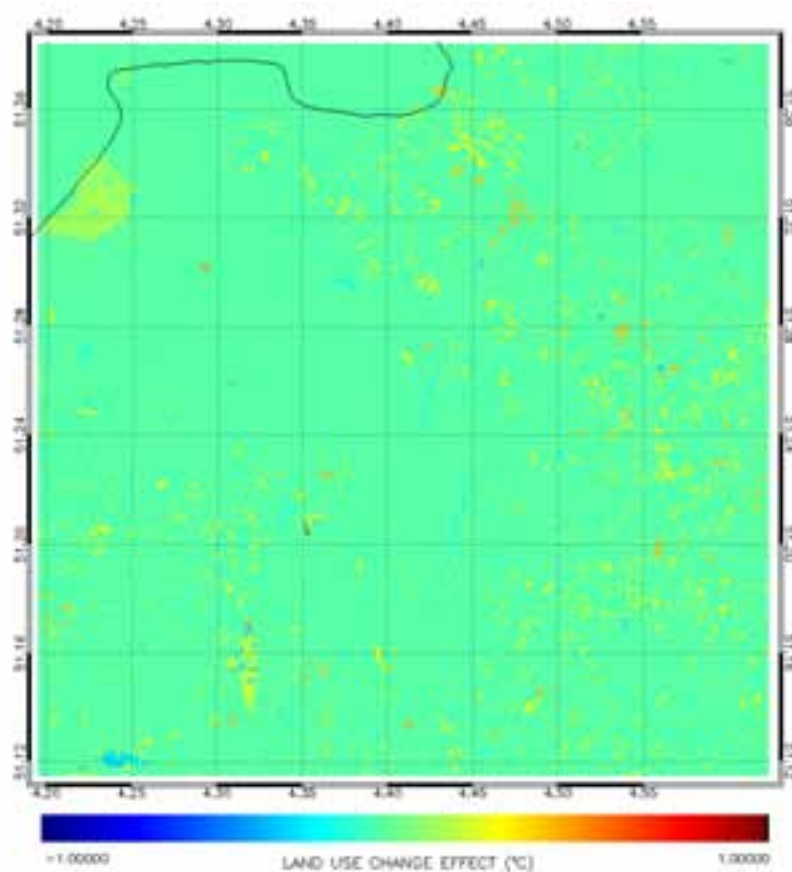


Figuur 105: Vergelijking tussen het aantal dagen met een nachtelijke minimum temperatuur boven de 18 °C voor het basis scenario links en het toekomst scenario rechts.

Als besluit van deze oefening dienen we te stellen dat het moeilijk is om expliciete informatie over de impact van veranderende meteorologische condities af te leiden op basis van de doorrekening van één enkele zomerperiode. Het is uiteraard niet voor niets dan men in klimaatscenario's typisch periodes van een 10-30 jaar doorrekent. Echter kunnen we wel op basis hiervan een inschatting doen van de impact van klimaatsverandering op het stedelijk warmte eiland effect voor Antwerpen als geheel, met name een toename van de gemiddelde intensiteit van het CLUHI effect met ongeveer 0.5°C, een 6-tal extra dagen met een nachtelijke minimum temperatuur boven de 18 °C en een lichte toename van de pieken in CLUHI intensiteit.

8.2.2. EFFECT VAN DE VERDERE VERSTEDELIJING

In onderstaande figuur is het gemiddelde temperatuurverschil weergegeven tussen het BAU landgebruiksprojectie scenario voor 2030 en het huidige landgebruiksscenario. De weergegeven temperatuurveranderingen zijn m.a.w. louter te wijten aan het veranderende landgebruik in het BAU scenario 2030 t.o.v. de huidige situatie volgens de modelresultaten van Engelen et al. (2011).



Figuur 106: Verschil in de gemiddelde temperatuur voor het BAU landgebruik scenario in 2030 ten opzichte van het landgebruik in 2010.

In onderstaande figuur hebben we een Google Earth overlay gemaakt van datzelfde resultaat.



Figuur 107: Google-earth overlay van de bovenstaande figuur.

De grote meerderheid van de locaties waar een duidelijke verandering in de gemiddelde temperatuur optreedt kent effectief een toename van de temperatuur. We merken dat het hoofdzakelijk de buurgemeenten zijn die ten gevolge van de verdere verstedelijking een toename van het CLUHI effect zullen kennen. Vooral in de oostelijke rand rond Antwerpen wordt een verdere uitbreiding van de bestaande verkavelingen verwacht, ten nadele van de bosrijke gebieden daar. De natuur zal hier dus alsmaar verder worden teruggedrongen, met alle gevolgen van dien, waaronder dus ook een toename van het SHE-effect met 0.5 tot 1°C. In Antwerpen zelf merken we al bij al relatief weinig verschil inzake CLUHI intensiteit t.g.v. het veranderende landgebruik, wat wel logisch is gezien daar minder ruimte is voor verdere verstedelijking op grote schaal. Enkel in het zuiden van de stad (Hoboken en Wilrijk) zien we verdere verstedelijking langs de bestaande assen.

Tot slot dienen we nog op te merken dat er een zekere voorzichtigheid geboden is bij de interpretatie van de resultaten. Met name zijn deze geïdentificeerde zones het resultaat van een landgebruiksprojectie aan de hand van een dynamisch landgebruiksmodel, er is m.a.w. enige

onzekerheid voor wat betreft de locatie van de individuele zones van sterke verstedelijking. De landgebruiksprojecties bevatten met name geen directe informatie afkomstig van concrete beleidsplannen van de Stad Antwerpen. De grote trends die we hieruit echter kunnen halen lijken wel relevant, met name : een toename van het SHE effect t.g.v. verstedelijking vooral in de buurgemeenten van Antwerpen, niet zozeer in de stad zelf, met een toename van ongeveer een 0.5 °C tot in bepaalde gevallen 1 °C gemiddeld.

HOOFDSTUK 9. CONCLUSIES EN BELEIDSAANBEVELINGEN

Dirk Lauwaet en Bino Maiheu - VITO

9.1. CONCLUSIES

In de voorafgaande hoofdstukken is een geïntegreerd onderzoek verricht naar de gevoeligheid t.a.v. het stedelijk hitte eiland effect van de stad Antwerpen in haar geheel en specifiek naar de verschillende buurten. Daarbij stonden een viertal vragen centraal. De antwoorden daarop zullen wij hier kort overlopen:

9.1.1. DOET HET STEDELIJK HITTE EILAND (SHE) EFFECT ZICH IN ANTWERPEN VOOR EN WAAR DAN HET MEEST?

Om deze vraag te beantwoorden zijn in de zomer van 2013 op twee locaties in de stad en op een locatie in de haven temperatuurmetingen verricht, naast de twee permanente meetstations die VITO reeds in de zomer van 2012 opstelde in het centrum en op het platteland. Daarnaast zijn nog meetdata van 3 andere locaties aangekocht. Deze puntmetingen van de luchttemperatuur werden vergeleken met de resultaten van een gebiedsdekkend model. Daarnaast is een studie gemaakt van de oppervlaktetemperatuur door middel van ASTER-satellietbeelden voor Antwerpen en omgeving. De oppervlakte temperatuur van die ASTER beelden vertaalden we naar een maat voor dagstress, die men als het gevolg van hitte kan op lopen. Overdag is blootstelling aan en terugkaatsing van hitte vanuit de ondergrond en omgeving immers het grootst. De luchttemperatuur geeft een maat voor de nachtstress; want dan is de eventuele stress als gevolg van de (overdag) opgewarmde luchttemperatuur immers het grootst.

Uit deze berekeningen blijkt dat de opwarming van het verstedelijkte deel van Antwerpen in vergelijking tot haar (landelijke en suburbane) omgeving wel degelijk aanzienlijk kan zijn. Soms loopt het verschil op tot bijna 30 °C voor de oppervlakte- en 8 à 9 °C voor de luchttemperatuur. Zulke verschillen kunnen bij temperaturen van meer dan dertig graden het verschil betekenen tussen hinderlijkheid, gezondheidsproblemen of voor sommigen zelfs de dood. Dit laatste is natuurlijk altijd gerelateerd aan de algehele conditie, gezondheid en/of gebrek aan vochttoediening/hitte regulerende maatregelen van de betreffende persoon.

Binnen Antwerpen worden de grootste oppervlakte temperaturen gevonden in het havengebied met z'n grote industriële terreinen. In het centrum zien we in het algemeen ook erg hoge temperaturen, vooral in het historisch centrum, het noorden en het oosten van de stad. De rol van stedelijk groen (voornamelijk grotere parken of dicht aangesloten bomenrijen) en open water als verkoelende aders doorheen de stad is heel nadrukkelijk aanwezig. Wat betreft de luchttemperaturen kent het stadscentrum de hoogste nachtelijke temperaturen, en is er minder variatie aanwezig. Enkel grote parken hebben een klein verkoelend effect. Ook de haven en de suburbane gebieden rond het centrum ondervinden hoge nachttemperaturen, binnen het grondgebied van de stad Antwerpen zijn er slechts enkele locaties aanwezig die een echt landelijk karakter hebben qua temperatuurverloop.

9.1.2. WAT ZIJN DE MEEST RELEVANTE FYSISCH OORZAKEN VOOR DIT SHE-EFFECT?

Op basis van literatuuronderzoek zijn in eerste instantie vier mogelijke factoren geïdentificeerd:

- de sky view factor (een maat voor bebouwingsdichtheid; of hoeveel hemel men nog kan zien)
- de fractie vegetatie (zowel naar aanwezigheid, omvang, als de dichtheid van groen)
- de fractie water (vooral de omvang en maat van waterlichamen)
- de fractie verharding (ook wel sealed layer genoemd, de mate waarin de ondergrond met bebouwing of verharding is bedekt)

In een regressie analyse hebben wij elk van deze fysische factoren nader onderzocht en gecorreleerd met de gemeten temperatuurwaarden. Uit deze regressie analyse bleek dat vooral de fractie vegetatie erg zwaar doorweegt (62% van de gemeten temperatuurverschillen zijn hieraan gelinkt). Het gaat hier niet om een individuele boom of grasveldje, maar vooral opgaand groen en met name ook de dichtheid daarvan. Een enkele boom heeft nauwelijks effect, maar literatuur geeft aan dat elke 100 m² opgaand groen reeds een reductie kan geven van 1 °C (Dimoudi and Nikolopoulou, 2003). Bomen kunnen daarbij bovendien overdag schaduw leveren en de dagstress verminderen.

Een tweede doorslaggevende factor voor Antwerpen is de fractie verharding, die uiteraard sterk verbonden is aan de hoeveelheid vegetatie. Hoe hoger de verstening van de stad, hoe hoger de luchttemperaturen. Voor de sky view factor zien we dan weer een duidelijk negatieve correlatie. Er geldt dus m.a.w. hoe hoger de SVF, hoe lager de temperatuur. Inderdaad, hoe meer open het stedelijk weefsel, hoe efficiënter het warmte kan verliezen en dus afkoelen.

De fractie water bleek voor de geanalyseerde metingen weinig tot geen verklarende kracht te hebben en geen verkoeling op te leveren. Het probleem hier kan zijn dat in de loop van de zomer het aanwezige (staande) water sterk kan opwarmen waardoor het zelfs een omgekeerd opwarmend effect kan hebben op (vooral) de luchttemperatuur. De geanalyseerde metingen werden ook in de nazomer verricht, wanneer het oppervlaktewater het warmst is. Die (opwarmende) effecten kunnen geminimaliseerd worden indien er sprake is van stromend water of een combinatie van waterelementen met opgaand groen aan de oevers.

9.1.3. WELKE BUURTEN ZIJN HET MEEST SHE STRESSGEVOELIG EN KWETSBAAR?

We weten nu waar het SHE-effect zich voordoet en waardoor dat komt, maar nog niet of dat ook erg is. Uit de literatuur blijkt dat sommige bevolkingsgroepen, werkers en bezoekers van de stad meer gevoelig zijn voor hittestress dan andere. Het zou dus kunnen dat een bepaalde buurt een iets kleiner SHE-effect ervaart dan een andere, maar er hier wel een grotere dichtheid aan hittestress gevoelige mensen wonen of werken. Dan zou die buurt dus toch meer beleidsprioriteit kunnen krijgen om de hitte aan te pakken.

De meest hitte-gevoelige leeftijden betreffen vooral kinderen (< 4 jaar) en ouderen (> 65 jaar). In combinatie daarmee bepaalt ook de aanwezigheid van kinderopvang en peuterspeelzalen, vooral die met een onbeschermd speelterrein, alsmede de aanwezigheid van rust- en verzorgingstehuizen, de hitte-gevoeligheid van een bepaalde wijk. Hetzelfde geldt voor zieken en dus ziekenhuizen. Voorts blijkt uit de wetenschappelijke literatuur dat met name lagere inkomensgroepen, werklozen, kansarmen en deels ook niet-Nederlands sprekenden gevoelig zijn voor hitte. Dit komt doordat zij

door hun woonomstandigheden, leefpatroon of vaak ook het ontberen van kennis of (financiële) middelen om zich adequaat tegen hitte te beschermen of mitigerende maatregelen te nemen, hitte-gevoelig zijn. Voor de niet-Nederlandstaligen kan het daarnaast moeilijk zijn om zich adequaat te informeren. Tenslotte blijkt uit de literatuur dat ook alleenstaanden gevoelig zijn voor hitte (doordat zij niet altijd door hun omgeving alert geattendeerd worden op de opkomende verschijnselen van uitdroging en hittestress). Voorts is het gewenst om inspannende lichaamsbeweging en zoveel mogelijk alcohol te vermijden op hittedagen; zoals bijvoorbeeld tijdens de Ten Miles of andere inspannende (sport)events op hittedagen. Juist op deze dagen kan uitdroging en zelfs de mortaliteitsgraad (potentieel) sterk toenemen.

In dit onderzoek hebben wij, op elk van deze demografische, sociaal-economische en kwetsbare functionele determinanten een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. In eerste instantie hebben we elk van deze determinanten enkelvoudig gewogen met de bij vraag 1 gevonden temperatuurverschillen naar de verschillende buurten. Daaruit werd een volledig beeld voor Antwerpen verkregen van welke buurten het meest kwetsbaar zijn voor hitte-stress, gerelateerd aan de functies en bevolkingsgroepen die er gehuisvest zijn. Daaruit hebben wij vijf 'case studies' geselecteerd, kwetsbare buurten met verschillende kenmerken en achtergronden, die we vervolgens nog aan een verdere kwalitatieve en kwantitatieve analyse hebben onderworpen.

- De cluster van buurten rond *Stuivenberg* in het noorden van de stad bleek het grootste probleemgebied te zijn in Antwerpen door het hoge inwonersaantal, de vele kansarmen en vreemdelingen, en de aanwezigheid van een groot ziekenhuis. De buurt wordt gekenmerkt door een bijzonder hoge versteningsgraad en erg weinig vegetatie.
- Op basis van het aantal inwoners en alleenstaanden bleek de *Museumwijk* in het zuiden erg kwetsbaar. Ook hier zien we veel verstening en weinig groen en blauw.
- Op het vlak van functies kwam de nabijgelegen buurt *Harmonie* als meest kwetsbaar uit de analyse, ondanks het feit dat hier wat meer vegetatie aanwezig is. Toch scoort ook deze buurt slecht op het vlak van verstening en sky view factor.
- Wind afwaarts van Antwerpen en net buiten de ring gelegen bleek ook *Ten Eekhove* een probleembuurt te zijn, door zijn hoge inwonersaantal en een grote groep jonge kinderen. Er is hier wel wat vegetatie en water aanwezig, maar dat ligt buiten de woonwijk.
- Tenslotte is ook de buurt *Lambrechtshoeken*, in het noorden van Antwerpen, geanalyseerd, ondanks het feit dat de SHE-factoren er redelijk goed scoorden, omwille van het grote aantal 65-plussers dat hier woont, een erg kwetsbare groep wat betreft hittestress.

9.1.4. NEEMT DE SHE-GEVOELIGHEID IN ANTWERPEN NAAR VERWACHTING IN DE NABIJE TOEKOMST TOE OF AF?

Tenslotte hebben we onderzocht welke ontwikkelingen tot circa 2030 verwacht kunnen worden en of die de voornoemde conclusies nog zouden beïnvloeden. Uit deze analyse kan evenwel in algemene zin geconstateerd worden dat de toekomstverwachtingen naar klimaat, landgebruik en verstedelijking de uitkomsten nog verder versterken en zelfs indringender maken. Uit een (beperkte) analyse van een realistisch toekomstscenario blijkt dat als gevolg van de klimaatverandering het gemiddeld stedelijk hitte-eiland effect nog met ongeveer 0.5 °C kan toenemen tegen 2030. Het stedelijk hitte-eiland effect in de binnenstad zit nu al op een erg hoog niveau en naar verwachting zal ook de duur van de hitte daar nog verder toenemen. Dat tikt met name door in die delen van de stad die thans al met een sterk SHE effect op hittedagen geconfronteerd worden. In de door VITO ontwikkelde landgebruik modellering worden overigens de belangrijkste wijzigingen verwacht aan de rand van de stad, vanwege de daar verwachte uitbreiding van de verstedelijking. Als gevolg hiervan verwachten we een toename van het SHE-

effect t.g.v. verstedelijking, vooral in de buurgemeenten van Antwerpen, met een lokale toename van ongeveer 0.5 °C tot in bepaalde gevallen 1 °C gemiddeld.

9.2. BELEIDSAANBEVELINGEN

Om het effect van hittestress voor de gezondheid van de bevolking te beperken, en het algemene welzijn in de stad te bevorderen, is derhalve aangescherpt beleid op dit terrein nodig. Dit betreffen zowel ruimtelijke, sociaal-economische, sensibiliserende, als andere organisatorische maatregelen. Want alhoewel wij, vanwege privacywetgeving, de mortaliteitsgraad in Antwerpen als het gevolg van hitte niet hebben kunnen achterhalen, wordt uit meerdere bronnen steeds meer duidelijk dat het bestaan van Stedelijke Hitte Eilanden in (grote) steden een groot effect heeft op het welbevinden en ook de gezondheid van de bewoners, werkers en bezoekers. Vandaar dat het ook steeds meer aandacht krijgt in de beleidsplannen (deels in voorbereiding) van het Vlaams Gewest, waaronder het Beleidsplan Ruimte Vlaanderen, het Klimaatbeleidsplan en de daaruit voortvloeiende acties, waaronder het Vlaanderen In Actie (VIA) traject. Zo is onlangs op het ViA-forum van 30 april 2013 bij de lancering van de vernieuwing van ViA (2013-2020) gesteld dat in het kader van de governance van stadsprogramma's (voor de 13 centrumsteden), men alleen die stadsprojecten wil gaan mee-financieren waar er sprake is van integrale duurzaamheid; met naast ruimte voor klimaat, ook (samenlevings)leefbaarheid en sociale rechtvaardigheid. Hierbij kan overigens sprake zijn van ruimtelijke win-win situaties, waarbij maatregelen tegen overstroming ook ten goede kunnen komen aan het SHE-beleid en omgekeerd. Sterker nog, het kan zelfs de algemene aantrekkelijkheid van de stad om er te wonen, werken en verblijven krachtig vergroten. De positie die Antwerpen thans op dit terrein inneemt kan daarop slim voorsorteren, door het huidige klimaatbeleid alvast uit te breiden met een krachtig SHE-luik. Daarbij bevelen wij aan zowel een generiek, als een gebiedspecifiek deel te onderscheiden. Het generieke deel betreft daarbij de algemene beleidsmaatregelen die men kan voorstellen om hitte-stress in Antwerpen te voorkomen; de gebiedspecifieke delen de meer concrete maatregelen die ook sterk context gevoelig zijn. Vanuit de algemene lijnen die uit het (hier kort samengevatte) onderzoek naar voren komen kan men bijvoorbeeld denken aan de volgende aanbevolen beleidslijnen:

9.2.1. GENERIEKE AANBEVELINGEN

Meer groen voorzien

Uitbreiding en verdichting van opgaand groen (dus bomen en struiken) en gevelgroen. Idealiter wordt dit groen niet alleen geconcentreerd op enkele plekken, maar gespreid langs 'klimaatassen', die tevens een betere 'doorluchtiging' van de stad mogelijk maken en eventueel de stad verbinden met het meer koele ommeland.

Op basis van eerder onderzoek lijkt gevelgroen een zeer interessante optie voor steden. Gevelgroen lijkt een zeer kostenefficiënte maatregel, met niet enkel positieve impact op het SHE, maar ook op het beperken van overstromingsrisico bij piekneerslag, het afvangen van fijn stof, het verfraaien van het straatbeeld met positieve invloed op het humeur en zelfs de gezondheid van de passanten. Een groener Antwerpen zal wellicht ook een positieve aantrekking hebben op toeristen. Ondersteuning door de stad met informatie en eventueel geschikt plantgoed, kan een sterke positieve invloed hebben. "Groene straten"-projecten kunnen mogelijk ook de sociale cohesie

versterken tussen de buurtbewoners, op basis van een gemeenschappelijk project en de contacten die dat meebrengt.

De doorstroming van water doorheen de stad bevorderen

De aanwezige natuurlijke waterlopen (Schelde) koppelen aan verbindende kanalen. Stromend water koelt de omliggende omgeving en vermindert de opwarming van het water zelf gedurende hete zomers. Waar nodig dienen bottlenecks zoveel als mogelijk verwijderd en/of verminderd te worden.

Zijn er oudere kleinere waterlopen die terug kunnen blootgelegd worden? Eenvoudigere ingrepen zijn de aanleg van (grotere) fonteinen met groen op pleinen. Of kleine stadswaterlopen, zoals de “Bächles” in Freiburg of mini-kanaaltjes in Amiens, die lokaal met platen bedekt worden waar nodig (zie onderstaande figuur). Combinatie met extra groen, kan het koelend effect versterken.



Box 2: Enkele voorbeelden van ‘Bächles’ en Waterstraten Freiburg/Amiens
(bron Kleerekoper 2009)

Water “vasthouden”

Tegelijkertijd is het gewenst om tijdens natte dagen zoveel mogelijk *water vast te houden*, waar mogelijk natuurlijk te zuiveren, om deze waterreservoirs in droge dagen weer te gebruiken. Naast grotere overstromingsbekkens kan hier ook gedacht worden aan het realiseren van (al dan niet tijdelijke) moderne wadi’s of water cisternes gedeconcentreerd doorheen de stad of waar mogelijk en/of tijdelijk geconcentreerd bij aanwezige ondergrondse ruimten, teneinde verkoelend water te kunnen aanwenden op hitte-dagen (zie voorbeeld Boston hieronder).



Box 3: Twee Uitwerkingen voor een klimaat-as en boven- en ondergrondse water opvang uit de Resilient City Vision 2035 voor Boston

De uitwerkingen zijn onderdeel van de Habitat renovatie plannen op Boston's grey- en brownfields. Naast een meer natuurlijke uitleg, en focus op ecologische verbeteringen, wordt in deze plannen ook voorzien in het meer klimaat robuust maken van de stad, met een bijzondere aandacht voor persoonlijke gezondheid van de bewoners en bezoekers. Daarnaast, dienen de voorstellen ook om het energie-portfolio van de stad te verbeteren via zonne-energie, biogas, en microWK generatie programma's.

Koppelen van groen en blauw

De koppeling van vegetatie en waterelementen, bevordert de evapotranspiratie van deze vegetatie, waarbij warmte uit de omgeving wordt onttrokken hetgeen resulteert in een koelend "oase"-effect. Deze koppeling kan eventueel geïntegreerd worden in een groen-blauw-route-netwerk met inbegrip van de hierboven vermelde "klimaatassen". Best is om zoveel als mogelijk groene oevers en bomenaanplant langs de rivier- en kanaallopen te bevorderen, teneinde het verkoelend effect van water zoveel mogelijk te benutten. Naar het voorbeeld van o.a. Amsterdam kan ook gedacht worden aan 'drijvende tuinen' die al dan niet tijdelijk in dokken of kanalen gesitueerd worden.



Box 4: Enkele voorbeelden van drijvende tuinen in Amsterdam

Voorzien van voldoende verkoelende plekken, badhuizen, watertappunten per buurt

Een plek waar verkoeling kan opgezocht worden op wandelafstand, kan de hitte op warme dagen en nachten veel draaglijker maken.



Box 5: De Venning Kortrijk

In de sociale aandachtswijk Venning is in 1999 gestart met de ontwikkeling van een stadsland groenzone Venning. Het project is ontwikkeld in een intensieve samenwerking met verschillende partners, waaronder de bewoners, de Stad Kortrijk, de Sociale Leerwerkplaats, Natuurpunt en de Koning Boudewijnstichting. Haar deel van de grond heeft de NMBS aan deze partijen in beheer gegeven. Het stadsland groengebied omvat volkstuintjes, een voetbalveldje, een poeltje, hooilanden, educatieve vlindertuin, boekweitakker, kraakwilgenbos en een verharde smalle toegang tot de wijk. Opengesteld in 2004 heeft het er toe geleid dat de kwaliteit en dynamiek van deze kansarme woonwijk aanzienlijk werd opgewaardeerd.

Integratie van anti-SHE-maatregelen bij aanleg van nieuwe wijken of openbare infrastructuur

Bij het inrichten van openbare ruimte en nieuwe wijken kunnen maatregelen genomen worden die het SHE beperken. We denken hierbij aan :

- Een consequente uitvoering van alle openlucht parkeerplaatsen met grasbeton en/of open groene tegels (reductie fractie verharding met 40-70%), niet alleen ter bevordering van de waterinlaat in de ondergrond, maar ook voor de beperking van de opwarming van de oppervlakte temperatuur. Hetzelfde kan waar mogelijk ook overwogen worden op de pleinen en openbare ruimten;
- Het zoveel mogelijk gebruik van reflecterende, lichte bouwmaterialen. Bijgevolg het voorkomen van asfalt in de buitenruimte, waar mogelijk herstel met licht gekleurde betonplaten en/of grassteen. Het verschil in oppervlaktetemperatuur tussen het warmere (donkere) asfalt en de minder warme beton oppervlakten kan oplopen tot 32 °C (Killingsworth *et al.*, 2011).
- Bevordering van de ventilatie in en om de wijk door bijvoorbeeld aanleg die rekening houdt met de overheersende windrichting.
- Vergroening van de buitenruimte: bvb. groene daken, bevordering groene gevels, schaduwplekken en pergola's.



Box 6: Woonerf, Ecoplus parkeren Delft/Haarlem

Verfijnen van een hitteplan

Noodzakelijk voor de in de toekomst naar verwachting regelmatig terugkerende hittedagen of hitteperiodes. Een dergelijk plan omvat **het vergroten van de sensibilisering en het adaptievermogen** van de bevolking, werkers en (onvermoede) bezoekers aan optredende hittestress. Daartoe zijn periodieke en ook op hittedagen toegespitste communicatie en informatie nodig; met name ook richting specifieke doelgroepen: bejaarden en kinderen, kansarmen, allochtonen en (onvermoede) bezoekers aan de stad. Versterken van de onderlinge sociale controle bij alleenstaanden en bejaarden.

Aangepaste zomerprogrammatie

Ondersteunen van aangepaste zomerse sport-, recreatie- en eventprogrammering, en een aangepast openlucht speelpleinprogramma op hittedagen. Gratis verlening van drinkwater (op hete dagen).

9.2.2. SPECIFIEKE AANBEVELINGEN

Naast deze generieke maatregelen is het gewenst om meer gebiedsgerichte maatregelen te overwegen. Dit dient vanzelfsprekend te gebeuren voor alle buurten, maar hier beperken we ons tot de voornoemde 5 'case studies', kwetsbare buurten met verschillende karakteristieken en achtergronden die een specifieke aanpak vereisen. Hier dient overwogen te worden of een proces van interactief ontwerpend onderzoek opgezet kan worden met betrokken actoren en bewoners, teneinde niet alleen SHE beperkende maatregelen te beproeven, maar ook de bekendheid met en het debat over hittestress te bevorderen. Zoals gezegd, zou het hier niet alleen om het SHE-effect kunnen gaan, maar kunnen win-win resultaten bereikt worden.

Er kan bijvoorbeeld gedacht worden aan de volgende onderdelen:

Noordwijk

Uit de hiervoor gegeven analyse is gebleken dat de buurtencombinatie rond Stuivenberg in de breedte één van de meest hitte-gevoelige en -kwetsbare wijken is. Dit is vooral ook het gevolg van de ruimtelijke structuur, die sterk versteend is en nauwe stegen omvat. Daarnaast zijn de binnenblokken ook sterk volgebouwd, wat de verharding nog heeft bevorderd. Er is weinig aaneengesloten groen te vinden, buiten wat bomen rond het ziekenhuis. Om die situatie te verbeteren en de Noordwijk binnen de gegeven beperkingen meer robuust te maken, kan wellicht gedacht worden aan de volgende mogelijkheden:

- Een zoveel mogelijk SHE-neutrale aanleg binnenstedelijke verdichting; waaronder
 - Het zoveel mogelijk gebruik van reflecterende, lichte bouwmaterialen;
 - Gebruik groene daken, bevordering groene gevels, schaduwplekken en pergola's;
 - Zoveel mogelijk voorkoming asfalt in de buitenruimte, waar mogelijk herstel met licht gekleurde betonplaten en/of grassteen
 - Het opzetten van collectieve ontwerpende verkenning voor een klimaat robuuste opzet, waarin ook de informatie, kennisuitwisseling met en zelfinitiatief van de (aangrenzende) bevolking zoveel mogelijk wordt gestimuleerd.
- Een consequente uitvoering van alle openlucht parkeerplaatsen met grasbeton en/of open groene tegels (reductie fractie verharding met 40-70%), niet alleen ter bevordering van de waterinlaat in de ondergrond, maar ook voor de beperking van de opwarming van de oppervlakte temperatuur. Hetzelfde kan waar mogelijk ook overwogen worden op de pleinen en openbare ruimten.
- Aangepast binnenblok beleid, door het afbreken of beperken van bebouwing en/of bevordering van een groene daken programma waar mogelijk.
- Bevordering van nieuwe buurtgebonden collectieve parkeerruimten en/of deel autogebruik, in combinatie met een bomen voor parkeren programma in de buurtstraten; mogelijk naar voorbeeld van de woonerven in Nederland.
- Sociaalgroene dooradering van de wijk naar voorbeeld van bijv. De Venning Kortrijk of de Foodscape Schilderswijk Den Haag (zie box).
- Bevordering schaduwrijke speelterreinen voor jonge kinderen en bij de betreffende peuter- en kleuteropvang; vergroening kleine pleintjes
- In alle geval een op hitte dagen toegespitst informatie- en communicatieprogramma voor de niet-Belgen in de wijk. Dit kan via in taal aangepaste brochures, informatieavonden in koffie-, buurt-, badhuizen e.d. of via de reguliere kanalen bij de school en moskee.



Specifiek voor de ziekenhuizen en verzorgingscentra in de buurt zijn er volgende aandachtspunten:

- Een hitte-stress ontlastend programma op hittedagen; het gaat hier vooral om het realiseren van voldoende koelruimtes in en om deze centra, het ontmoedigen van de bewoners van het doen van inspanningen op hitte dagen, het bevorderen van voldoende vochtinname, het vermijden van alcoholische dranken, koffie, suikerhoudende dranken etc., in combinatie met een extra toezicht op uitdroging en andere hitte-stress verschijnselen, zoals overmatig zweten, spierkrampen, hartkloppingen of verwardheid tot delirium etc.
- Waar mogelijk (her)openstelling en (her)vergroening van binnenblokken, in combinatie met een groen daken programma
- Bevordering van schaduwrijke wandelroutes in en om de centra, via bijvoorbeeld luifels, gebouwde constructies of een aantrekkelijk pergola-route.

Museumwijk

Een tweede hitte-gevoelige buurt in Antwerpen is de Museumwijk, door haar hoge inwonersaantal en de grote groep alleenstaanden, die als extra kwetsbaar gezien worden voor hitte-stress. De ruimtelijke structuur is ook in deze wijk erg versteend, waardoor veel maatregelen die voorheen zijn opgesteld ook hier gelden. Specifiek voor deze buurt lijkt het ons van belang om de versteende vlaktes van de grote pleinen en brede straten aan te pakken, waarbij gedacht kan worden aan:

- Een meer SHE neutrale heraanleg van de pleinen en openbare ruimten, zoals de Lambermontplaats en de Leopold de Waelplaats. Het doel is om zoveel mogelijk asfalt te voorkomen en te vervangen door (liefst) grassteen of licht gekleurd beton, met voldoende inbreng van schaduw creërende boomsoorten. Ook grote fontein en of stromende waterpartijen zouden een prima optie zijn. Uit uitgevoerde analyses in een ander project bleek immers dat een toevoeging van 20% water en groen (ipv. steen) een reductie van ongeveer 3,5 graden Celsius van de oppervlakte temperatuur (maat voor dagstress) kan hebben, hetgeen ook een positief effect heeft voor de luchttemperaturen 's nachts.
- Aangezien deze buurt erg dicht bij de Schelde ligt is er misschien een mogelijkheid om oude waterwegen terug open te leggen, of water te laten doorsteken naar en in de buurt, eventueel in combinatie met kleine stadswaterlopen (Bächles) à la Freiburg.
- Realiseren van nieuwe koele verbindingen naar de Schelde via de Scheldestraat of de Kasteelstraat door de aanleg van een schaduwrijke wandelroute via pergola's, luifels, en dergelijke.
- Verder kan er extra aandacht besteed worden om schaduwrijke plaatsen te creëren voor de buurtbewoners, eventueel ook bevordering van urban farming/volkstuintjes in binnenhoven (waar mogelijk). Dit kunnen ideale ontmoetingsplaatsen zijn voor de vele alleenstaanden in de buurt.

Dit alles in combinatie met de sensibilisering van de bevolking in de wijk.

Harmonie

Een derde hitte-gevoelige buurt die uit de kwetsbaarheidsanalyse naar voor kwam is Harmonie. Er zijn erg veel SHE-gevoelige diensten zoals ziekenhuizen, rusthuizen en kleuterscholen in deze buurt gevestigd. Harmonie is al een relatief groene buurt, dus eventuele beleidsmaatregelen kunnen zich hier concentreren op de diensten. Naast de maatregelen voor ziekenhuizen en verzorgingscentra die zijn uitgewerkt voor de Noordwijk, kunnen hier nog volgende SHE-maatregelen voorgesteld worden:

- Op het satellietbeeld is te zien dat de binnenterreinen van verschillende centra sterk volgebouwd zijn met allerhande hallen met grotendeels platte daken annex parkeerruimten. Om het SHE-effect op hitte dagen te minimaliseren kan aanbevolen worden vooral hier een groen daken programma uit te voeren. In combinatie met een ecologische heraanleg van de parkeerterreinen kan dit een markant hitte-stress ontlastend effect hebben.
- Eventueel kan gedacht worden aan de uitvoering van een experiment 'leefstraten' in combinatie met collectief parkeren aan de rand van de buurt (zo mogelijk met dubbelgebruik van de parkeerterreinen van de aanliggende centra), idealiter op groene tegel parkeerplaatsen.

Ten Eekhove

Ten Eekhove is een vierde buurt die hiervoor als SHE-kwetsbaar geïdentificeerd werd, dit vooral als gevolg van het grote aandeel inwoners en jonge kinderen. Ruimtelijk bestaat de buurt uit smalle straatjes met lage bebouwing, met in het zuidwesten de parking van het sportpaleis en de rivier 'Groot Schijn'. Deze omgeving zal allicht grondig veranderen in de nabije toekomst als gevolg van het Oosterweelproject, waardoor eventueel mogelijkheden kunnen ontstaan om enkele SHE-ontlastende maatregelen door te voeren. Naast de voornoemde voorstellen voor andere wijken kan hierbij gedacht worden aan:

- Het zoveel als mogelijk bevorderen van groene oevers en bomenaanplant langs de rivier, teneinde het verkoelend effect van het water zoveel mogelijk te benutten. Dit heeft potentieel een groot verkoelend effect op de warmte die vanuit de stad naar hier wordt getransporteerd bij zuidwestenwind.
- Een uitvoering van de grote openlucht parkeerplaatsen met grasbeton en/of open groene tegels, niet alleen ter bevordering van de waterinlaat in de ondergrond, maar ook voor de beperking van de opwarming van de oppervlakte temperatuur.
- Bevordering van de ventilatie in en om de buurt door bijvoorbeeld aanleg van een overheersende oriëntatie in noordwest-zuidoost richting
- Bevordering van schaduwrijke speelterreinen voor jonge kinderen en bij de betreffende peuter- en kleuteropvang.

Lambrechtschoeken

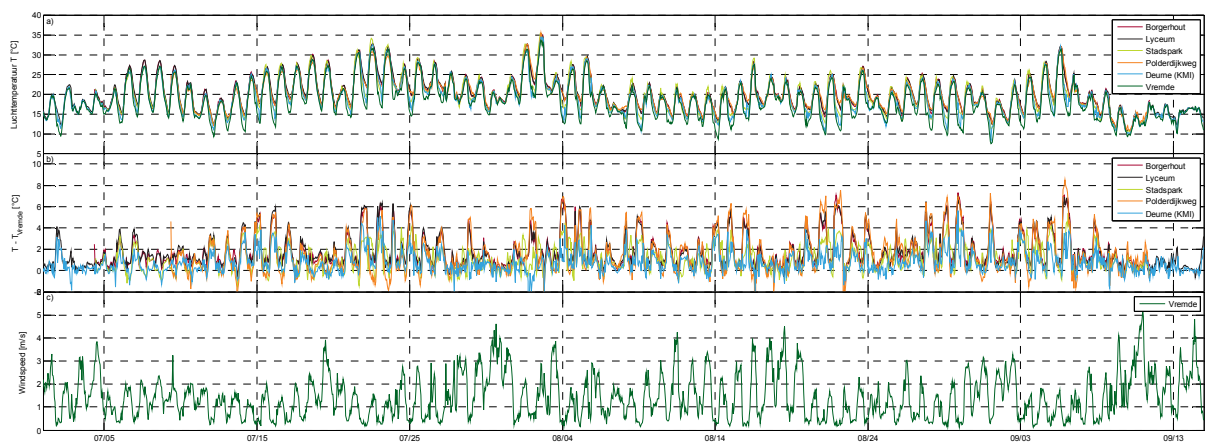
Tenslotte Lambrechtshoeken, SHE-kwetsbaar omwille van het grote aantal 65-plussers in de buurt. Aangezien er reeds veel groen aanwezig is - de bovengemiddelde versteningsgraad is eventueel een aandachtspuntje - kan hier een gericht beleid gevoerd worden naar het informeren en beschermen van de oudere bevolking tegen hitte-stress. Mogelijke maatregelen hiervoor zijn:

- Het belangrijkste lijkt ons de doelgroep te informeren en kennisuitwisseling met en zelfinitiatief van de bevolking zoveel mogelijk te stimuleren.
- Een hitte-stress ontlastend programma op hittedagen; het gaat hier vooral om het realiseren van voldoende koelruimtes, het bevorderen van voldoende vochtinname, het vermijden van alcoholische dranken, koffie, suikerhoudende dranken etc., in combinatie met een extra toezicht op uitdroging en andere hitte-stress verschijnselen, zoals overmatig zweten, spierkrampen, hartkloppingen of verwardheid tot delirium etc.
- Aangepaste sport- en recreatieprogrammering op hittedagen, in combinatie met een daarop aangepast sensibiliserings- en informatieprogramma, waaronder bijvoorbeeld uitvoering hitterampenplan, uitgifte van gratis drinkwaterflesjes bij cafés en restaurants, verkoelende tijdelijke waterfonteinen etc .
- uitvoering van watertappunten en een aangepast openbaar drinkwaterplan

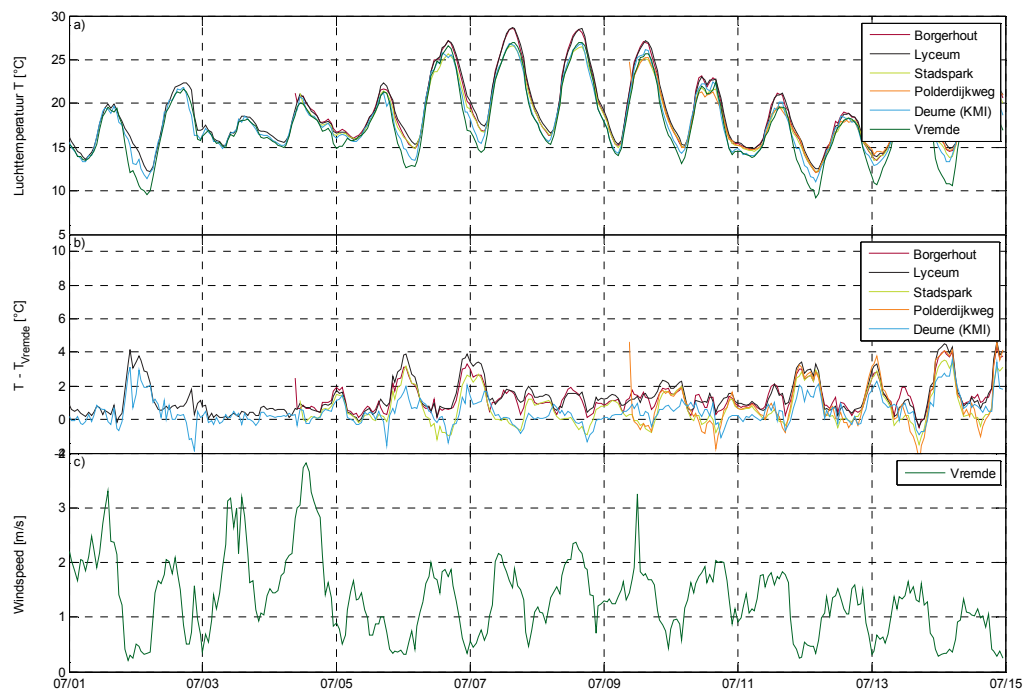
BIJLAGE A : TIJDSREEKSEN VOOR VOLLEDIGE ZOMERPERIODE VOOR IN-SITU METINGEN

Onderstaande figuren tonen de tijdsreeksen van de gemeten luchttemperaturen gedurende de periode 1 juli 2013 tot 15 september 2013. We beperken ons in deze grafieken tot de stations Borgerhout, het KLA, stadspark, de Polderdijkweg, Deurne en Vremde. Er is telkens een grafiek opgenomen van de luchttemperatuur zelf, eronder is telkens het SHE effect afgebeeld, waarbij we het station in Vremde als rurale referentie gebruiken. In een derde paneel is de windsnelheid zoals gemeten in Vremde ook afgebeeld.

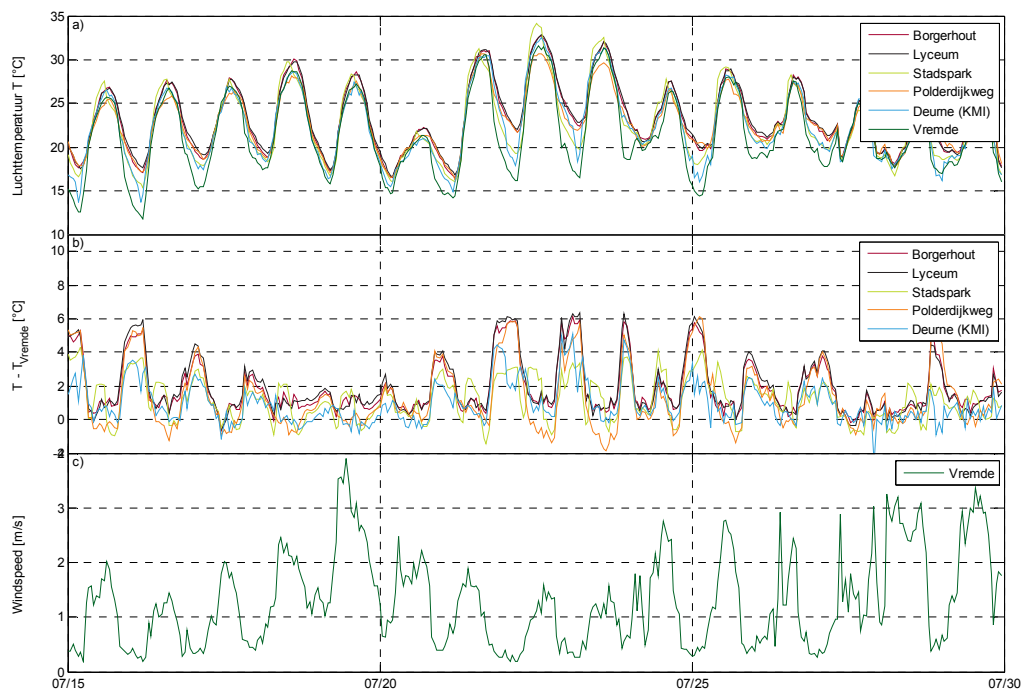
In een eerste figuur beelden we de ganse zomer periode af, daarna zoomen we in op 2-wekelijkse intervallen.



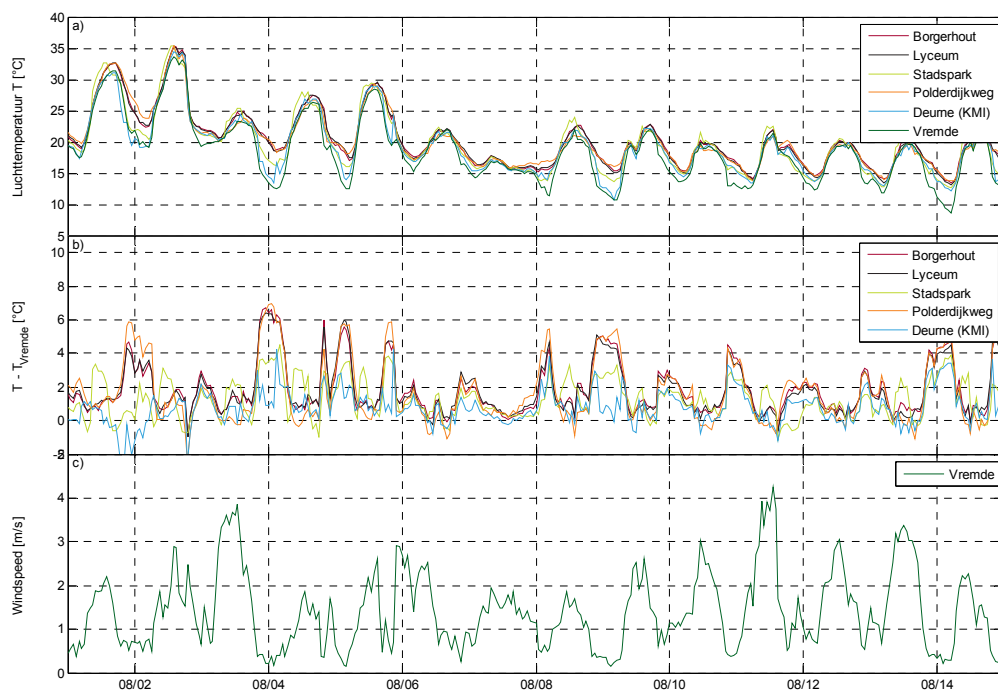
Figuur 108 : Tijdsreeksen van gemeten luchttemperatuur, het verschil van de stedelijke stations met de rurale referentie en de windsnelheid.



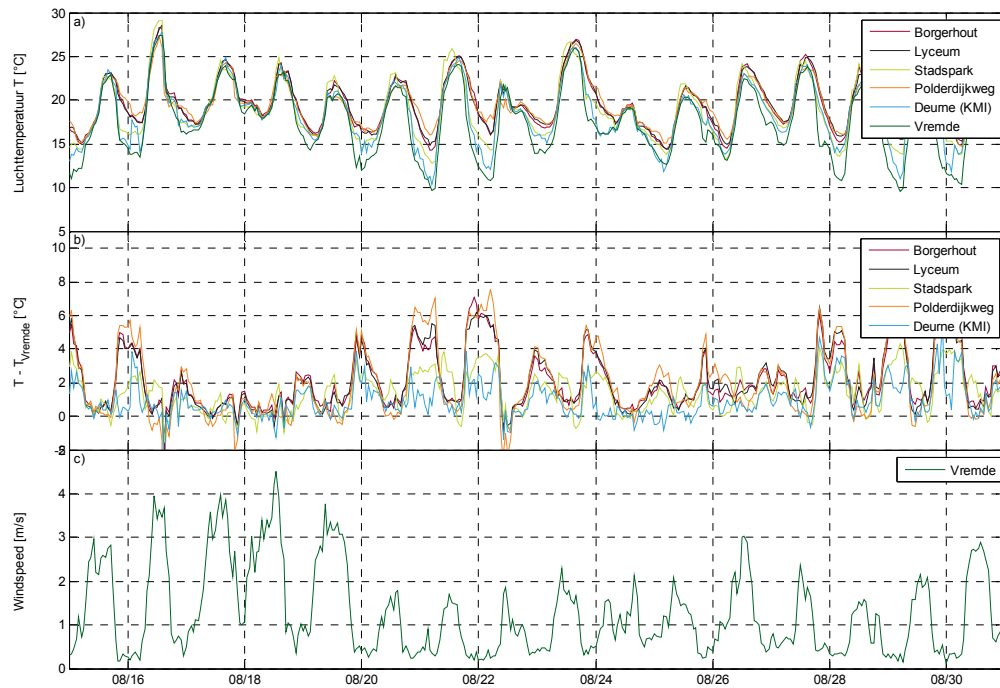
Figuur 109 : Tijdsreeksen van gemeten luchttemperatuur, het verschil van de stedelijke stations met de rurale referentie en de windsnelheid. De afgebeelde periode hier is 01/07/2013 tot 15/07/2013.



Figuur 110 : Tijdsreeksen van gemeten luchttemperatuur, het verschil van de stedelijke stations met de rurale referentie en de windsnelheid. De afgebeelde periode hier is 15/07/2013 tot 31/07/2013.



Figuur 111 : Tijdsreeksen van gemeten luchttemperatuur, het verschil van de stedelijke stations met de rurale referentie en de windsnelheid. De afgebeelde periode hier is 01/08/2013 tot 15/08/2013.



Figuur 112 : Tijdsreeksen van gemeten luchttemperatuur, het verschil van de stedelijke stations met de rurale referentie en de windsnelheid. De afgebeelde periode hier is 15/07/2013 tot 31/08/2013.

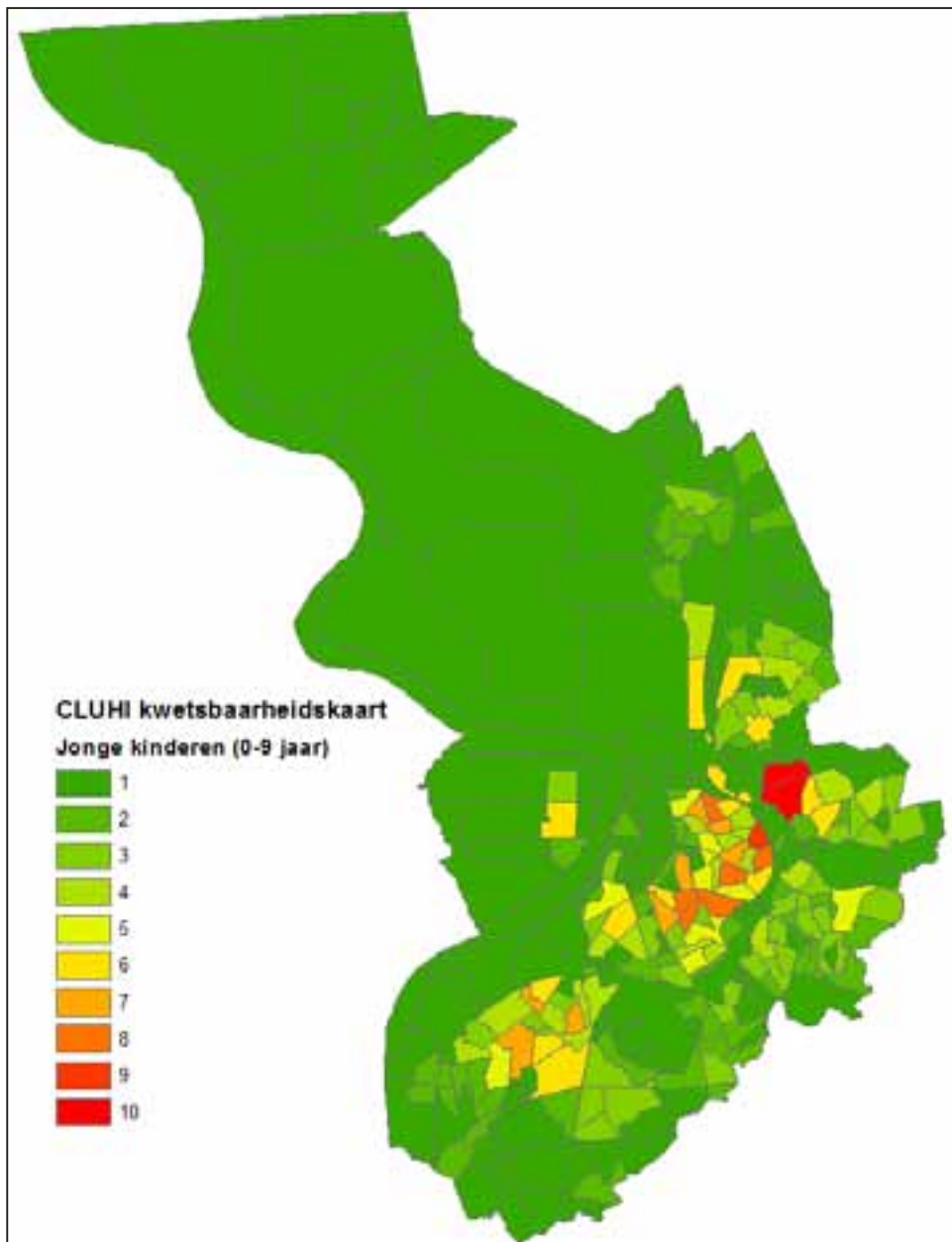


Figuur 113 : Tijdsreeksen van gemeten luchttemperatuur, het verschil van de stedelijke stations met de rurale referentie en de windsnelheid. De afgebeelde periode hier is 01/09/2013 tot 15/09/2013.

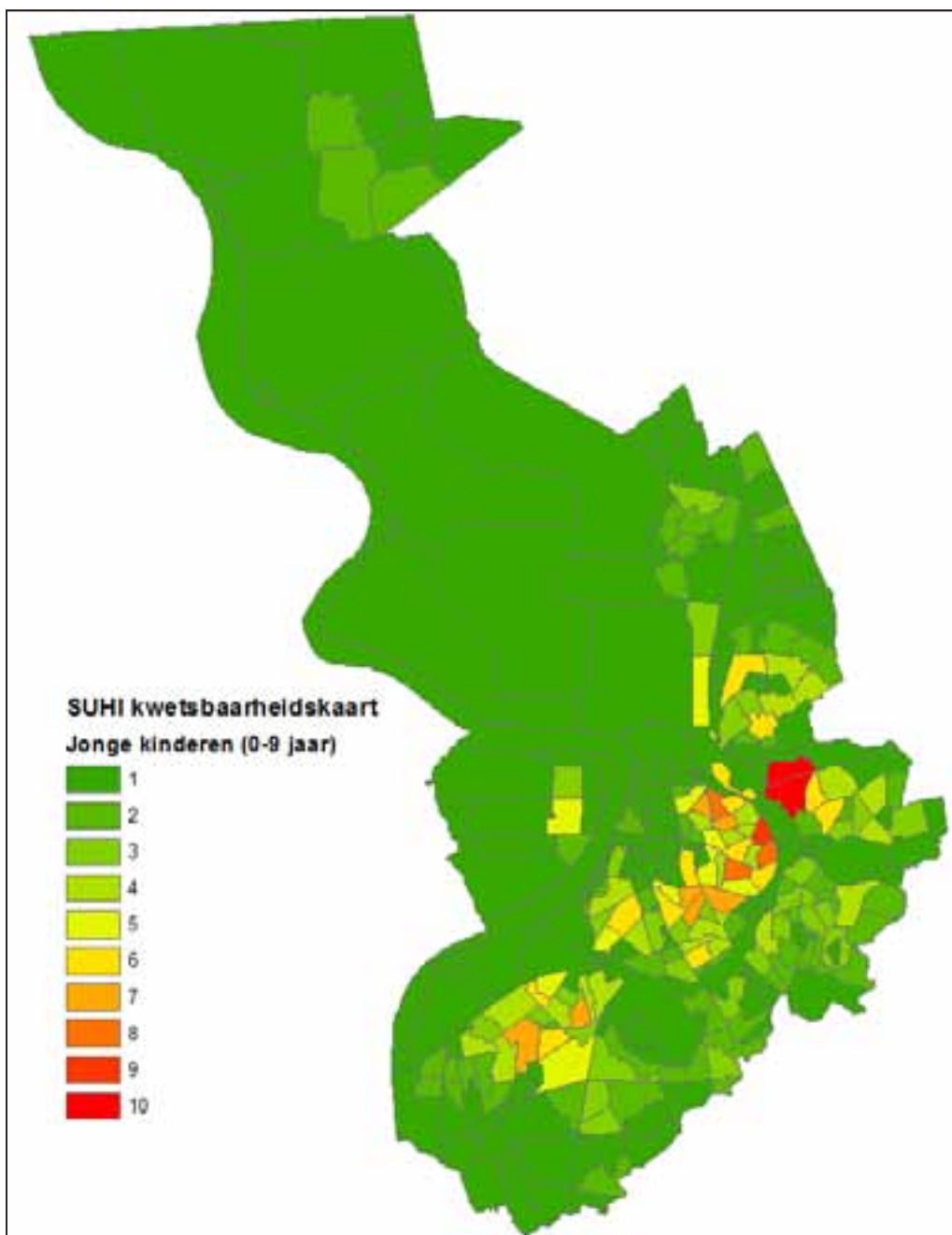
BIJLAGE B : SHE KWETSBAARHEIDSKAARTEN

Onderstaande figuren tonen het volledige beeld voor Antwerpen wat betreft de SHE kwetsbaarheid voor alle verschillende parameters, opgelijst in Tabel x, zowel voor de dag- als de nachtstress. De scores per parameter zijn telkens herleid naar 10 categorieën. Dit gebeurde op basis van een 'gelijke interval' indeling, tenzij anders vermeld in het onderschrift van de figuur.

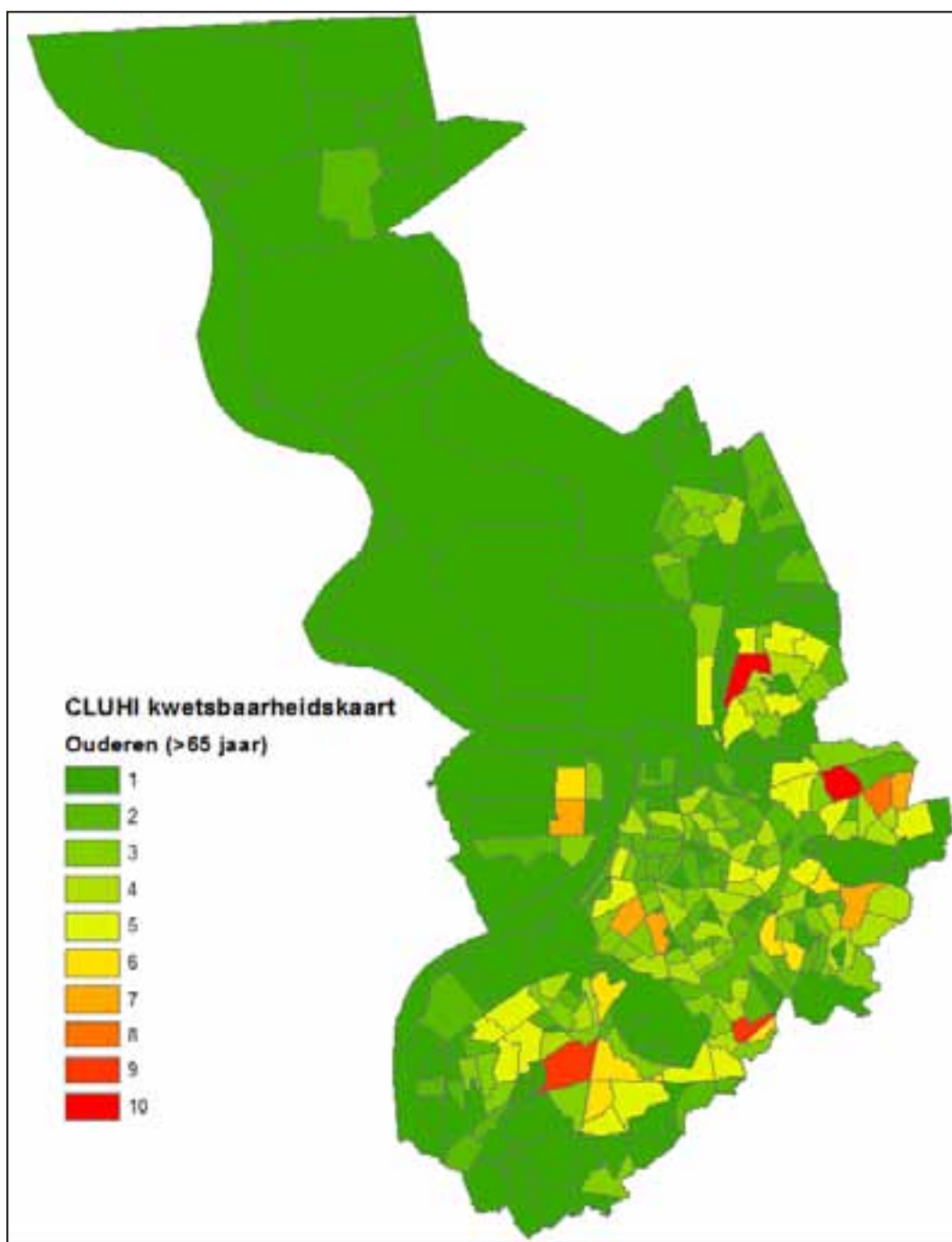
Demografische parameters



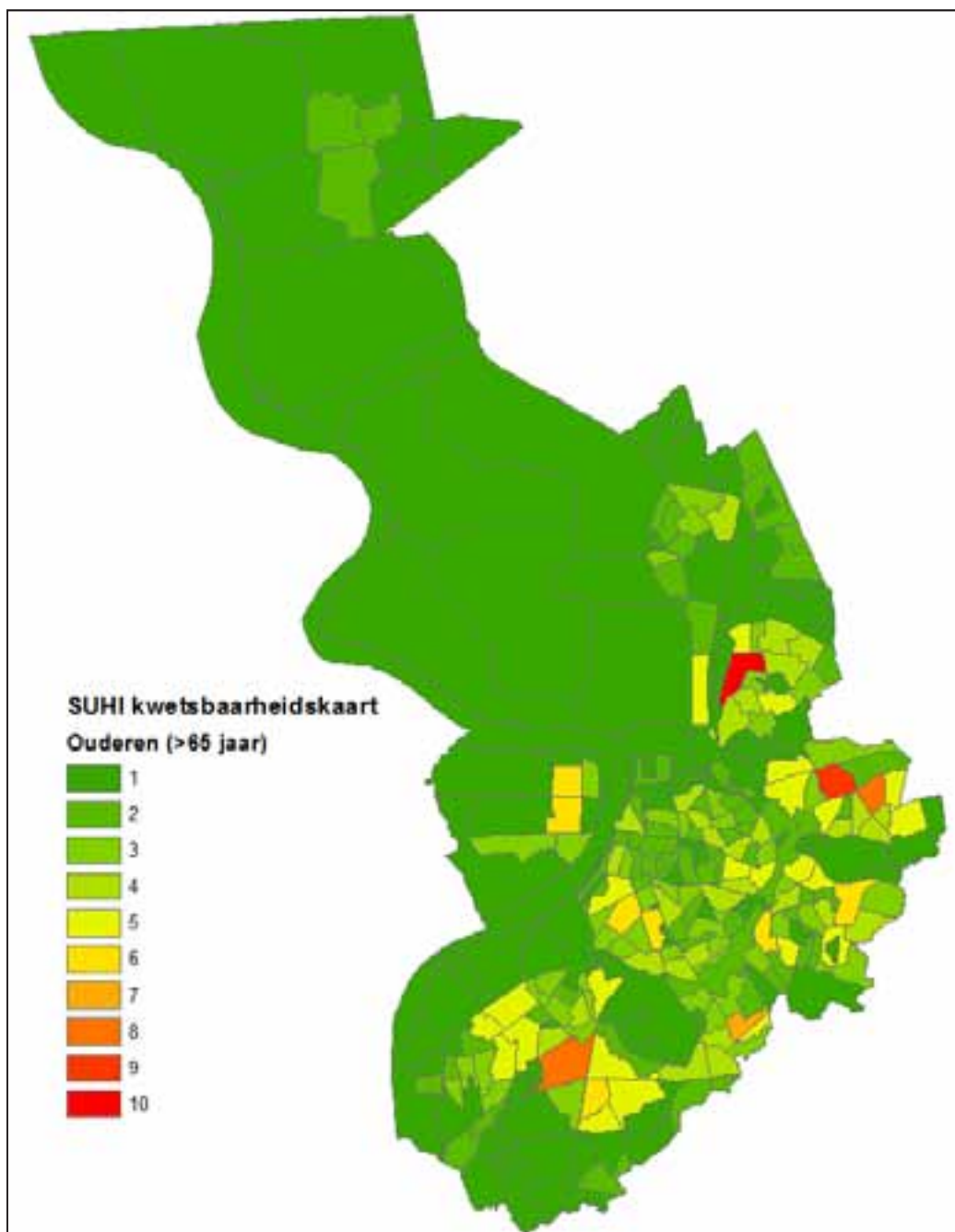
Figuur 114: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft jonge kinderen (0-9 jaar).



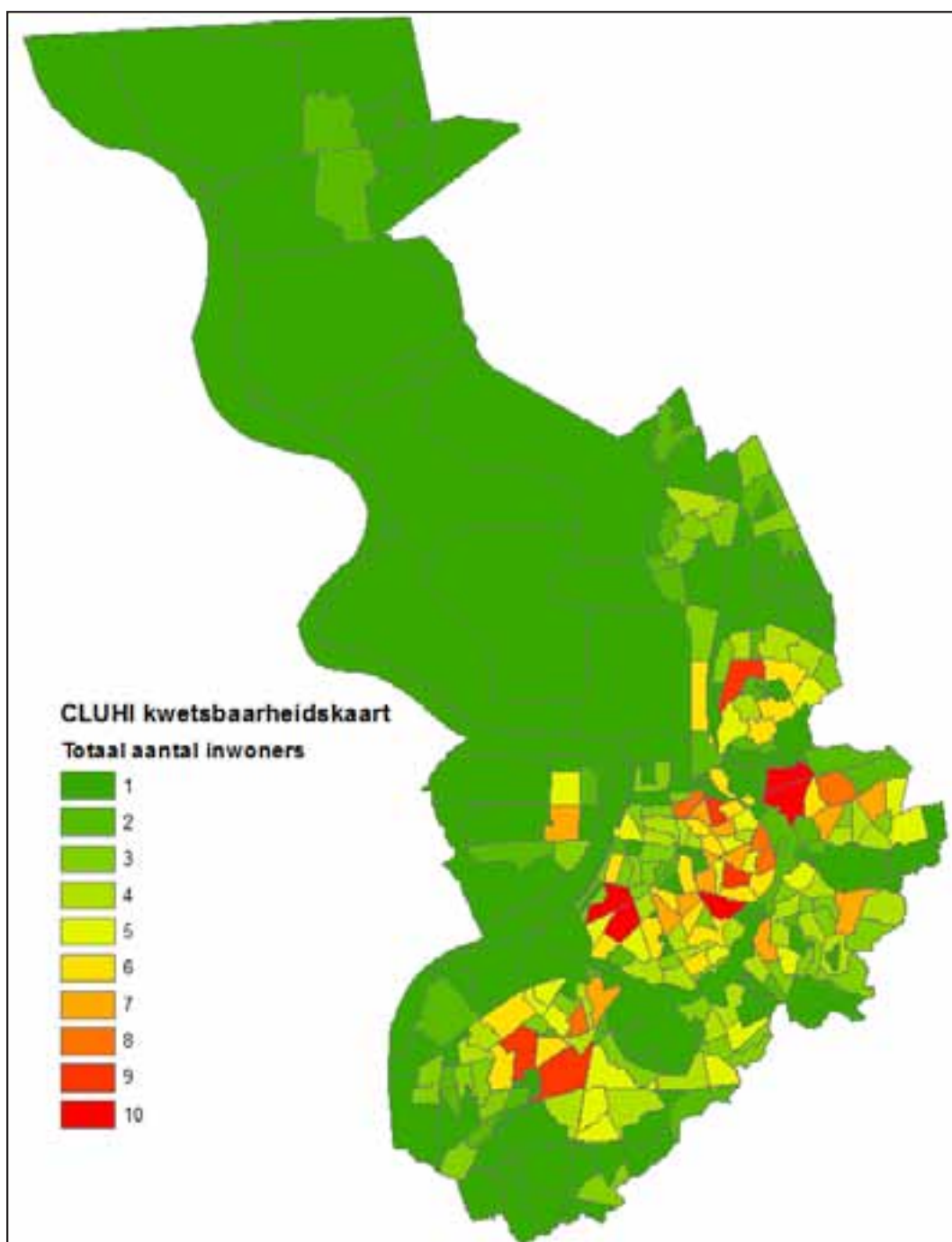
Figuur 115: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft jonge kinderen (0-9 jaar).



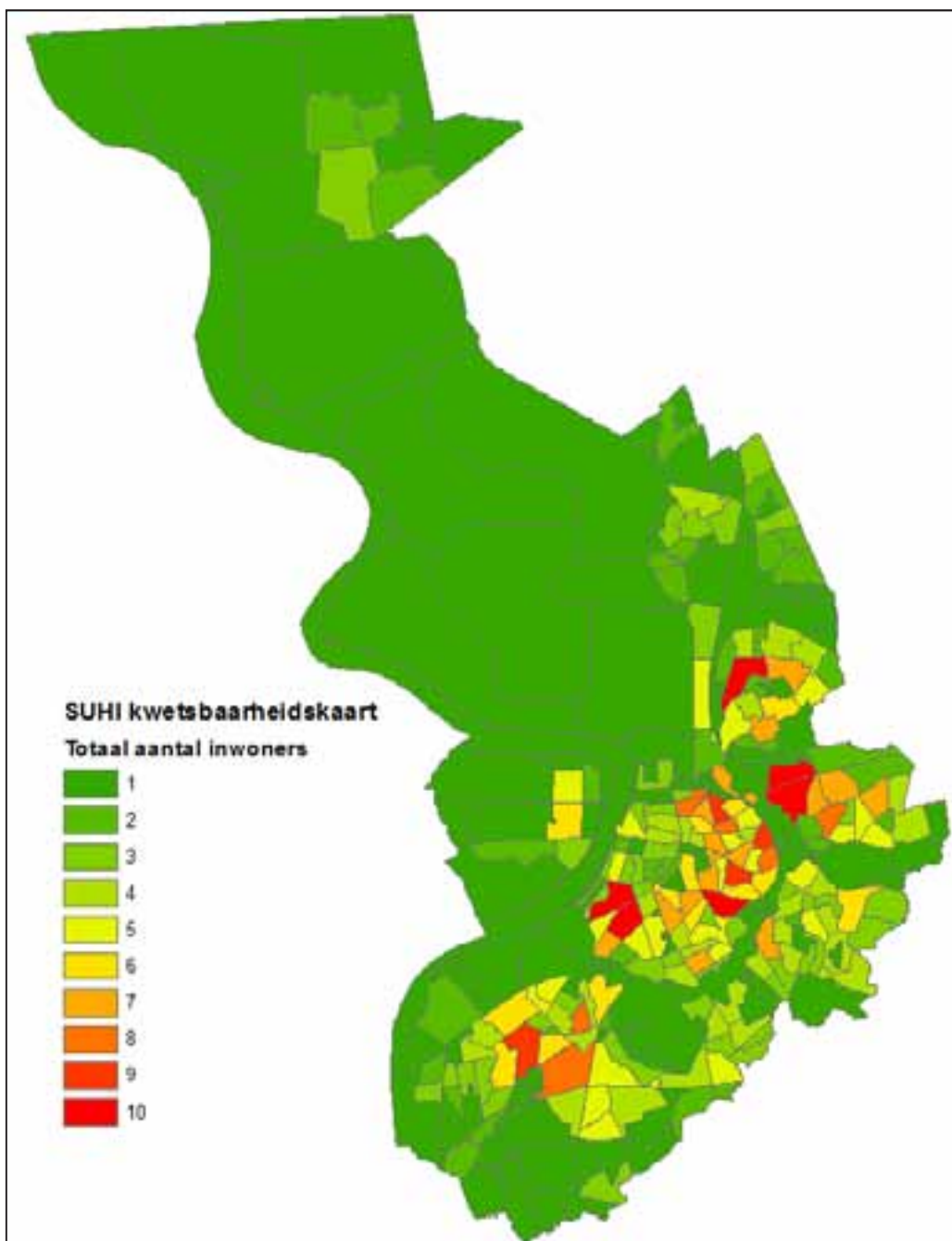
Figuur 116: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft ouderen (>65 jaar).



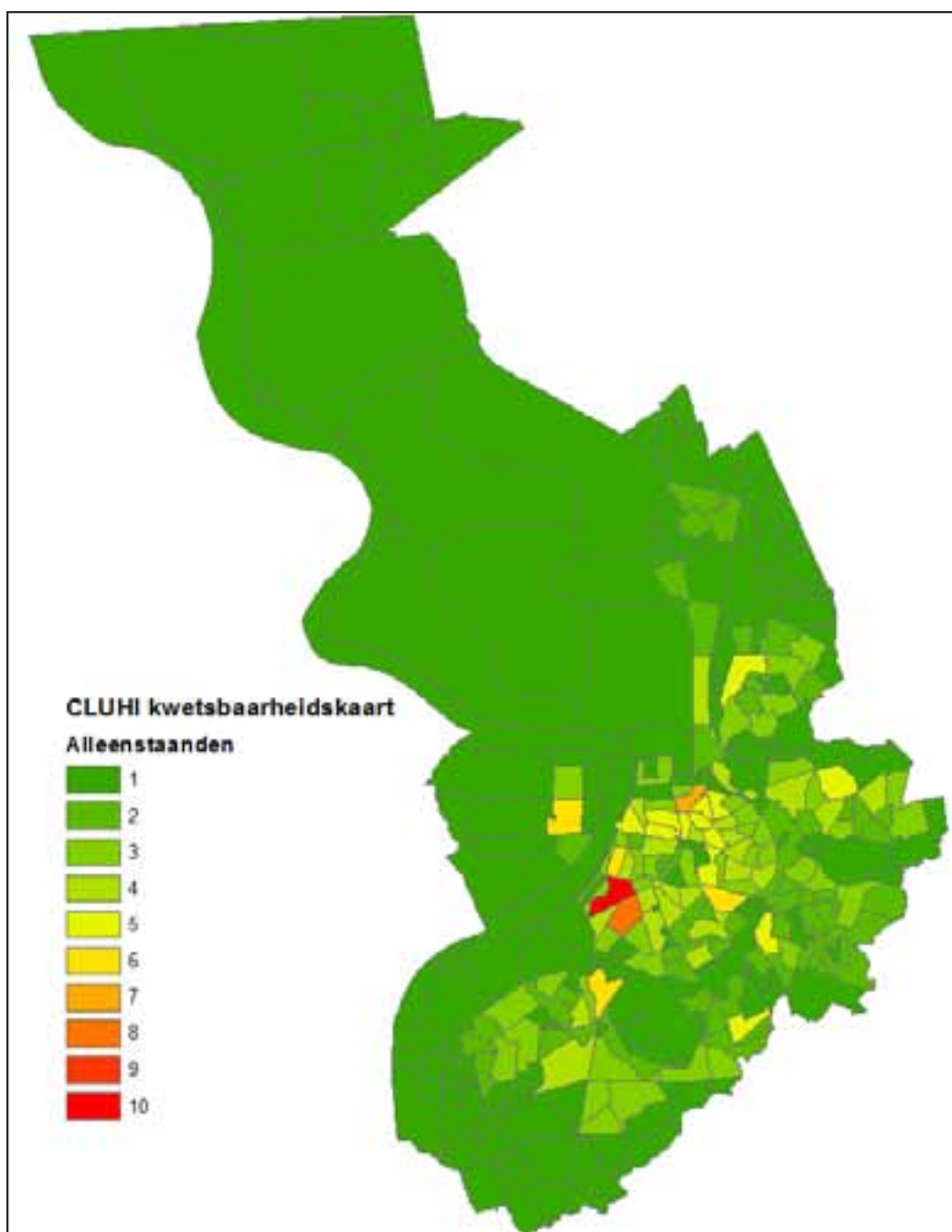
Figuur 117: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft ouderen (>65 jaar).



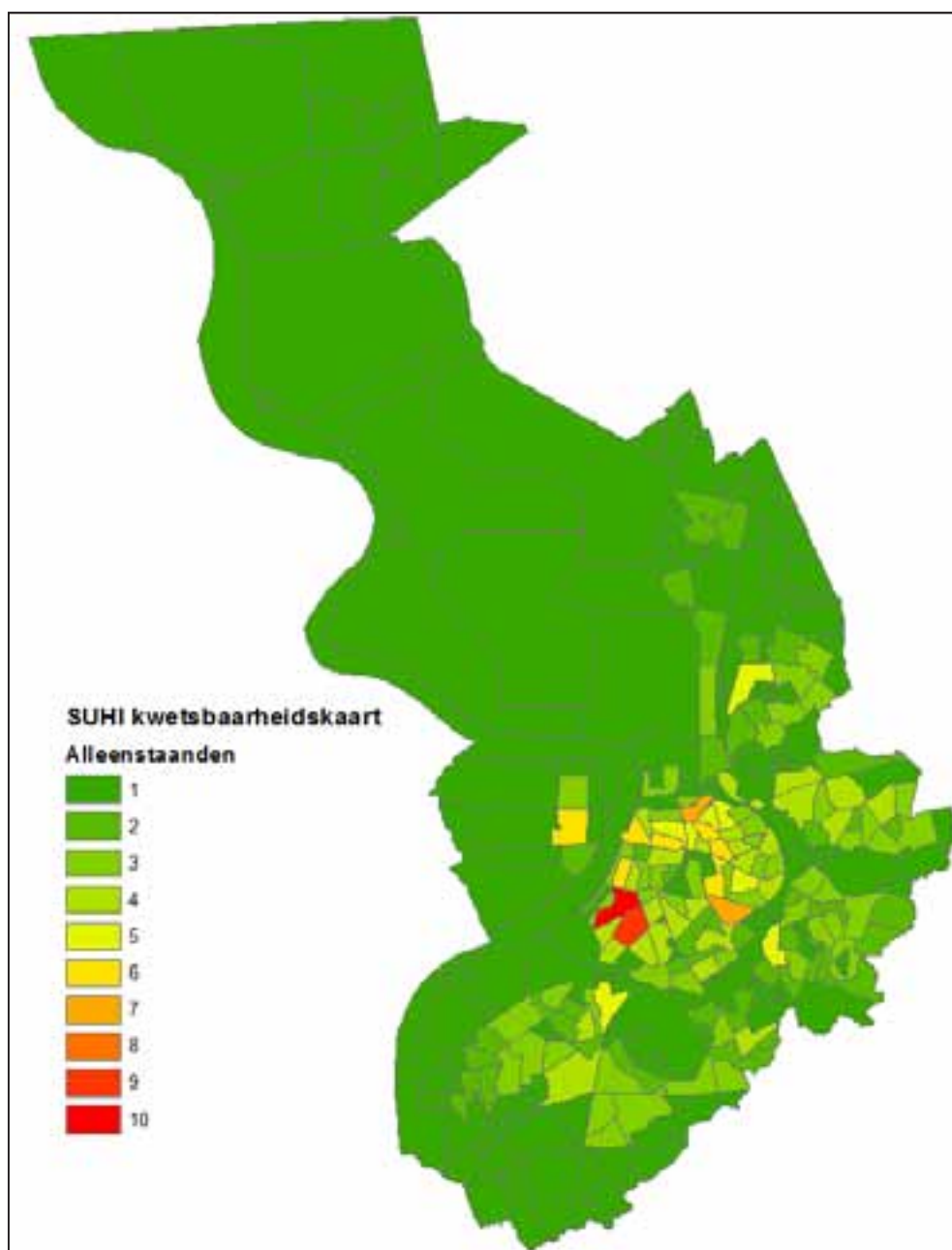
Figuur 118: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft het totaal aantal inwoners.



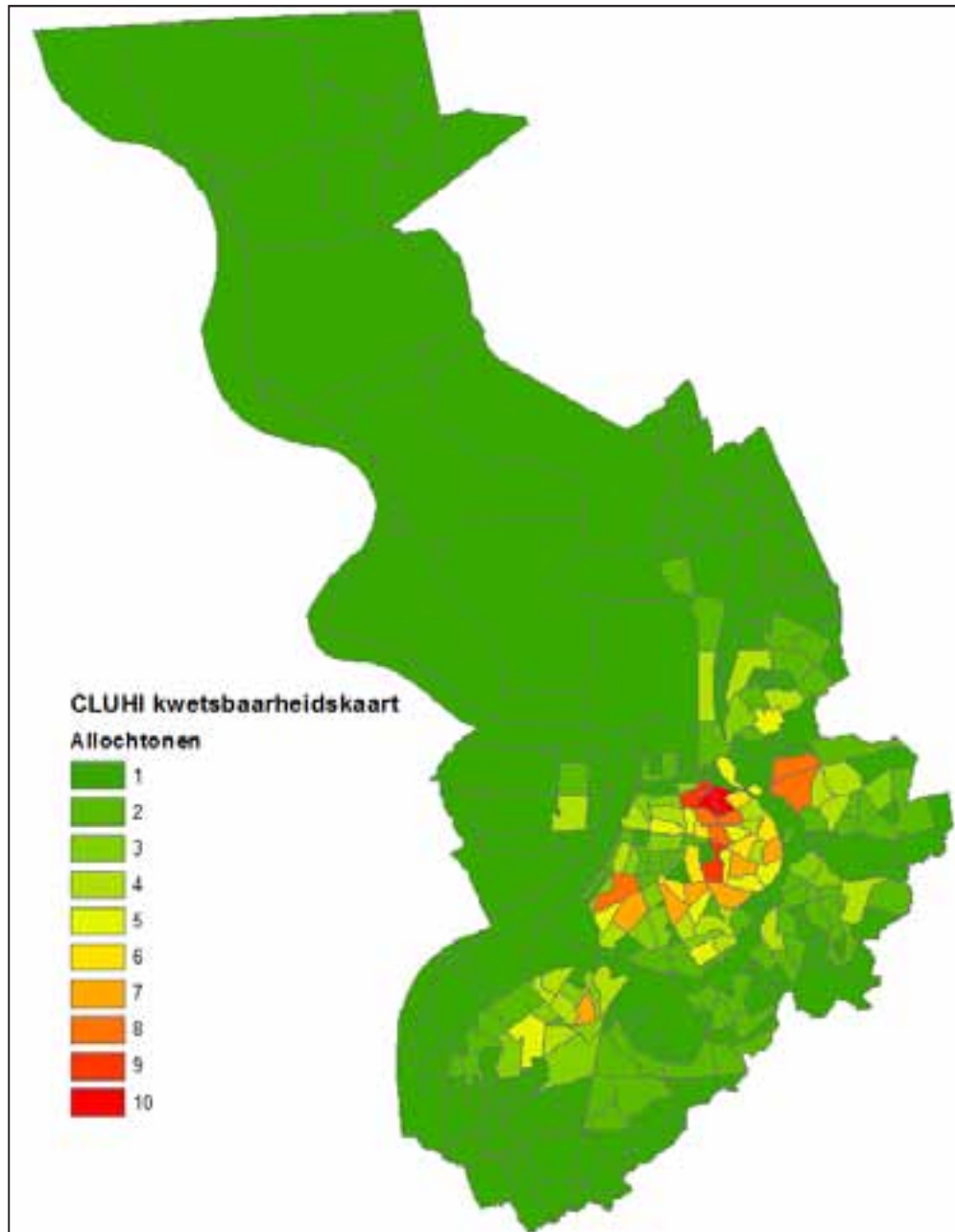
Figuur 119: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft het totaal aantal inwoners.



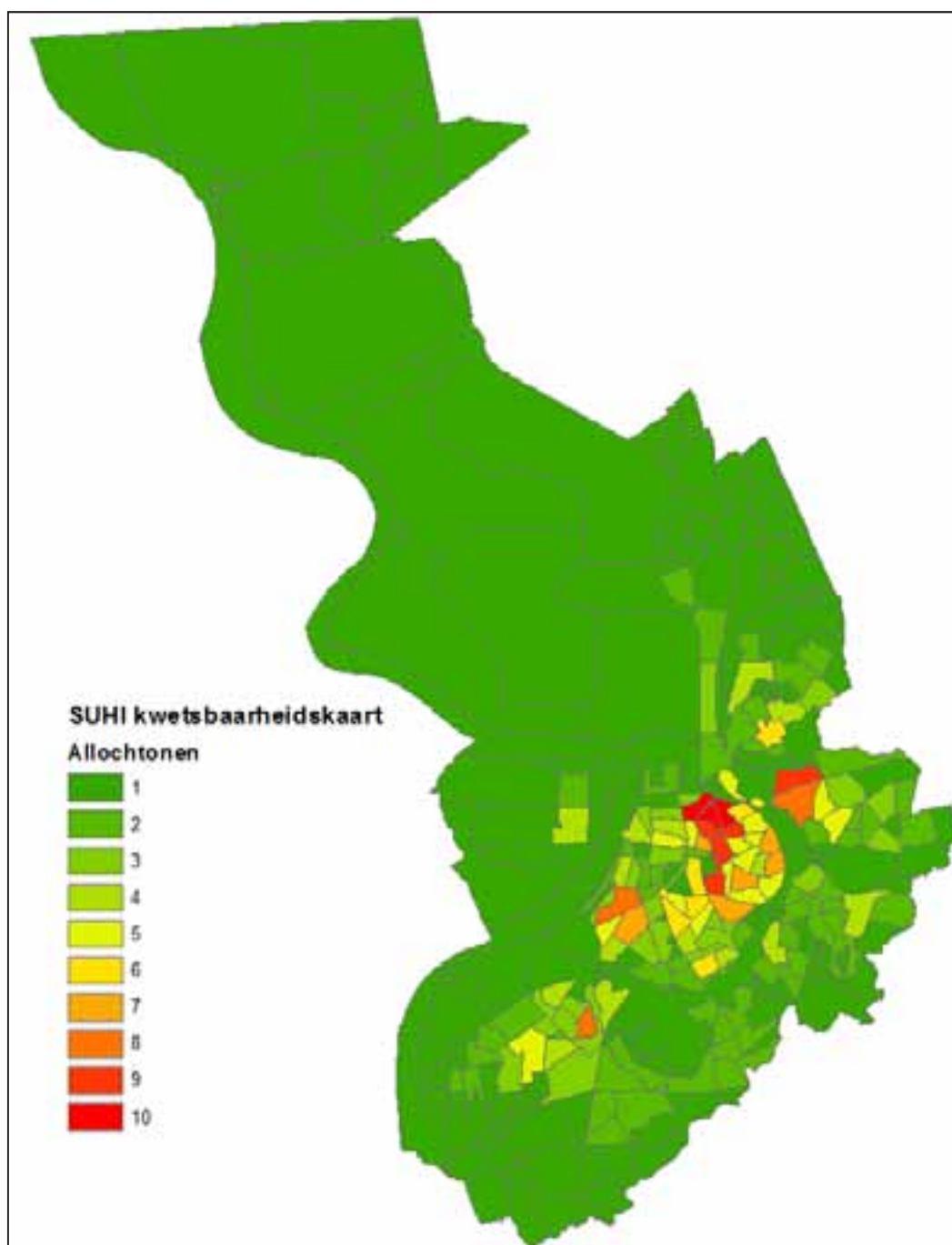
Figuur 120: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft het aantal alleenstaanden.



Figuur 121: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft het aantal alleenstaanden.

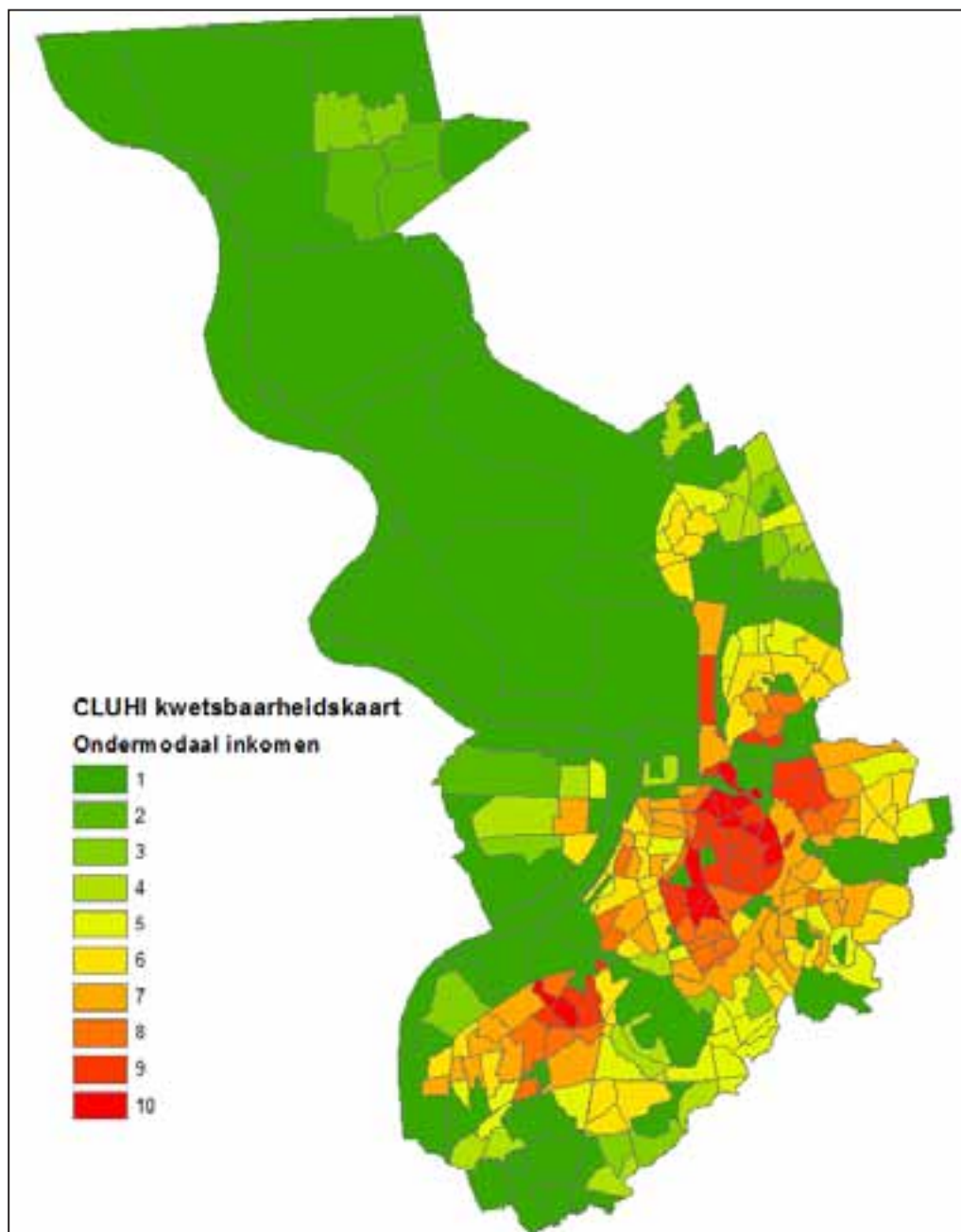


Figuur 122: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft het aantal allochtonen.

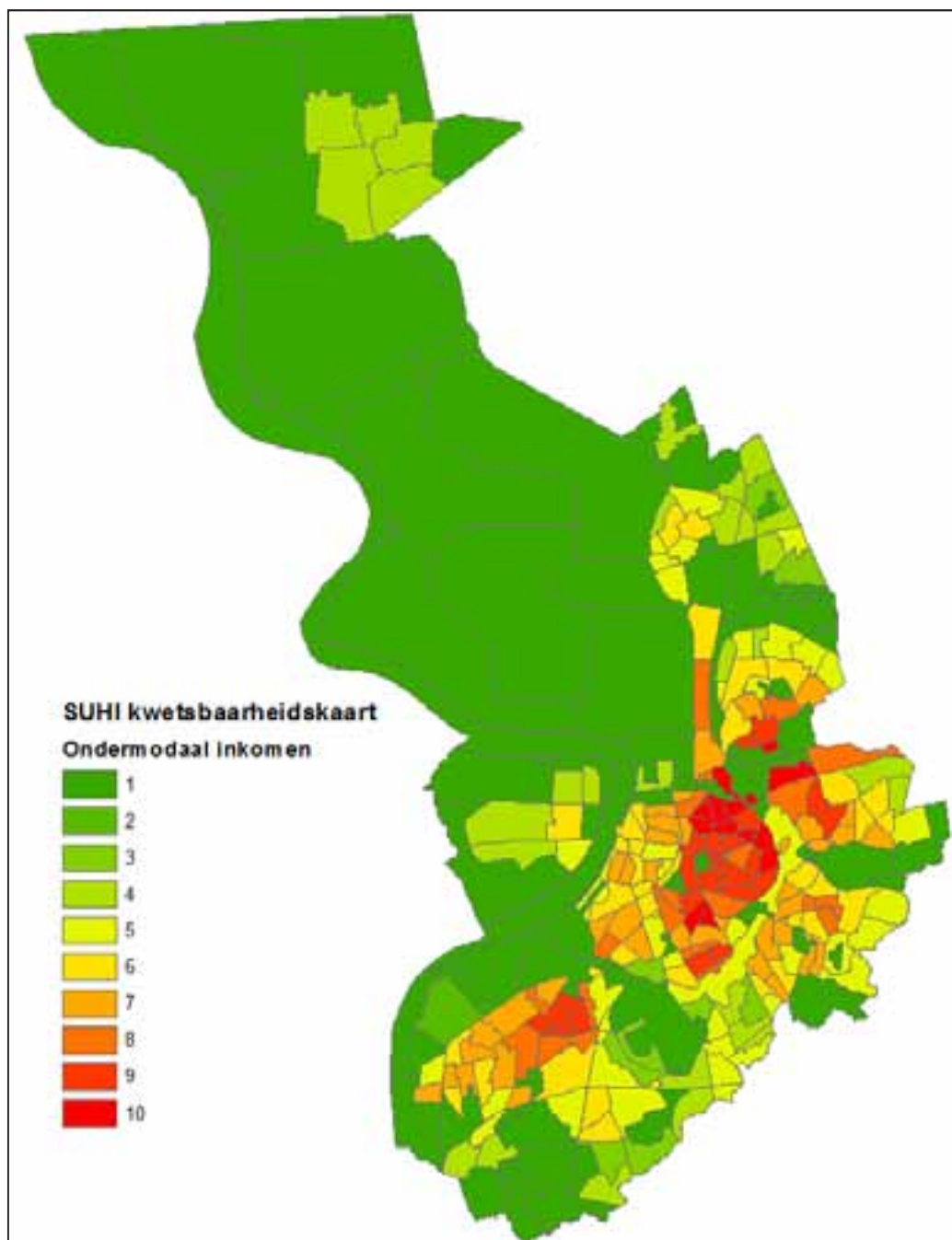


Figuur 123: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft het aantal allochtonen.

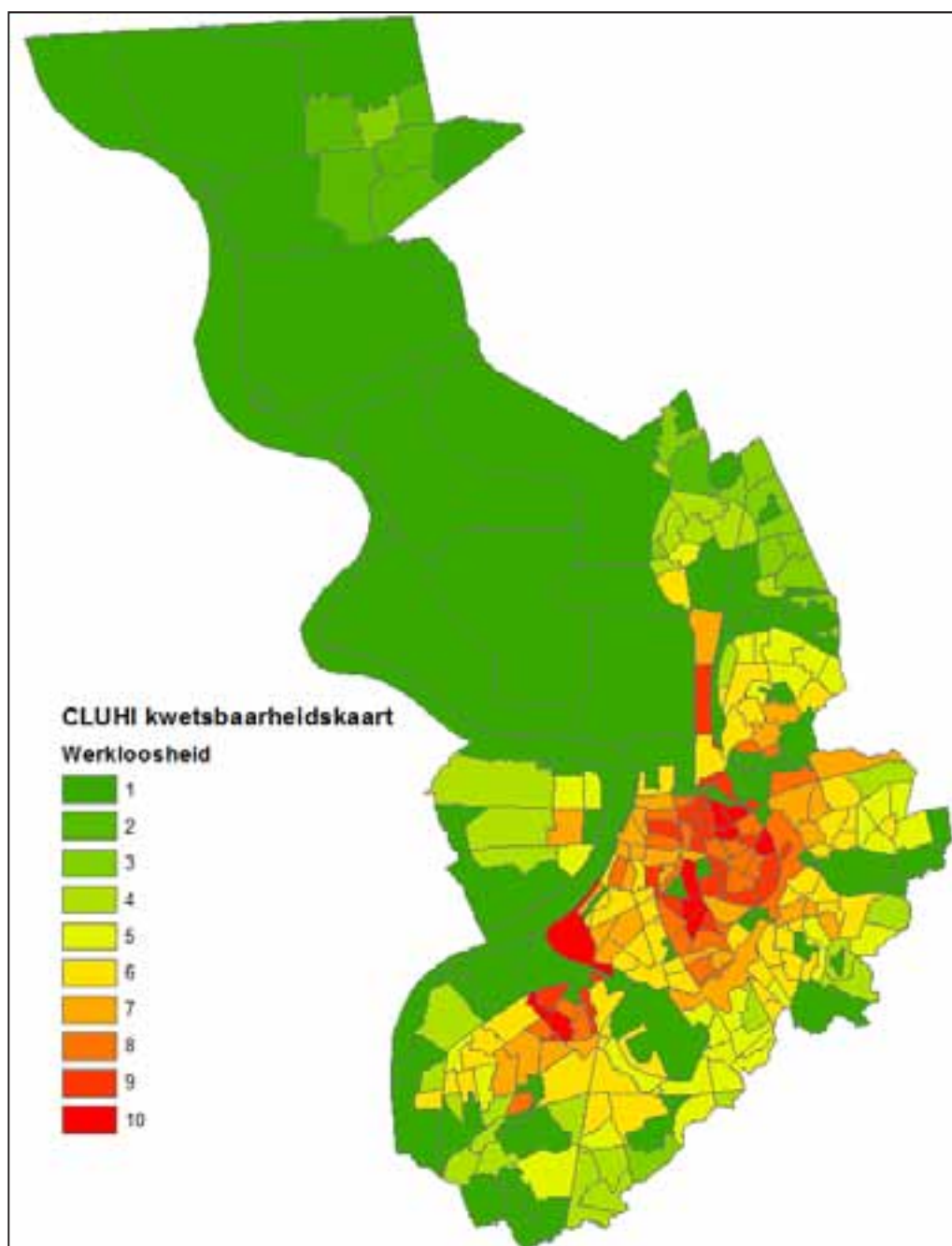
Sociaal-economische parameters



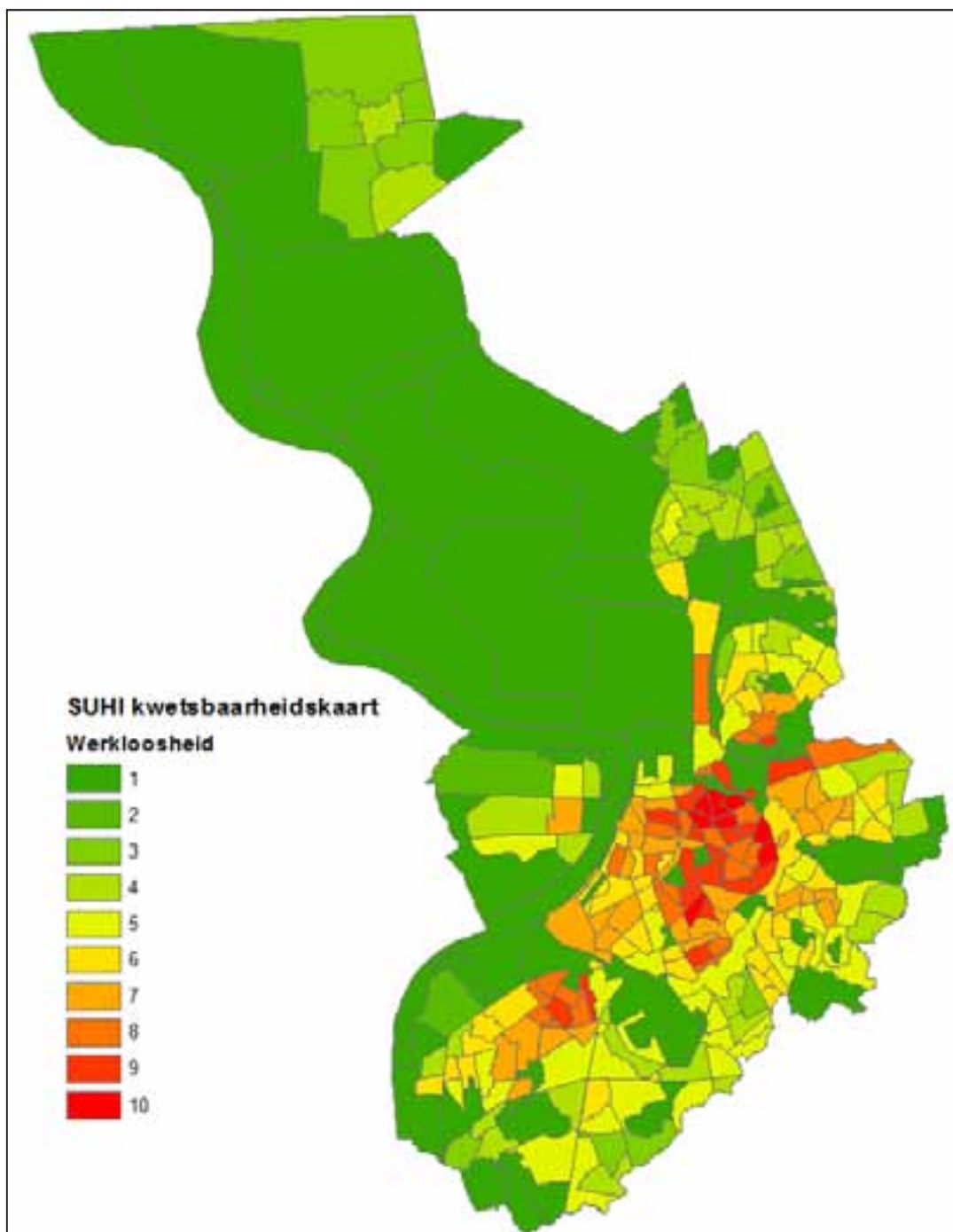
Figuur 124: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft ondermodaal inkomen.



Figuur 125: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft ondermodaal inkomen.

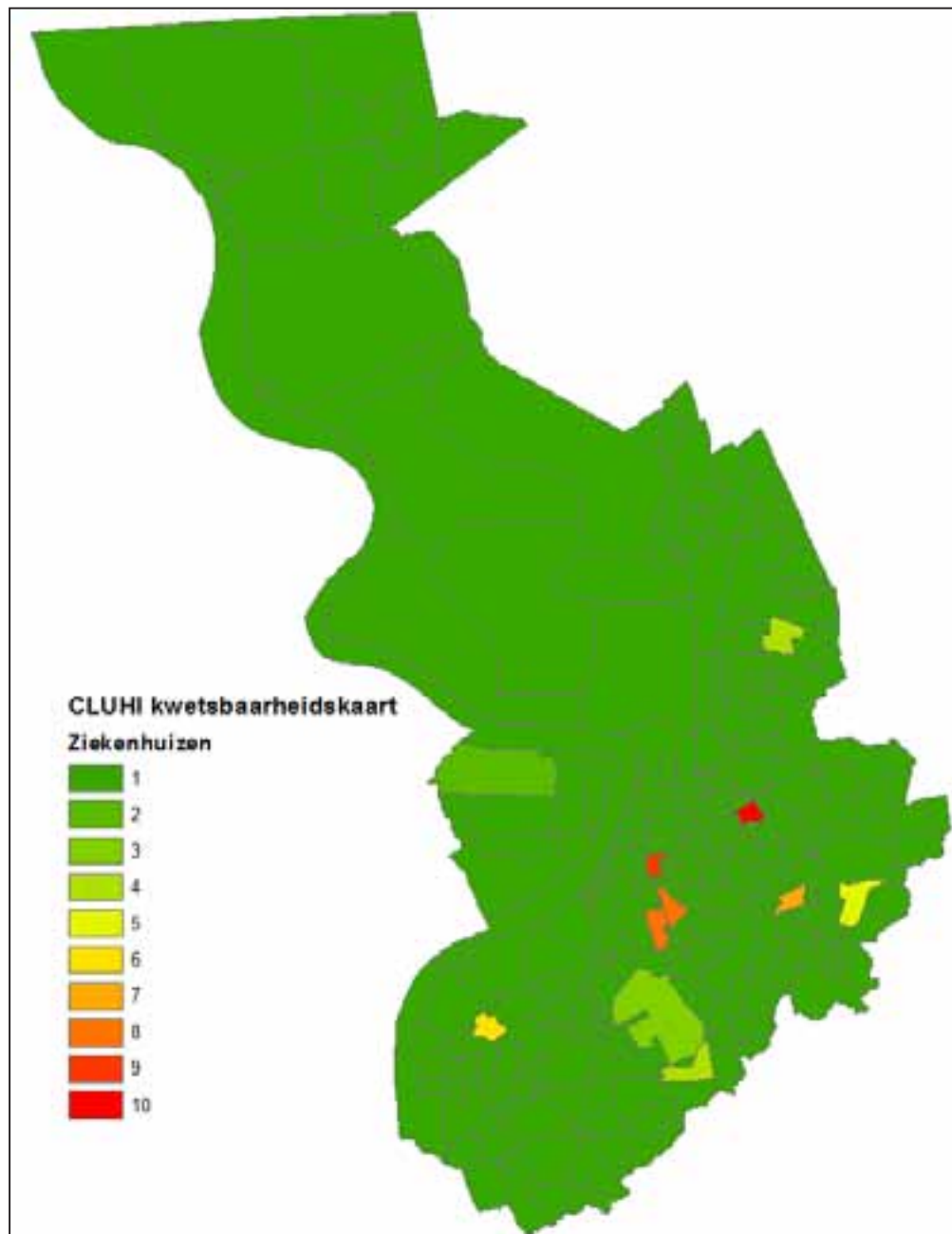


Figuur 126: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft werkloosheid.

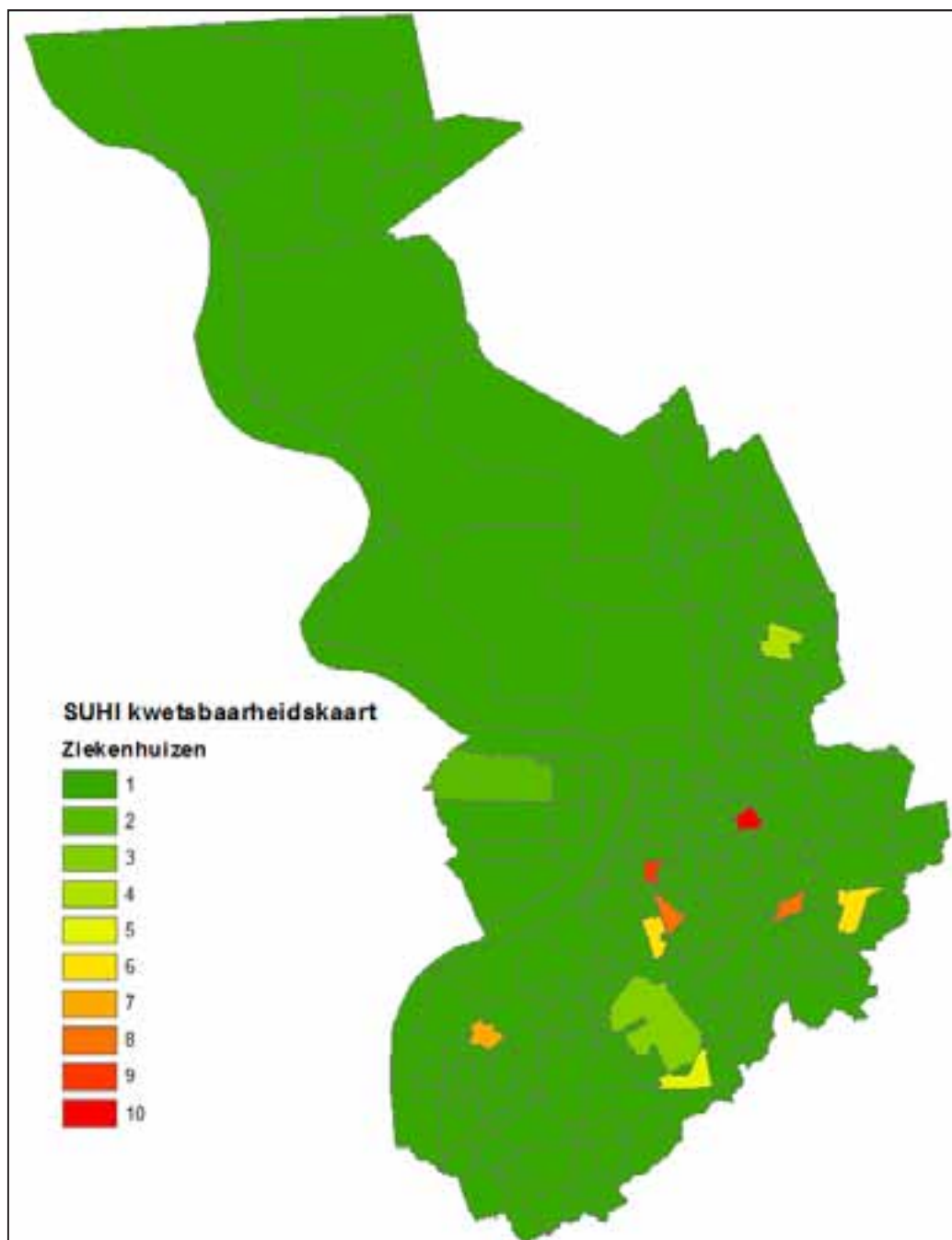


Figuur 127: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft werkloosheid.

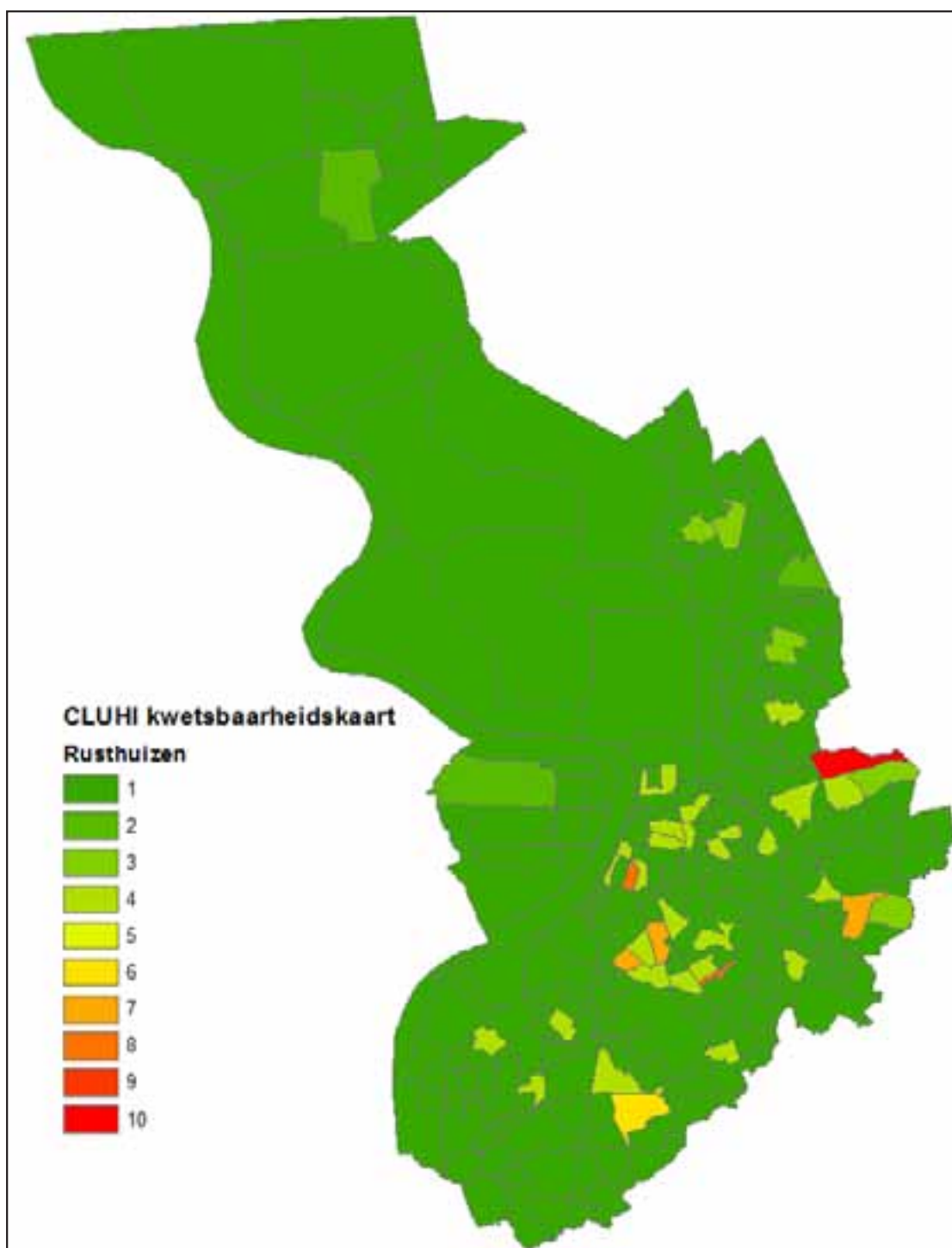
Kwetsbare functies



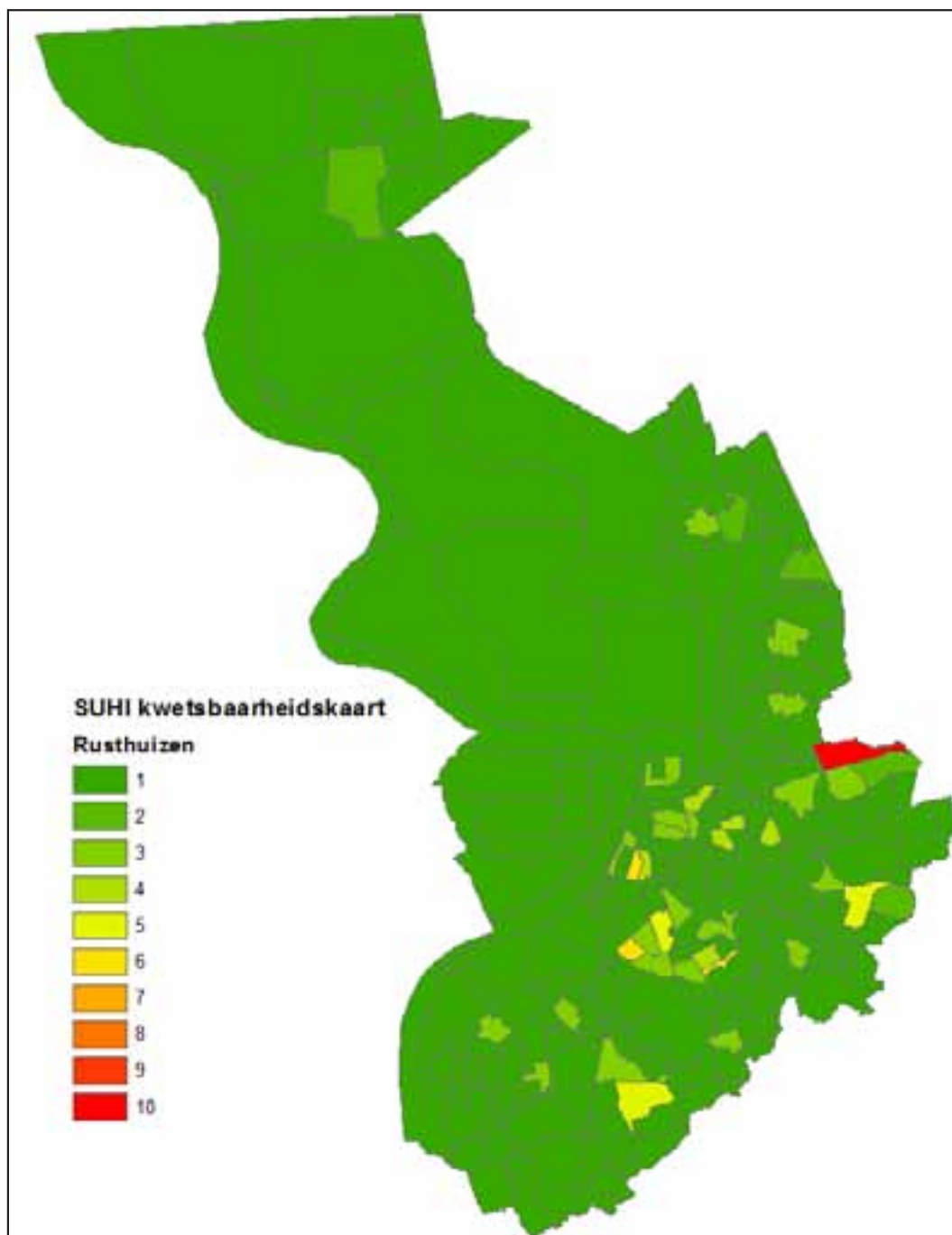
Figuur 128: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft de aanwezigheid van ziekenhuizen. De indeling in categorieën is hier gebeurd op basis van een exponentiële schaal omwille van de grote onderlinge verschillen.



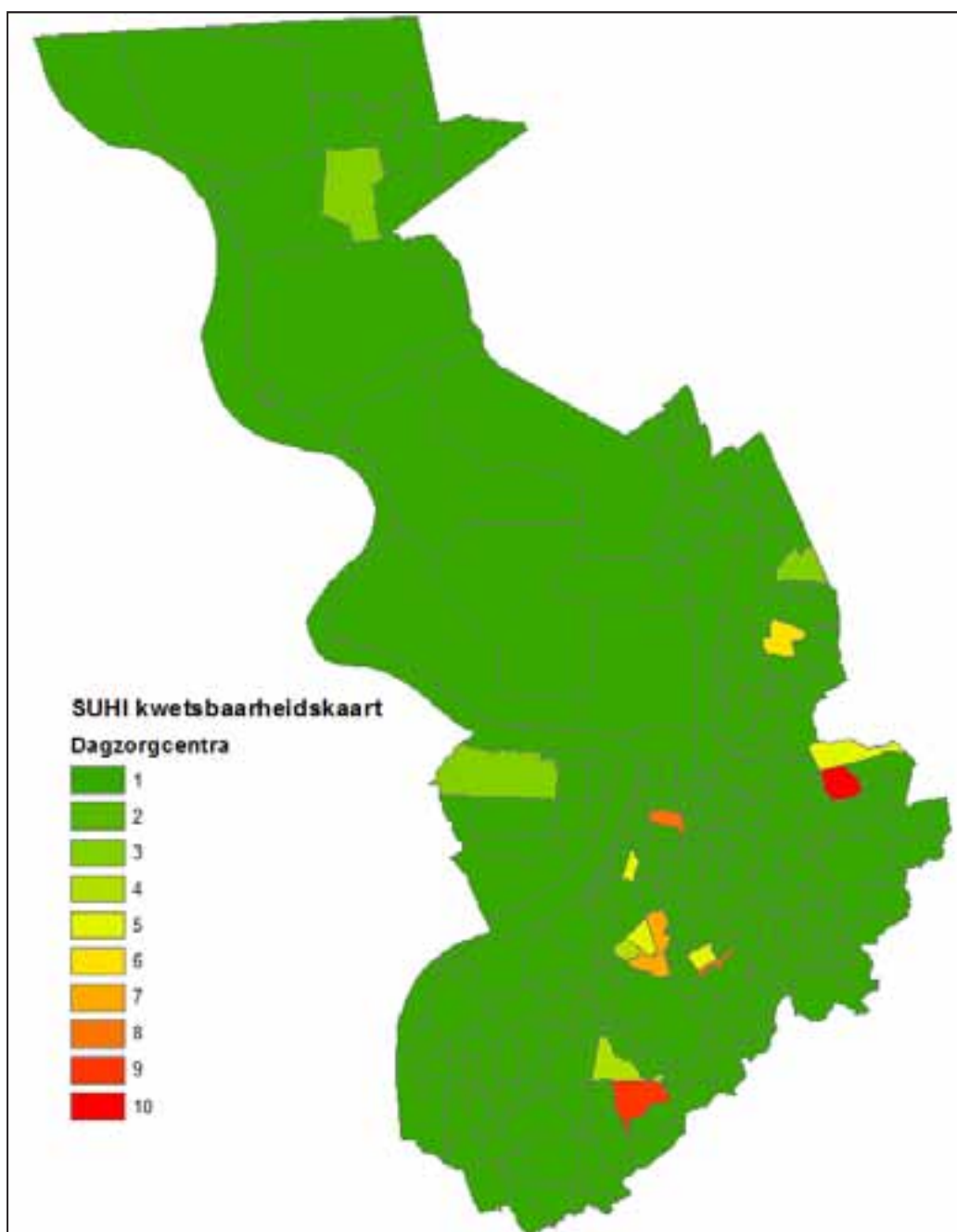
Figuur 129: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft de aanwezigheid van ziekenhuizen. De indeling in categorieën is hier gebeurd op basis van een exponentiële schaal omwille van de grote onderlinge verschillen.



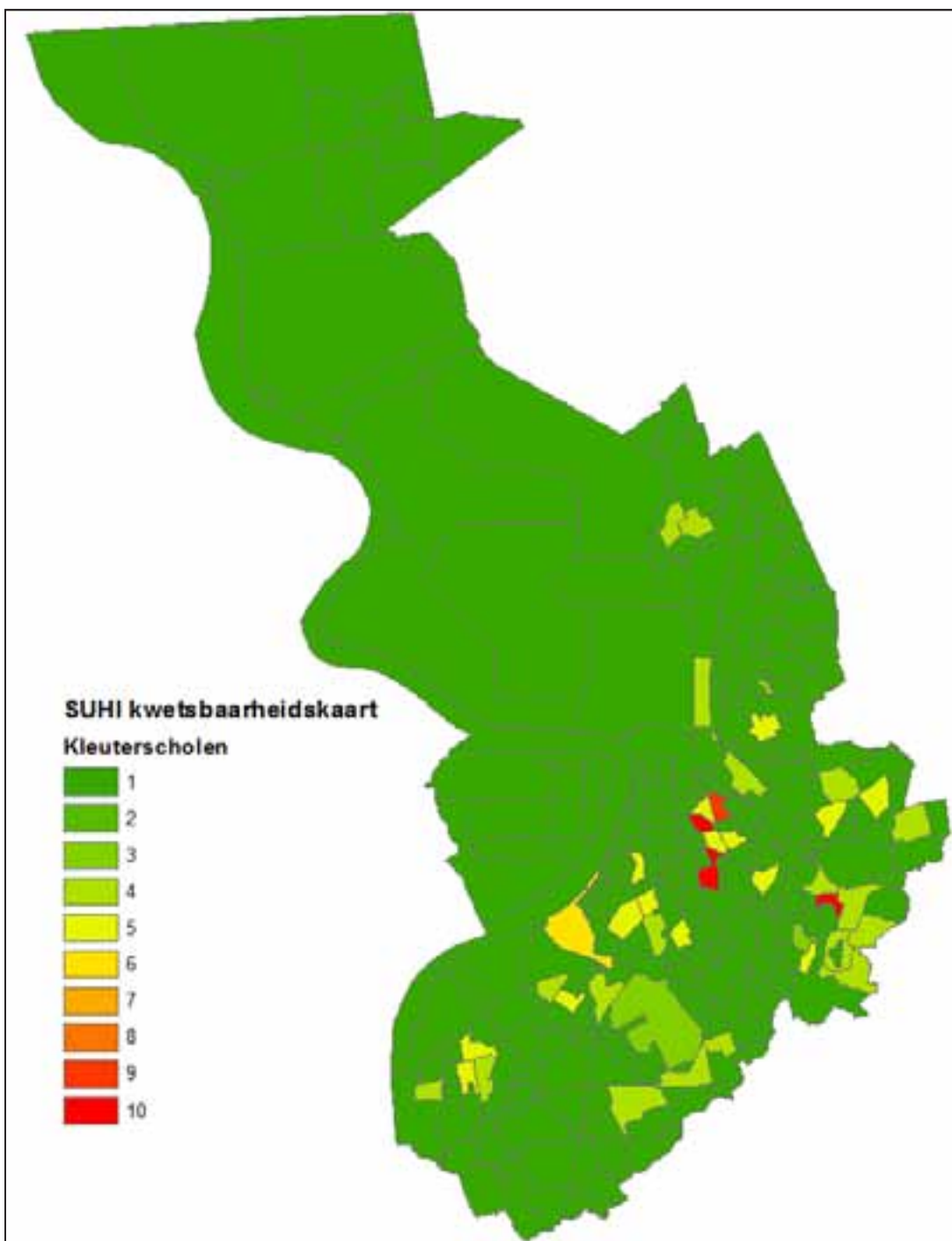
Figuur 130: CLUHI (nachtstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft de aanwezigheid van rusthuizen.



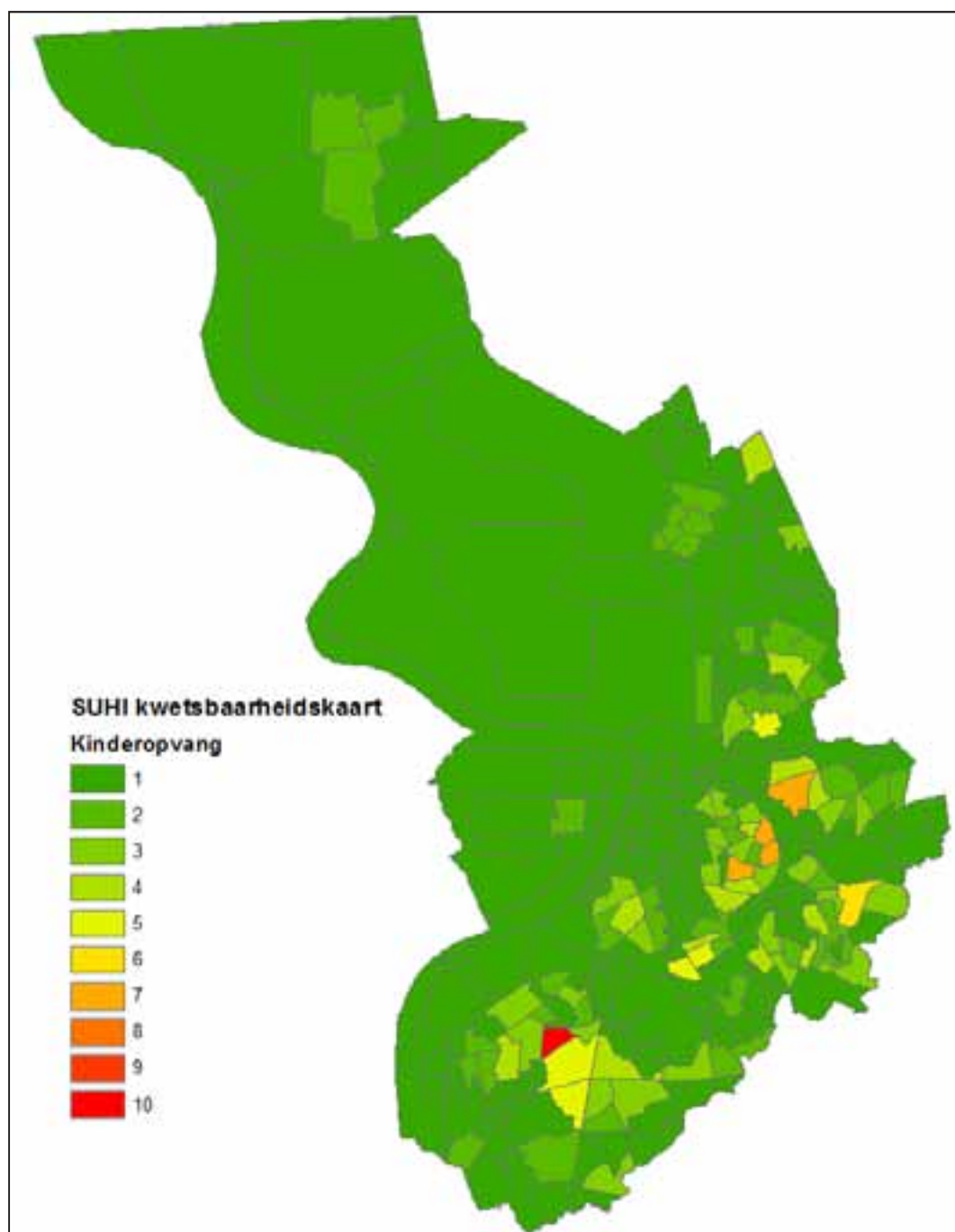
Figuur 131: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft de aanwezigheid van rusthuizen.



Figuur 132: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft de aanwezigheid van dagzorgcentra.



Figuur 133: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft de aanwezigheid van kleuterscholen.



Figuur 134: SUHI (dagstress) kwetsbaarheidskaart van de statistische sectoren in Antwerpen wat betreft de aanwezigheid van kinderopvang.

LITERATUURLIJST

- ACSM. (1987). Position stand on the prevention of thermal injuries during distance running. *Medical science sports exercise*, 19.
- Aminou DMA, Jacquet Bernard, Pasternak Frederick. 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. December 31, 1997. p. 19–31.
- Aminou DMA, Luhmann HJ, Hanson C, Pili P, Jacquet B., Bianchi S, Coste P, Pasternak F., Faure F. Meteosat Second Generation A comparison of on-ground and on-flight Imaging and Radiometric Performances of SEVIRI on MSG-1. 2002.
- Anderson BG, Bell ML. Weather-Related Mortality How Heat, Cold, and Heat Waves Affect Mortality in the United States. *Epidemiology* 2009; 20: 205-213.
- Anyala M, Odoki JB, Baker C. (2011). Assessment of the impact of climate change on road maintenance. *Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Engineering and Technology (AET2011)*. Uganda: MacMillan.
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26.
- Ashie Y, Kono T. Urban-scale CFD analysis in support of a climate-sensitive design for the Tokyo Bay area. *International Journal of Climatology* 2011;31:174–88. <http://doi.wiley.com/10.1002/joc.2226>.
- Bade, T., Smid, G. and Tonneijck, A.E.G. (2011). Groen Loont! De Groene Stad.
- Baik, J.-J., Kim, Y.-H. and Chun, H.-Y.: Dry and Moist Convection Forced by an Urban Heat Island, *Journal of Applied Meteorology*, 2001; 40(8), 1462–1475
- Barsi J a. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. *Proceedings of SPIE* 2005;5882:58820E–58820E–7. <http://link.aip.org/link/?PSI/5882/58820E/1&Agg=doi>.
- Barsi J a., Barker JL, Schott JR. An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a single thermal band earth-sensing instrument. *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477)* 2003;00:3014–6. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1294665>.
- Bartlett, S. (2008). Climate Change and Urban Children: Impacts and implications for adaptation in low-and middle-income countries. *Environment and urbanization*, 20(2), 501.
- Basu, R. and Samet J.M., Relation between Elevated Ambient Temperature and Mortality: A Review of the Epidemiologic Evidence, *Epidemiologic Reviews* 24(2002), pp. 190-202.
- Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R., Davidson, O., . . . Kattsov, V. (2007). IPCC, 2007: climate change 2007: synthesis report. Contribution of working groups I. II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.< <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm> >.
- Bouchama, A., & Knochel, J. P. (2002). Heat stroke. *New England Journal of Medicine*, 346(25), 1978-1988.
- Bowler D., Buyung-Ali L, Knight T. M. and Pullin, A.S. Urban greening to cool towns and cities : A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Planning* 97 (3) 2010, pp. 147 - 155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Brits, E., et al. (2009), 'Climate Change and Health - Set-up of monitoring of potential effects of climate change', (Brussels: Unit Environment and Health).
- Brouwers, J., Peeters, B., Willems, P., Deckers, P., De Maeyer, P., De Sutter, R., & Vanneuville, W. (2009). Milieuraapport Vlaanderen 2009: Milieuverkenning 2030. Klimaatverandering en waterhuishouding.
- Buekers J., Torfs R., Deutsch F., Lefebvre W., Bossuyt M. (2012), Inschatting ziektebelasting en externe kosten veroorzaakt door verschillende milieufactoren in Vlaanderen, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2012/06, VITO, 2012/MRG/R/187.
- Buekers J., Torfs R., Deutsch F., Lefebvre W., Bossuyt M. (2012), Inschatting ziektebelasting en externe kosten veroorzaakt door verschillende milieufactoren in Vlaanderen, studie uitgevoerd in opdracht van de

- Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2012/06, VITO, 2012/MRG/R/187.
<http://www.milieurapport.be/nl/nieuws/inschatting-ziektelast-en-externe-kosten-veroorzaakt-door-milieufactoren/>
- Bustinza R, Lebel G, Gosselin P, Bélanger D, Chebana F. (2013) Health impacts of the July 2010 heat wave in Québec, Canada. *BMC Public Health*. 2013 Jan 21;13:56.
- Buyantuyev, A., & Wu, J. (2010). Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. *Landscape ecology*, 25(1), 17-33.
- Bytowski, J. R., & Squire, D. L. (2003). Heat illness in children. *Curr Sports Med Rep*, 2(6), 320-324.
- CDC. (1993). Heat-related deaths--United States Morbidity and Mortality Weekly Report (Vol. 42, pp. 558-560): Center for Disease and Control Prevention.
- Chapman L, Thornes JE. Real-Time Sky-View Factor Calculation and Approximation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 2004;21:730-41. [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0426\(2004\)021<0730:RSFCAA>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0426(2004)021<0730:RSFCAA>2.0.CO;2).
- Choi M, Jacobs JM, Kustas WP. Assessment of clear and cloudy sky parameterizations for daily downwelling longwave radiation over different land surfaces in Florida, USA. *Geophysical Research Letters* 2008;35:L20402. <http://www.agu.org/pubs/crossref/2008/2008GL035731.shtml>.
- Clark, G. E. (1998). Assessing the vulnerability of coastal communities to extreme storms: the case of Revere, MA., USA. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 3(1), 59.
- Coll C, Galve JM, Sanchez JM, Caselles V. Validation of Landsat-7/ETM+ Thermal-Band Calibration and Atmospheric Correction With Ground-Based Measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2010;48:547-55. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5208377>.
- Coutts, A. M., Tapper, N. J., Beringer, J., Loughnan, M., & Demuzere, M. (2013). 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(1), 2-28. doi: 10.1177/0309133312461032
- Cox B, Guillaume F, Maes S, Van Oyen H. Mortality by region during the hot summers of 2003 and 2006. Belgian mortality monitoring (BE-MOMO). Wetenschappelijk Instituut Volksgezondheid, WIV, IPH/EPI Reports N° 2008-026, 2008.
- Curriero FC, Heiner KS, Samet JM, Zeger SL, Strug L, Patz JA. Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States. *American Journal of Epidemiology* 2002; 155: 80-87.
- 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
- De Ridder K., Lauwaet D., Maiheu B. An urban boundary layer climate model, *Urban Climate*, submitted, 2013
- De Ridder Koen, Schayes G. The IAGL Land Surface Model. *Journal of Applied Meteorology* 1997;36:167-82. <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450%281997%29036%3C0167%3ATILSM%3E2.0.CO%3B2>.
- De Ridder Koen. Testing Brutsaert's temperature roughness parameterization for representing urban surfaces in atmospheric models. *Geophysical Research Letters* 2006;33:L13403. <http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2006GL026572.shtml>.
- Debontridder, L., De Sutter, R., & Allaert, G. (2010). Klimaatveranderingen in Vlaanderen en mogelijke invloeden op ruimte & leefomgeving. *Ruimte*.
- Dematte J.E. et al., Near-Fatal Heat Stroke during the 1995 Heat Wave in Chicago, *Annals of Internal Medicine* 129(1998), pp. 173-181.
- Demuzere M, De Ridder K., Van Lipzig NPM. Modeling the energy balance in Marseille: Sensitivity to roughness length parameterizations and thermal admittance. *Journal of Geophysical Research* 2008;113:1-19. <http://www.agu.org/pubs/crossref/2008/2007JD009113.shtml>.
- Desforges, J. F., & Simon, H. B. (1993). Hyperthermia. *New England Journal of Medicine*, 329(7), 483-487.

- Dewasmes, G; Telliez, F; Muzet, A. (2000); Effects of a nocturnal environment perceived as warm on subsequent daytime sleep in humans; *SLEEP* Volume: 23 (3): 409-413.
- Di Nisi J, Ehrhart J, Galeou M, Libert JP (1989). Influence of repeated passive body heating on subsequent night sleep in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1989;59(1-2):138-45.
- Dimoudi A, Nikolopoulou M. Vegetation in the urban environment : microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings* 2003;35:69–76.
- Dodman, D. (2008). Institutional Capacity, Climate Change Adaptation and the Urban Poor. *IDS bulletin*, 39(4), 67-74.
- Doherty RM, Heal MR, Wilkinson P, Pattenden S, Vieno M, Armstrong B, Atkinson R, Chalabi Z, Kovats S, Milojevic A, Stevenson DS. Current and future climate- and air pollution-mediated impacts on human health. *Environmental Health* 2009; 8.
- Dongmei P; Shiming D; Zhongping L; Ming-yin C; (2013). Air-conditioning for sleeping environments in tropics and/or sub-tropics. A review. *Energy* (51) 18-26.
- Elvidge, C.D., Baugh, K.E., Dietz, J., Bland, T., Sutton, P.C., Kroehl, H.W., 1999. Radiance Calibration of DMSP-OLS Low-Light Imaging Data of Human Settlements. *Remote Sensing of Environment*, 68, 77-88.
- Engelen G, Poelmans L, Uljee I, Kok J De, Esch L Van. *De Vlaamse Ruimte in 4 Wereldbeelden*. 2011.
- Erell E, Pearlmutter D, Williamson T. Urban Microclimate - Designing the Spaces Between Buildings. 2011. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1989;59(1-2):138-45.
- Foley, K; Sarsour, K; Kalsekar, A; et al. (2010). Subtypes of Sleep Disturbance: Associations Among Symptoms, Comorbidities, Treatment, and Medical Costs; *BEHAVIORAL SLEEP MEDICINE* 8 (2): 90-104
- Gasparrini A, Armstrong B, Kovats S, Wilkson P. The effect of high temperatures on cause-specific mortality in England and Wales. *Occupational and Environmental Medicine*, in press, 2011.
- Gillespie AR, Rokugawa S, Hook SJ, Matsunaga T, Kahle AB. Temperature / Emissivity Separation Algorithm Theoretical Basis Document , Version 2 . 4. Jet Propulsion. 1999.
- Giridharan, R., Ganesan, S., & Lau, S. (2004). Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 36(6), 525-534.
- Giridharan, R., Lau, S., Ganesan, S., & Givoni, B. (2007). Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong. *Building and Environment*, 42(10), 3669-3684.
- Gretchen Cook-Anderson (2004-06-29). "Urban Heat Islands Make Cities Greener". NASA.
- Gupta, S; Goren, A; Kim, E; et al. (2012). Direct and Indirect Costs of Sleep Disturbances and Residual Symptoms in Patients Treated for Depression Analysis of a Nationwide Cross Sectional Survey ; *JOURNAL OF OCCUPATIONAL AND ENVIRONMENTAL MEDICINE* 54 (7): 881-888
- Haines, A., Kovats, R. S., Campbell-Lendrum, D., & Corvalán, C. (2006). Climate change and human health: impacts, vulnerability, and mitigation. *The Lancet*, 367(9528), 2101-2109.
- Harlan, S. L., Brazel, A. J., Prashad, L., Stefanov, W. L., & Larsen, L. (2006). Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. *Social Science & Medicine*, 63(11), 2847-2863.
- Healy JD. Excess winter mortality in Europe: a cross country analysis identifying key risk factors. *Journal of Epidemiology and Community Health* 2003; 57: 784-789.
- Hoffmann, P., Schlünzen, K. H. and Rosenhagen, G.: Observational study of the urban heat island and the urban impact on precipitation of Hamburg, in *The seventh International Conference on Urban Climate*, pp. 29–31., 2009.
- <http://www.milieurapport.be/nl/nieuws/inschatting-ziektelast-en-externe-kosten-veroorzaakt-door-milieufactoren/>
- Huang, G., Zhou, W., & Cadenasso, M. L. (2011). Is everyone hot in the city? Spatial pattern of land surface temperatures, land cover and neighborhood socioeconomic characteristics in Baltimore, MD. *Journal of environmental management*, 92(7), 1753-1759.
- Huynen MMTE, Martens P, Schram D, Weijenberg MP, Kunst AE. The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population. *Environmental Health Perspectives* 2001; 109: 463-470.
- Ingle, R., & De Sutter, R. (2011). Assessment of the spatial impacts of climate change on flemish region of belgium. Paper presented at the 5th Aqua Congress, New Delhi, India.

- IPCC 2007 ,Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. (Available at www.ipcc.ch)
- Jacobs AFG, Heusinkveld BG, Kraai A, Paaijmans KP. Diurnal temperature fluctuations in an artificial small shallow water body. *International journal of biometeorology* 2008;52:271–80.
- 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 Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2009;47:339–49.
- Johnson, D; Orr, W; Crawley, J; et al. (2004); Esomeprazole reduces the costs of reduced work productivity due to GERD-related sleep disturbances; *AMERICAN JOURNAL OF GASTROENTEROLOGY* 99 (10) Supplement: S: S233-S233
- Kalkstein, L. S., & Greene, J. S. (1997). An evaluation of climate/mortality relationships in large US cities and the possible impacts of a climate change. *Environmental health perspectives*, 105(1), 84.
- Kazmierczak, A. (2012). Heat and social vulnerability in Greater Manchester: a risk-response case study. *EcoCities*, The University of Manchester.
- Kilbourne, E. M. (1997). Heat waves and hot environments. The public health consequences of disasters, 245-269.
- Killingsworth, B., Director, P. S., Lemay Sr, N. L., Peng Sr, T., & Director, S. (2011). The Urban Heat Island Effect and concrete's role in mitigation. *Concrete in focus*, 10(6).
- Klinenberg, E. (2003). *Heat wave: a social autopsy of disaster in Chicago*: University of Chicago Press.
- Knowlton, K., Knowlton, M., Rotkin Ellman, G., King, H., Margolis, D., Smith, G., . . . English. (2008). The 2006 California Heat Wave: Impacts on Hospitalizations and Emergency Department Visits. *Environmental health perspectives*, 117(1), 61.
- Kolokotroni, M., & Giridharan, R. (2008). Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar Energy*, 82(11), 986-998.
- Kosatsky, T. The 2003 European heat waves, *Euro Surveill.* 10(2005).
- Kovats RS, Ebi KL. (2006) Heatwaves and public health in Europe. *European Journal of Public Health* 16: 592-599.
- Kovats RS, Hajat S, Wilkinson P. Contrasting patterns of mortality and hospital admissions during hot weather and heat waves in Greater London, UK. *Occup Environ Med.* 2004;61:893–898.
- Kovats RS, Hajat S. (2008); Heat stress and public health: a critical review. *Annu Rev Public Health* 29:41-55.
- Kovats, R. S., & Kristie, L. E. (2006). Heatwaves and public health in Europe. *European Journal of Public Health*, 16(6), 592-599.
- Kumar, P en Imam B. (2013). Footprints of air pollution and changing environment on the sustainability of built infrastructure; *Science of the Total Environment* (444) 85–101.
- Kustas WP, Norman JM, Anderson MC, French AN. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index–radiometric temperature relationship. *Remote Sensing of Environment* 2003;85:429–40. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425703000361>.
- 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 Sensing of Environment* 2004;93:443–62. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425704000033>.
- Le Tertre A, Lefranc A, Eilstein D, Declercq C, Medina S, Blanchard M, Chardon B, Fabre P, Filleul L, Jusot JF, Pascal L, Prouvost H, Cassadou S, Ledrans M. (2006) Impact of the 2003 heatwave on all-cause mortality in 9 French cities. *Epidemiology* 17: 75-79
- LIBERT, JP; BACH, V; JOHNSON, LC; et al. (1991). RELATIVE AND COMBINED EFFECTS OF HEAT AND NOISE EXPOSURE ON SLEEP IN HUMANS. *SLEEP* 14 (1): 24-31.
- LIBERT, JP; DI NISI, J; FUKUDA, H; et al. (1998). EFFECT OF CONTINUOUS HEAT EXPOSURE ON SLEEP STAGES IN HUMANS. *SLEEP* 11 (2): 195-209

- LoVecchio, F., Stapczynski, J., Hill, J., Haffer, A., Skindlov, J., Engelthaler, D., . . . Duprey, Z. (2005). Heat-related mortality—Arizona, 1993–2002, and the United States, 1979–2002. *Mortality and Morbidity Weekly Report*, 54, 628-630.
- Luber, G., & McGeehin, M. (2008). Climate change and extreme heat events. *American journal of preventive medicine*, 35(5), 429-435.
- Lugo-Amador, N. M., Rothenhaus, T., & Moyer, P. (2004). Heat-related illness. *Emergency medicine clinics of North America*, 22(2), 315-328.
- Maiheu B., Hendrickx M. en Goossens R., CLIMAQS Deliverable D3.3, Incorporation in ENVI-Met of -D terrain. 2010 VITO Report 2010/RMA/045
- Maiheu B., Van den Berghe K, Boelens L, De Ridder K en Lauwaet D. 2013 Opmaak van een hittekaart en analyse van het stedelijk hitte-eiland effect voor Gent. Studie uitgevoerd in opdracht van Stad Gent. VITO Rapport 2013/RMA/R113.
- Maloley, M. (2010). Thermal Remote Sensing of Urban Heat Islands: Greater Toronto Area.
- Markham BL, Storey JC, Williams DL, Irons JR. Landsat sensor performance: history and current status. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2004;42:2691–4. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1369366>.
- Markvart T., Castal zer L. (2003). *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Elsevier. ISBN 1-85617-390-9.
- Marmor, M. (1978). Heat wave mortality in nursing homes. *Environmental Research*, 17(1), 102-115. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0013-9351\(78\)90065-8](http://dx.doi.org/10.1016/0013-9351(78)90065-8)
- Masson, V., Lion, Y., Peter, a., Pigeon, G., Buyck, J. and Brun, E.: “Grand Paris”: regional landscape change to adapt city to climate warming, *Climatic Change*, 769–782, doi:10.1007/s10584-012-0579-1
- McGeehin, M. A., & Mirabelli, M. (2001). The potential impacts of climate variability and change on temperature-related morbidity and mortality in the United States. *Environmental health perspectives*, 109(Suppl 2), 185.
- McMichael, A. J. (2006). Climate change and human health: present and future risks. *Lancet* (London, England), 367(9513), 859.
- Mote, T. L., Lacke, M. C. and Shepherd, J. M.: Radar signatures of the urban effect on precipitation distribution: A case study for Atlanta, Georgia, *Geophysical Research Letters*, 2007; 34(20), L20710, doi:10.1029/2007GL031903
- MUZET, A; LIBERT, JP; CANDAS, V. (1984). AMBIENT-TEMPERATURE AND HUMAN SLEEP
- Nakamura Y, Oke T. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment* 1988;22:2691–700.
- NASA. (2013, 26/03/2013). Measuring Vegetation (NDVI & EVI). from http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php
- Newsham, Guy R.; Birt, Benjamin J.; Arsenault, Chantal; et al. (2013); Do 'green' buildings have better indoor environments? *New evidence; BUILDING RESEARCH AND INFORMATION* 41 (4) 415-434.
- Ohnaka, T; Takeshita, J; (2005). Upper limit of thermal comfort zone in bedrooms for falling into a deep sleep as determined by body movements during sleep; In: Tochihara, Y; Ohnaka, T: *Environmental Ergonomics: THE ERGONOMICS OF HUMAN COMFORT, HEALTH AND PERFORMANCE IN THE THERMAL ENVIRONMENT*; Book Series: ELSEVIER ERGONOMICS BOOK SERIES Volume: 3 pp:121-126
- Okamoto-Mizuno, K; Mizuno, K; (2012). Effects of thermal environment on sleep and circadian rhythm; *JOURNAL OF PHYSIOLOGICAL ANTHROPOLOGY* 31 Article Number:14
- Oke T.R., *Boundary layer climates*. Routledge; 2nd edition 1988 (ISBN 978-0415043199)
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.
- Oltra-Carri  R, Sobrino J a., Franch B, Nerry F. Land surface emissivity retrieval from airborne sensor over urban areas. *Remote Sensing of Environment* 2012;123:298–305. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425712001265>.

- Pataki, D. E., Carreiro, M. M., Cherrier, J., Grulke, N. E., Jennings, V., Pincetl, S., . . . Zipperer, W. C. (2011). Coupling biogeochemical cycles in urban environments: ecosystem services, green solutions, and misconceptions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(1), 27-36.
- Pattenden S, Armstrong B, Milojevic A, Heal M R, Chalabi Z, Doherty R, Barratt B, Kovats R S, Wilkinson P. Ozone, heat and mortality: acute effects in 15 British conurbations. *Occupational and Environmental Medicine* 2010; 67, 699-707
- Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., & Foley, J. A. (2005). Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438(7066), 310-317.
- Pelicaen J, 2010 Zwemwater profile Blaarmeersen Zwemsportzone Antwerpen. Zwemwaterprofiel volgens Europese richtlijn 2006/7/EC. VMM. Zie http://www.kwaliteitzwemwater.be/sites/default/files/zwemwaterprofiel/2012zwemwaterprofiel_Antwerpen_blaarmeersen_zwemsportzone.pdf
- Poumadère, M., Mays, C., Le Mer, S., & Blong, R. (2005). The 2003 heat wave in France: dangerous climate change here and now. *Risk analysis*, 25(6), 1483.
- Prata AJ. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 1996;122:1127–51. <http://doi.wiley.com/10.1002/qj.49712253306>.
- Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B. L., Kurn, D. M., Sailor, D., & Taha, H. (1995). Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings*, 22(3), 255-265.
- Rotach MW, Vogt R, Bernhofer C, Batchvarova E, Christen a., Clappier a., et al. BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project. *Theoretical and Applied Climatology* 2005;81:231–61. <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s00704-004-0117-9>.
- Rübbelke, D en Vögele S. (2011). Impacts of climate change on European critical infrastructures: The case of the power sector; *Environmental Science & Policy* Vol. 14 (1) 53–63.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.
- Sarkar A, De Ridder Koen. The Urban Heat Island Intensity of Paris: A Case Study Based on a Simple Urban Surface Parametrization. *Boundary-Layer Meteorology* 2010;138:511–20. <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s10546-010-9568-y>.
- Schär C, Vidale PL, Lüthi D, Frei C, Häberli C, Liniger MA, Appenzeller C. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 2004;427:3926–8.
- Schuman, S. H. (1972). Patterns of urban heat-wave deaths and implications for prevention: data from New York and St. Louis during July, 1966. *Environmental Research*, 5(1), 59-75.
- Semenza, J. C., Rubin, C. H., Falter, K. H., Selanikio, J. D., Flanders, W. D., Howe, H. L., & Wilhelm, J. L. (1996). Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago. *New England Journal of Medicine*, 335(2), 84-90.
- Semenza, J.C., McCullough, J.E., Flanders, Z.D., McGeehin M.A. and Lumpkin J.R., Excess Hospital Admissions During the July 1995 Heat Wave in Chicago, *Am. J. Prev. med* 16(1999).
- Sheffield P. And Landrigan P. (2010). Global climate change and children's health: threat and strategies for prevention. *Environmental health perspectives*, October 2010.
- Siegel JM. (2005). Clues to the functions of mammalian sleep. *Nature* 437:1264-71.
- Simpson, J. R. 1998. Urban forest impacts on regional cooling and heating energy use: Sacramento County case study. *J. Arboric.* 24(4).201-214.
- Skamarock WC, Klemp JB, Gill DO, Barker DM, Duda MG, Wang W, Powers JG. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. 2008.
- Smoyer, K. E., Rainham, D. G., & Hewko, J. N. (2000). Heat-stress-related mortality in five cities in Southern Ontario: 1980–1996. *International Journal of Biometeorology*, 44(4), 190-197.
- Solazzo E, Britter RE. Transfer processes in a simulated urban street canyon. *Boundary-Layer Meteorology* 2007;124:43–60. <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s10546-007-9176-7>.

- Stathopoulou M, Cartalis C. Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation. *Remote Sensing of Environment* 2009;113:2592–605. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425709002375>.
- T.R. Oke, D.G. Johnson, D.G. Steyn and I.D. Watson, Simulation of surface urban heat island under ideal conditions at night – Part 2: Diagnosis and causation., *Bound. Layer. Meteor.* 56(1991), pp. 339-358.
- Thorsson S, Lindberg F, Eliasson I, Holmer B. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology* 2007;27:1983–93. <http://doi.wiley.com/10.1002/joc.1537>.
- Thrush, D., Burningham, K., & Fielding, J. (2005). *Flood Warning for Vulnerable Groups: A review of the literature*. Bristol: Environment Agency (EA).
- Tong S, Ren C, Becker N. (2010) Excess deaths during the 2004 heatwave in Brisbane, Australia. *Int J Biometeorol.* 54 (4): 393-400.
- Toparlar Y., Computational Analysis of Climate Change Adaptation Measures at the Building and Street Scale Focused on Evaporative Cooling : Case Study for Bergpolder Zuid. 2012, MSc Thesis Technische Universiteit Eindhoven – Dep. Building Physics and Services.
- Toulemon L, Barbieri M. The mortality impact of the August 2003 heat wave in France: Investigating the 'harvesting' effect and other long-term consequences. *Population Studies-A Journal of Demography* 2008; 62: 39-53.
- US-EPA. Reducing Urban Heat Islands : Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics. 2013. Available at: <http://www.epa.gov/heatisld/resources/pdf/BasicsCompendium.pdf>.
- Van Weverberg, K., De Ridder, K., & Van Rompaey, A. (2008). Modeling the contribution of the Brussels heat island to a long temperature time series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(4), 976-990.
- Vaneckova, Pavla, Beggs, Paul J., and Jacobson, Carol R. 'Spatial analysis of heat-related mortality among the elderly between 1993 and 2004 in Sydney, Australia', *Social Science & Medicine*, 70 (2), 293-304.
- Vardoulakis S, Heaviside C, editors. *Health effects of climate change in the UK 2012: current evidence, recommendations and research gaps*. UK: Health Protection Agency; 2012. p. 242. [Download: http://www.hpa.org.uk/webc/HPAwebFile/HPAweb_C/1317135969235].
- VLM. (2011). *Landinrichtingsproject Leie en Schelde: Groenpool Vinderhoutse Bossen: Vlaamse LandMaatschappij*.
- Voogt JA, Oke TR. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment* 2003;86:370–84. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425703000798>.
- Vos, P. E. J., Maiheu, B., Vankerkom, J. and Janssen, S.: Improving local air quality in cities: To tree or not to tree?, *Environmental Pollution*, doi:10.1016/j.envpol.2012.10.021
- Weischelgartner, J. (2001). Disaster mitigation: the concept of vulnerability revisited. *Disaster prevention and management*, 10(2), 85-94.
- Weng Q. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment* 2004;89:467–83. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425703003390>.
- Wong, N. H. and Chong, A. Z. M.: Performance evaluation of misting fans in hot and humid climate, *Building and Environment*, 45(12), 2666–2678, doi:10.1016/j.buildenv.2010.05.026
- Yang, L., Huang, C., Homer, C. G., Wylie, B. K., & Coan, M. J. (2003). An approach for mapping large-area impervious surfaces: synergistic use of Landsat-7 ETM+ and high spatial resolution imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(2), 230-240.
- Yuan, F., & Bauer, M. E. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote sensing of Environment*, 106(3), 375-386.
- Zakšek K, Oštir K. Downscaling land surface temperature for urban heat island diurnal cycle analysis. *Remote Sensing of Environment* 2012;117:114–24. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425711002872>.