

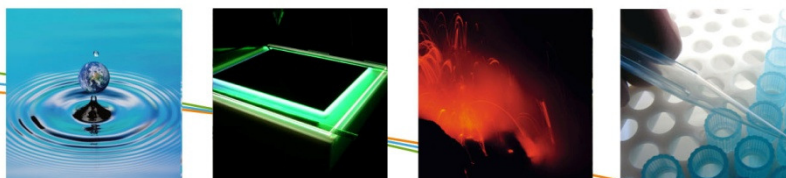
Eindrapport

Hittekaart voor Tilburg

Bino Maiheu

Studie uitgevoerd in opdracht van: Stad Tilburg in samenwerking met BELWADVIES
RMA/N78F2/2011-0002

Oktober 2011



Alle rechten, waaronder het auteursrecht, op de informatie vermeld in dit document berusten bij de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek NV ("VITO"), Boeretang 200, BE-2400 Mol, RPR Turnhout BTW BE 0244.195.916. De informatie zoals verstrekt in dit document is vertrouwelijke informatie van VITO. Zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van VITO mag dit document niet worden gereproduceerd of verspreid worden noch geheel of gedeeltelijk gebruikt worden voor het instellen van claims, voor het voeren van gerechtelijke procedures, voor reclame of antireclame en ten behoeve van werving in meer algemene zin aangewend worden

VERSPREIDINGSLIJST

Cora Alfonso, Stad Tilburg
Judith Maassen, Stad Tilburg
Hans Cockx, Stad Tilburg
Joop de Beer, Stad Tilburg

Bino Maiheu, VITO
Koen De Ridder, VITO

Emile Van Leeuwen, BELW

INHOUD

Verspreidingslijst	I
Inhoud	II
Lijst van tabellen	IV
Lijst van figuren	V
Lijst van afkortingen	IX
HOOFDSTUK 1. INLEIDING	1
1.1. <i>Hittestress in steden</i>	1
1.2. <i>Project overzicht</i>	5
HOOFDSTUK 2. Geomorfologische analyse GIS data	8
2.1. <i>Stedelijk landgebruik</i>	8
2.2. <i>Stedelijke geometrie</i>	12
2.2.1. Sky View Factor	12
2.2.2. Frontal Area Density	17
2.3. <i>albedo</i>	20
HOOFDSTUK 3. Afleiding stralingstemperatuur aan de hand van satelliet gegevens	21
HOOFDSTUK 4. Technische beschrijving Opstellen luchttemperatuurskaart	27
4.1. <i>Het VITO Urban Climate Model (UCM)</i>	27
4.2. <i>Resultaten ruwe urban climate model berekeningen</i>	29
4.2.1. Bespreking resultaten luchttemperatuur op 1 km	29
4.2.2. Kwaliteitscontrole stedelijke luchttemperatuur op 1 km	31
4.3. <i>Berekening Urban canopy temperature</i>	37
4.4. <i>Downscaling met hoge resolutie Landsat beelden</i>	41
4.5. <i>Resulterende gemiddelde en extreme UHI intensiteits kaart op subwijk niveau</i>	44
HOOFDSTUK 5. Bespreking verklarende factoren	46
5.1. <i>Regressie analyse hittekaarten</i>	46
5.2. <i>Vertaling naar beleidsmaatregelen</i>	50
5.3. <i>Identificatie hotspots en voorgestelde oplossingen</i>	51
Literatuurlijst	55
Bijlage A : Verwerking ruwe data Algemeen Hoogtebestand Nederland	57
Bijlage B : WIST query voor MODIS LST beelden	59

Bijlage C : Geprocesste landsat LST beelden	61
Bijlage D : Afleiding LandsAT oppervlakte temperatuursbeelden	64
Bijlage E : Bespreking van de gebruikte databronnen voor het VITO stedelijk klimaatmodel.	71
E.1 Model grid	71
E.2 Lage resolutie oppervlaktetemperatuur (LST – 1km)	71
E.3 Neerwaardse lange golf en korte golfstraling	75
E.4 Karakteristieken van het oppervlak	75
Bijlage F : Downscaling van de VITO Urban Climate Model output op lage resolutie	81

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1 : Interpretatie sleutel voor de discomfort index (Thom, 1959)	3
Tabel 2 : Verhoogde sterfte cijfer (dagelijkse mortaliteit) tijdens hittegolven in mediterrane en noordelijke steden in Europa. Bron: (D'Ippoliti et al., 2010). Studieperiode : 1990-2002 en 2004. 2003 werd hier als extreem jaar niet in rekening gebracht.	4
Tabel 3 : Overzicht van de gedownloade Landsat scènes met opname tijd (UTC) en atmosferische correctie parameters.	21
Tabel 4 : Validatie statistieken voor de stations DW6860 en KNMI350 te Tilburg. We vergelijken telkens het Urban Climate Model en de domein waarde voor ECMWF. De statistieken zijn gebaseerd op de maanden Juni-Juli-Augustus.	37
Tabel 5: PLS Regressie coëfficiënten (sensitivities) voor de verklarende factoren t.o.v. het LandSAT LST beeld en het gemiddelde UHI effect. De tabel toont zowel de coëfficiënten van een genormeerde regressie (waarbij de z-score genomen is van de originele data.)	47
Tabel 6 : Analoge regressie coëfficiënten , maar ditmaal wanneer we enkele de centrale subwijken selecteren.	49
Tabel 7 : Tabel met effectiviteitsscores voor Tilburg voor het mitigeren van hittestress overdag en t.g.v. het UHI effect. We kennen volgende scores toe : heel effectief (+++), effectief (++) , minder effectief (+), niet effectief (0) tot leidt tot verslechtering (-)	50
Tabel 8 : Overzicht van de gedownloade Landsat scènes met opname tijd (UTC) en atmosferische correctie parameters.	64
Tabel 9 : Gekozen emissiviteiten voor de gebruikte klassen in de Urban Atlas dataset. (*) We gebruiken voor naakte grond het gemiddelde van 49 bodem emissiviteiten in de ASTER spectrale bibliotheek, zie : J.A. Sobrino et al./ Remote Sensing of Env. 90 (2004) 434-440.	68

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1 : Grafiek die het percentage toename in de dagelijkse mortaliteit aangeeft, gemiddeld over alle hittegolven, hittegolven van lange duur en hittegolven van lange duur en hoge intensiteit (D'Ippoliti et al., 2010).	5
Figuur 2 : Structureel overzicht van het project.	6
Figuur 3 : Stedelijk landgebruik voor Tilburg op basis van de aangereikte GIS data.	8
Figuur 4 : Fracties van de verschillende types stedelijk landgebruik voor Tilburg. Van boven naar onder hebben we de fractie van het oppervlak van de de subwijk bedekt door gebouwen, de fractie verhard oppervlak, de fractie stedelijk groen (behalve bos), de fractie bos, wateroppervlakken en tot slot de fractie naakte bodem, die berekend is als het verschil van de totale oppervlakte met de som van de andere bedekkingstypes.	11
Figuur 5 : Illustratie van de sky view factor, bron: www.knmi.nl/klimatologie/weeramateurs/UHI/index.html	13
Figuur 6 : Illustratie van bepaling van SVF met zogeheten fish-eye lenzen. Bron : (Chapman & Thornes, 2004)	13
Figuur 7 : Enkele gedetailleerde afbeeldingen van het geherconstrueerde AHN hoogte bestand op 3 m resolutie voor Tilburg samen met de ter beschikking gestelde GIS data met gebouwen contouren. Links bovenaan zien we het station met het Wilhelmina park, rechts boven een detail hiervan, links onder zien we het Industrierrein – Oost. Rechts onder het administratieve centrum van Tilburg rond het Koningsplein.	14
Figuur 8: Enkele voorbeelden van de afgeleide sky view factoren voor Tilburg. De gebouwen (zoals die door de GIS data zijn aangeleverd) zijn uitgewist om duidelijk de SVF in de streetcanyons te laten zien. Links is het administratieve centrum van Tilburg afgebeeld en rechts een stuk van de Lijnse hoek.	15
Figuur 9 : Grafische voorstelling van het op basis van de ruwe AHN afgeleide hoogtebestand voor Tilburg.	15
Figuur 10 : Opgekuiste versie van de sky view factor voor Tilburg. De voorbeeld regio's stemmen overeen met wijken uit Figuur 8.	16
Figuur 11 : Sky View Factor op subwijkniveau voor Tilburg. De afgebeelde waarde is de mediaan van de sky view factor berekend a.d.h.v. het 3D model op 3m resolutie voor Tilburg. We dienen hier op te merken dat de afleiding van de SVF voor de westelijke wijken (Reeshof) minder betrouwbaar is t.g.v. de kwaliteit van de ruwe AHN data.	17
Figuur 12 : Eenvoudige schets ter illustratie van de front area index.	18
Figuur 13 : Frontal area density voor gans Tilburg als functie van de windrichting.	19
Figuur 14 : Front Area Index voor Tilburg boven links voor wind komende van uit het Zuiden, rechtsboven het Zuid-Westen, links onder het Westen en rechts onder het Noord-Westen. De kaarten zijn identiek voor respectievelijk Noorden, Noord-Oosten, Oosten en Zuid-Oosten.	19
Figuur 15 : Voorbeeld van de resulterende emissiviteitskaart voor de afleiding van de oppervlakte stralingstemperatuurs kaart gebaseerd op de LandSAT data.	22
Figuur 16 : Voorbeeld van enkele resulterende Landsat LST beelden in °C (links: Landsat 5, 2010.09.06, rechts: Landsat 7, 2009.09.27)	23
Figuur 17 : LandSAT5 TM oppervlakte temperatuursbeeld voor Tilburg op 06/09/2010 omstreeks 10:30 UTC.	23
Figuur 18 : Analoog als hierboven maar ditmaal ingezoomd op het administratieve centrum van Tilburg.	24
Figuur 19 : Idem, maar ditmaal de wijken ten noorden van Tilburg.	24
Figuur 20 : Idem, maar voor de Westelijke wijken in Tilburg.	25
Figuur 21 : En tenslotte de zuidelijke wijken van Tilburg.	25

Figuur 22 : Uitgemiddelde (mediaan) oppervlakte temperatuur per subwijk voor het gebruikte landsat beeld van 06/09/2010. _____	26
Figuur 23 : Schematische weergave van de verschillende componenten in het urban climate model (UCM) ontwikkeld door VITO. _____	27
Figuur 24 : Enkele voorbeelden van 1 km MODIS LST data voor Tilburg. We zien telkens in de links een beeld overdag en rechts een beeld 's nachts. Bovenaan zien we de opname voor 19/7/2010 - ~11:00 UTC links en rechts 28/6/2010 - ~22:00 UTC, onderaan links 19/7/2010 - ~13:00, rechts 23/6/2010 ~21:30 UTC. Dit lege pixels zijn ontbrekende waarden in de data. _____	28
Figuur 25 : Tijdsreeks van MODIS LST voor een 1 km pixel over het centrum van Tilburg (51.565 °N, 5.0750°E . Elk datapunt in rood afgebeeld stelt een goede LST observatie voor de 1 km pixel boven het centrum van Tilburg. _____	29
Figuur 26 : Maandgemiddelden van de luchttemperatuur op 1 km zoals berekend door het VITO UCM om 22:00 UTC 's avonds voor Juni (boven), Juli (midden) tot Augustus(onder). Links is telkens de gemiddelde luchttemperatuur weergegeven om 22:00 UTC 's avonds, rechts dezelfde grafiek, maar verminderd met de gemiddelde temperatuur over het domein (en afgekapt op 0). _____	30
Figuur 27 : Analoog als voor Figuur 26, ditmaal gemiddeld over de period Juni – Augustus 2010. _____	31
Figuur 28 : Klimatologische windrozen voor de KNMI meteo mast in De Bilt voor Juni, Juli en Augustus. Bron: http://www.knmi.nl/kd/windrozen/index.cgi _____	31
Figuur 29 : Schema van de verschillende klimatologische niveaus in stedelijke gebieden (Oke, 2006). _____	32
Figuur 30 : Meetinstrumenten, met dank aan : Arnout Stromphorst. _____	33
Figuur 31 : Lokatie van de gevonden data voor validatie voor Tilburg. De pins geven de lokatie van respectievelijk het DW6860 weerstation van A. Stomphorst en het KNMI 350 station aan de luchthaven te Gilze-Rijen. _____	33
Figuur 32 : Validatie oefening tussen het UCM, de ECMWF geïnterpoleerd naar het centrum van het modelgrid en de metingen van het DW6860 station te Tilburg. De data voor het DW6860 station te Tilburg werden ter beschikking gesteld door Dhr. Arnaut Stomphorst, amateur meteoroloog en lid van het Citizen Weather Observer Program (http://www.wxqa.com). _____	35
Figuur 33: Validatie oefening tussen het UCM, de ECMWF geïnterpoleerd naar het centrum van het modelgrid en de metingen van het KNMI station nr 350 te Gilze-Rijen (http://www.knmi.nl) . We bekijken telkens de maanden Juni-Juli-Augustus. _____	36
Figuur 34 : Schematisch overzicht van de berekening van de luchttemperatuur op straatniveau (T_{can}) op basis van de UCM luchttemperaturen. k is de von Karman constante (0.41), u^* de wrijvingsnelheid [m/s], ρ de massadichtheid van lucht bij standaard atmosfeer (1.18 kg/m ³) en c_p de warmtecapaciteit (1008 J/kg/K). _____	38
Figuur 35 : Fractie van de oppervlakte in elke 1 x 1 km pixel bedekt door gebouwen. _____	39
Figuur 36 : Resultaten van het nieuw ontwikkelde urban canopy temperatuurmodel voor tilburg. De figuur toont de periode Juli 2010. Van boven naar onder zijn voor een pixel in het centrum van Tilburg de sensible heat flux, de wrijvingsnelheid, het canopy temperatuur increment ΔT_C , de Monin-Obukhov lengte en de stabiliteitsfunctie weergegeven. De relevante rij in de grafiek is de middelste die het temperatuur increment op straat niveau t.o.v. het UCM aangeeft. _____	40
Figuur 37: Gemiddelde (links) en 95ste percentiel van het UHI effect (rechts) voor Tilburg. _____	41
Figuur 38 : Schematische weergaven van de downscaling methodiek, waarbij de grofschalige stedelijke luchttemperaturen berekend met het UCM worden gedownscaled aan de hand van het hoge resolutie Landsat LST beeld. _____	42
Figuur 39 : Hittekaarten voor tilburg waarbij we rechts het 95ste percentiel van het UHI effect voor Tilburg laten zien, en links het gemiddelde effect. _____	44
Figuur 40 : Zoom in op een aantal parken in Tilburg en hun effect op het stedelijk warmte eiland. _____	44
Figuur 41 : Resulterende gemiddelde (boven) en P95 (onder) UHI intensiteits kaarten voor Tilburg. _____	45

Figuur 42 : Resultaten van de regressie analyse, we zien links de vergelijking van het regressiemodel met de verklarende factoren uit HOOFDSTUK 2 en de oppervlakte temperatuur overdag. Rechts zien we het analoge voor het UHI effect. _____	46
Figuur 43 : Geselecteerde subwijken voor de regressie analyse voor het centrum van Tilburg. We selecteerden de wijken binnen de Ringbaan Noord, Oost, Zuid en West, aangevuld met de wijken tussen de Rueckertbaan en de Baroniebaan tot aan de Oude Warande. _____	48
Figuur 44 : We herhalen hier de afgeleide mediaan oppervlakte stralingstemperatuur op subwijk niveau en het gemiddeld stedelijk hitteiland effect (rechts) berekend respectievelijk aan de hand van remote sensing LandSAT data en het VITO stedelijk klimaat model. _____	51
Figuur 45 : Google Earth screenshots van de betrokken industrie terreinen. Bovenaan links : het industrie terrein Oost, rechts de Kraaiven, in het midden links de Vossenbergh en rechts het gebied tussen de Enschootsestraat en de Insulinde straat, en onderaan het terrein aan de hoeveneseweg. _____	52
Figuur 46 : Google earth screenshot van de westelijke wijk (Reeshof, links). Rechts zien we de centrale buurt in de noordelijke wijken, met name rond de bouwmarkt Karwei. _____	53
Figuur 47 : Hotspot zones in het centrale deel van Tilburg, met links de buurt rond de koestraat en rechts de centrale winkelbuurt van Tilburg. _____	54
Figuur 48 : Ruwe AHN hoogte data, verzameld op een 3x3m grid. De legende geeft de hoogte in m aan. _____	57
Figuur 49 : Het volledige, op basis van de ter beschikking gestelde LIDAR hoogtemetingen gereconstrueerde hoogtebestand op 3 m. Ontbrekende pixelwaarden werden door interpolatie bijgevuld. _____	58
Figuur 50 : Atmosferische profiel voor de ETM+ opname van 2011-04-10 op locatie 51.5° NB, 5° OL. _____	66
Figuur 51 : Voorbeelden van spectrale emissiviteiten voor asfalt (links) en rode baksteen (rechts). Bron: UCSB Emissivity Library. _____	67
Figuur 52 : Vergridde Urban Atlas landgebruiksklassen, op het grid voor een van de geselecteerde landsat beelden. _____	68
Figuur 53 : Resulterende emissiviteiten kaart op basis van de classificatie in Tabel 9. _____	69
Figuur 54 : Afbeelding van het regelmatig latitude / longitude grid dat we gebruiken voor de luchttemperatuur modellering. In het grid is de EEA Urban Atlas landgebruiksdataset voor Tilburg afgebeeld, bron: http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas . _____	71
Figuur 55 : Bounding box voor MODIS LST data bestanden. _____	72
Figuur 56 : Enkele voorbeelden van 1 km MODIS LST data voor Tilburg. We zien telkens in de links een beeld overdag en rechts een beeld 's nachts. Bovenaan zien we de opname voor 19/7/2010 - ~11:00 UTC links en rechts 28/6/2010 - ~22:00 UTC, onderaan links 19/7/2010 - ~13:00, rechts 23/6/2010 ~21:30 UTC. Dit lege pixels zijn ontbrekende waarden in de data. _____	73
Figuur 57 : Effect van de kwaliteitscontrole bits in de MODIS L2 LST data. Het rode histogram toont de LST waarden die we overhouden wanneer we de pixels die door wolken gecontamineerd zijn weglaten. _____	74
Figuur 58 : Tijdsreeks van MODIS LST voor een 1 km pixel over het centrum van Tilburg (51.565 °N, 5.0750°E) _____	74
Figuur 59 : Tijdsreeks van neerwaartse korte- (boven) en langegolf (onder) stralingsfluxen aan het aardoppervlak voor een pixel boven het centrum van Tilburg (zie Figuur 58) voor de maand Juli 2010. _____	75
Figuur 60 : Links : SPOT-VEGETATION fractionele vegetatie index voor Tilburg op 1 juni 2010, Rechts : Emissiviteit afgeleid van de MODIS MOD11/MYD11 data. We nemen eenvoudigweg het gemiddelde van de TIR banden 31 en 32. _____	76
Figuur 61 : Vaste grid parameters gebruikt in de Urban Climate model run voor Tilburg. We zien bovenaan links de fractie stedelijk gebied (sealed surface) in elke pixel, rechts de fractie oppervlakte water. Onderaan links zien we de terreinhoogte en rechts de albedo. _____	77

Figuur 62 : Windrozen met de meest frequente windrichting en de overeenkomstige waarden voor de grootschalige temperatuur op basis van ECMWF ERA-Interim data, geïnterpoleerd op de locatie van Tilburg. Linksboven: gemiddeld voor Juni – Augustus, de andere plots resp. juni t.e.m. augustus apart. _____	78
Figuur 63 : Hersampled LST beeld naar het UCM grid op 1x1 km. Het Originele LST beeld werd rechtsonder nogmaals weergegeven. _____	81
Figuur 64 : Regressie analyse tussen de geresamplede 1 km LST waarden en de UCM modelresultaten voor het gemiddelde UHI effect in Tilburg (links) en het P95 effect rechts. _____	82
Figuur 65 : Downscaling masker. Enkel de rode gridcellen werden voor de regressie analyse in rekening gebracht. _____	82
Figuur 66 : Variogram voor de interpolatie van het ruimtelijk residu. De blauwe datapunten geven het experimentele variogram weer, de rode lijn het gebruikte model. Links is het variogram voor de residues voor het gemiddelde UHI effect te zien, rechts voor het 95 ^{ste} percentiel. _____	83
Figuur 67 : Luchttemperatuur residus via Ordinary Kriging geïnterpoleerd naar het 30 m landsat grid. Links voor het gemiddelde UHI effect, rechts voor het 95 ^{ste} percentiel. _____	84
Figuur 68 : Gedownscalede UHI kaarten (gemiddeld effect links, rechts zien we het maximale : P95 effect) voor Juli 2010 boven Tilburg. _____	84

LIJST VAN AFKORTINGEN

LST	Land Surface Temperature (de temperatuur van het aardoppervlak)
UCM	Urban Climate Model
EEA	European Environmental Agency
ESA	European Space Agency
TM	Thematic Mapper (Landsat 5 sensor)
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus (Landsat 7 sensor)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
UHI	Urban Heat Islands (Stedelijk warmte eiland)
SVF	Sky View Factor
FAD	Frontal Area Density (λ_f)
TIR	Thermal Infra red (ruwweg 8 μm – 12 μm golflengte)
PLS	Partial Least Squares Regression

HOOFDSTUK 1. INLEIDING

1.1. HITTESTRESS IN STEDEN

Het is een gekend fenomeen dat de stedelijke omgeving een andere temperatuursdynamiek kent t.o.v. de omliggende landelijke gebieden. Het zogenaamde stedelijk warmte eiland effect (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. Laten we de oorzaken hiervan es op een rij zetten (Oke, 1991)

1. 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 warmen weliswaar trager op, maar zorgen er ook voor dat er meer én langer warmte wordt afgegeven aan de atmosfeer wanneer de zon is ondergegaan ten opzicht van de omliggende rurale gebieden. Het is verder ook zo dat stedelijke oppervlakken effectief minder zonlicht weerkaatsen. In mediterrane steden wordt dit fenomeen typisch verholpen door het aanbrengen van witte verf op de gevels en de daken die de zgn. albedo waarde doen verhogen. Deze albedo waarde geeft aan welke fractie van de inkomende zonnestraling wordt gereflecteerd terug naar de atmosfeer.
2. Steden kennen een sterke **reductie** van **natuurlijke oppervlakken** : boven natuurlijke oppervlakken met een niet gering percentage aan bodemvocht zal een deel van de beschikbare warmte gebruikt worden voor de verdamping van water. Deze energie kan echter niet meer dienen om de lucht in de atmosfeer op te warmen, waardoor de luchttemperatuur minder toeneemt. Deze zogenaamde latente warmte flux is in stedelijke omgeving veel geringer, waardoor er meer energie beschikbaar is voor het opwarmen van de atmosfeer.
3. Door de **geometrie van steden**, met soms hele diepe street canyons¹, 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 aan de grond sterk kan afkoelen. In het geval van een stad echter is niet de volledige hemel zichtbaar vanaf de grond. Door street canyon effecten worden bepaalde stukken van het hemelgewelf afgedekt door gebouwen. Een deel van de uitgestraalde warmte zal hierdoor terug geabsorbeerd worden door de gebouwen, waardoor de stedelijke omgeving minder snel energie verliest en dus langer warm blijft. Verder draagt de geometrie van de steden bij tot de vermindering van de effectieve albedo van de stad. Inkomende zonnestraling wordt niet zomaar gereflecteerd naar de atmosfeer, maar kan door verschillende interne reflecties “verdwijnen” in de street canyons, waardoor er effectief minder zonlicht weerkaatst wordt. Het is tenslotte ook zo dat de complexe

¹ Hiermee bedoelen we straten die typisch aan 2 kanten geflankeerd zijn door een aaneengesloten gebouwenrij.

geometrie van de steden ervoor zorgt dat er in de streetcanyons een sterk verminderde windsnelheid is. Hierdoor is er minder aanvoer van koelere lucht uit de omgeving of turbulente uitwisseling met hoger gelegen koelere luchtlagen. Men kan dus stellen dat een pakketje lucht in stedelijke omgeving langer blijft hangen, en dus meer tijd heeft om warmte vanuit de grond en de gebouwen op te nemen, waar door z'n temperatuur hoger kan worden.

4. Vervolgens dragen ook de mensen en menselijke activiteiten bij tot het warmte-eiland effect. Deze **anthropogene warmte** is naast het dierlijk metabolisme ondermeer afkomstig van air conditioning installaties, warme uitlaatgassen van voertuigen en industriële installaties en kan in bepaalde gevallen een substantiële bijdrage leveren tot het stedelijk warmte eiland effect, en zelfs voor een positief feedback effect zorgen, waarbij de warmte afkomstig van airco installaties hogere lucht temperaturen genereert, welke op zich dan terug zorgen voor een toename in het gebruik van airco.

Op zich draagt de verhoogde verontreiniging in de stedelijke omgeving ook bij tot het warmte-eiland effect, maar dit laten we hier in deze studie nu even buiten beschouwing.

Voor het maximale temperatuursverschil tussen de stedelijke en rurale omgeving bestaan eenvoudige empirische relaties (Oke, 1988). Het maximale temperatuursverschil kan ruwweg worden ingeschat door :

$$\Delta T_{u-r(\max)} \approx 15.27 - 13.88 \cdot \psi_{\text{sky}}$$

De grootte ψ_{sky} is de zogenaamde sky-view-factor, welke sterk gerelateerd is aan puntje 3 hierboven, en welke we later meer in detail zullen definiëren en bekijken voor Tilburg. Voor het centrum van Tilburg bedraagt deze waarde ongeveer 0.80 – 0.85, wat zou leiden tot een maximaal UHI effect van ~ 4 °C. Heel recent werd een studie gepubliceerd door de universiteit van Wageningen (Steenveld et al, 2011), welke op basis van data afkomstig van hobby-meteorologen een inschatting maakte van het UHI effect in Nederland. De gemiddelde dagmaximum warmte-eiland intensiteit voor Nederland bedraagt 2.3 °C, met een 95 percentiel waarde van 5.3 °C. Er is een goeie correlatie t.o.v. bevolkingsdichtheid vastgesteld en op basis van deze relatie² verwacht men voor Tilburg een gemiddelde UHI intensiteit van ongeveer ~ 1.8 °C, en een 95 percentiel van ~ 4.3 °C, wat in relatief goede overeenstemming is met de inschatting van het maximale UHI effect op basis van de sky view factor relatie van (Oke, 1988) hierboven gegeven.

Zoals hoger vermeld is het stedelijk warmte eiland effect overdag veel minder uitgesproken of zelfs negatief. Immers, de stedelijke constructiematerialen hebben een hogere warmtecapaciteit en het duurt dus ook langer vooraleer ze opwarmen. Een stad fungeert dus met andere woorden als een soort buffer voor temperatuurschommelingen. Verder dragen schaduw effecten ook bij tot dit effect. Dit stedelijke koelte-eiland effect is echter qua intensiteit veel minder dan het warmte eiland effect, gezien het gedeeltelijk gecompenseerd wordt door de warmte uitstoot ten gevolge van menselijke activiteiten, zie ondermeer (Erell & Williamson, 2007). Wanneer het voorkomt, beperkt het stedelijk koelte eiland zich in intensiteit tot enkele tienden van een graad.

² In G.J. Steenveld et al, 2011 wordt de gemiddelde UHI intensiteit als functie van de bevolkingsdichtheid in Nederland gegeven door $0.1822 B^{0.2996}$ en de 95 percentiel als $0.6162 B^{0.2529}$. Met B de bevolkingsdichtheid op wijkniveau. Deze laatste grootte vonden we terug op de site van het centraal bureau voor de statistiek (www.cbs.nl), waar de kerncijfers per wijk te downloaden zijn. Voor Tilburg vinden we als gemiddelde bevolkingsdichtheid over de wijken B=2186 inwoners/km².

In dit document beschrijven we in detail de gevolgde methodiek voor het opstellen van de hittekaart voor Tilburg. Gezien de complexiteit van warmte ontwikkeling in steden zullen een aantal facetten aan bod komen in volgende hoofdstukken. Eerst en vooral zullen we op basis van een GIS analyse een inschatting maken van waar we bij hoge achtergrond temperaturen additionele hittestress in Tilburg verwachten. Hittestress is in grote mate een subjectief gegeven, hitte wordt bijvoorbeeld door de mediterrane bevolking anders ervaren dan de bevolking uit de eerder noordelijke regio's binnen Europa. Het is ook zo dat er grote verschillen zijn in interpersoonlijke hitte ervaring, waarbij zaken zoals het metabolisme een belangrijke rol spelen. Om hittestress te kwantificeren bestaan een aantal indicatoren die een aantal meteorologische en biofysische parameter combineren. De meest eenvoudige indicator is de zgn. "discomfort index", welke gedefiniëerd is als zijnde

$$DI = T_{air} - 0.55(1 - 0.01RH)(T_{air} - 14.5)$$

met T_{air} de luchttemperatuur in °C en RH de relatieve vochtigheid in %. Een eenvoudige interpretatie van deze indicator is gegeven in Tabel 1 hieronder.

DI(°C)	Hittestress niveau
DI < 21	Bevolking ondervindt geen hittestress
21 ≤ DI < 24	Minder dan 50 % van de bevolking ondervindt hittestress
24 ≤ DI < 27	Meer dan 50 % van de bevolking ondervindt hittestress
27 ≤ DI < 29	De meerderheid van de bevolking ondervindt hittestress
29 ≤ DI < 32	Vrij sterke en zelfs gevaarlijke hittestress voor de hele bevolking
32 ≤ DI	Medische noodtoestand

Tabel 1 : Interpretatie sleutel voor de discomfort index (Thom, 1959)

Deze hittestress indicator houdt echter geen rekening met directe blootstelling aan zonnestraling. Meer geavanceerder indicatoren, zoals de Thermal Stress Index (TSI) (Givoni, 1963) of de Predicted Mean Vote (PMV) (Fanger, 1970) of recent the Universal Thermal Climate Index (UTCI), (zie www.utci.org) bestaan, welke zelfs zover gaan dat ze bepaalde aspecten van klederdracht en menselijk metabolisme in rekening brengen. Het probleem echter bij deze indicatoren is de beschikbaarheid van gedetailleerde data om alle parameters in te kunnen schatten. Ook wat betreft de discomfort index wordt de situatie in het geval van deze studie gecompliceerd door het feit dat er geen ruimtelijk expliciete metingen beschikbaar zijn binnen Tilburg. De gebruikte modellen en data zijn in staat de stedelijke luchttemperatuur te berekenen. Daar we geen ruimtelijke expliciete informatie over de relatieve vochtigheid hebben brengt deze parameter in feite niets bij aan een ruimtelijke analyse waar er hittestress in Tilburg kan optreden.

Om toch tot een ruimtelijke analyse te komen zullen we dus enkel gebruik maken van luchttemperatuur en stralingstemperatuur. We zullen hierbij een onderscheid maken tussen de situatie overdag en de situatie 's avonds. Gezien het stedelijk warmte eiland meest uitgesproken is in de avond, zal het hitte-gerelateerd ongemak overdag voornamelijk bepaald worden door instraling, vegetatie en schaduw effecten. Op plaatsen waar geen schaduw (door gebouwen of door bomen) voorhanden is zal meer ongemak ondervonden worden. 's Avonds, wanneer de zon onder is gegaan, zal het ongemak voornamelijk bepaald worden door de verhoogde luchttemperaturen, met slaapproblemen en verminderde recuperatie bij hittegolven tot gevolg.

Bij gedetailleerde studies van de hittegolf in Parijs in 2003 zijn naar schatting 70000 extra overlijdens over gans Europa (Robine et al., 2008), vastgesteld, gerelateerd aan de hittegolf. Hierbij is gebleken dat de nachtelijke minimum temperatuur, en voornamelijk de duur van de hittegolf een cruciale rol speelt in het verklaren van het aantal overlijdens. Uiteraard is de toename van het

aantal overlijdens gerelateerd aan hittegolven³ gevoelig hoger in mediterrane steden (21.8 %), maar in de meer noordelijke Europese steden stelde men toch ook een duidelijke toename van 12.4 % vast (D'Ippoliti et al., 2010)⁴. Voornamelijk de bevolkingsgroep tussen 75 en 84 jaar is het sterkst getroffen, waarbij de kwetsbaarheid van vrouwen het hoogst is. Voornamelijk aandoeningen van de luchtwegen lijken aan de oorzaak te liggen van het verhoogde sterfte cijfer tijdens hittegolven (D'Ippoliti et al., 2010).

	<i>North-Continental cities</i>				<i>Mediterranean cities</i>			
	Males		Females		Males		Females	
	% increase	(90% CI)	% increase	(90% CI)	% increase	(90% CI)	% increase	(90% CI)
All causes								
65-74 age group	8.2	(5.2 - 11.3)	9.7	(6.2 - 13.4)	14.5	(10.4 -18.5)	23.0	(17.8 -28.4)
75-84 age group	12.4	(9.7 - 15.3)	14.9	(12.3 -17.7)	18.1	(14.2 -21.9)	33.0	(28.9 -37.3)
85+ age group	10.7	(7.3 - 14.3)	18.4	(16.0 -21.0)	32.3	(27.1 -37.9)	35.9	(31.9 -40.1)
Respiratory								
65-74 age group	16.8	(6.3 - 28.1)	12.6	(-0.1 -27.0)	32.4	(14.3 -53.3)	45.8	(22.3 -73.7)
75-84 age group	19.0	(11.0 -27.6)	21.4	(12.9 -30.6)	44.8	(30.9 -60.0)	61.3	(44.3 -80.4)
85+ age group	12.1	(3.5 - 21.4)	30.0	(22.8 -37.6)	58.9	(42.9 -76.5)	58.1	(44.3 -73.3)
Cardiovascular								
65-74 age group	6.8	(2.2 -11.7)	12.3	(6.3 -18.6)	14.7	(7.8 -22.0)	38.0	(28.7 -48.0)
75-84 age group	9.7	(5.5 -14.0)	15.7	(11.7 -19.8)	18.4	(12.4 -24.7)	43.3	(37.0 -50.1)
85+ age group	10.6	(5.2 -16.3)	17.5	(14.0 -21.2)	34.7	(27.1 -42.8)	38.5	(33.4 -43.9)
Cerebrovascular								
65-74 age group	6.3	(-4.6 -18.5)	12.2	(-0.3 -26.4)	31.9	(16.3 -49.5)	37.9	(21.4 -56.7)
75-84 age group	11.6	(2.8 -21.3)	20.4	(12.7 -28.7)	20.3	(8.9 -32.8)	44.1	(33.5 -55.4)
85+ age group	17.8	(6.5 -30.3)	19.4	(12.5 -26.5)	41.1	(27.1 -56.7)	39.5	(30.5 -49.2)

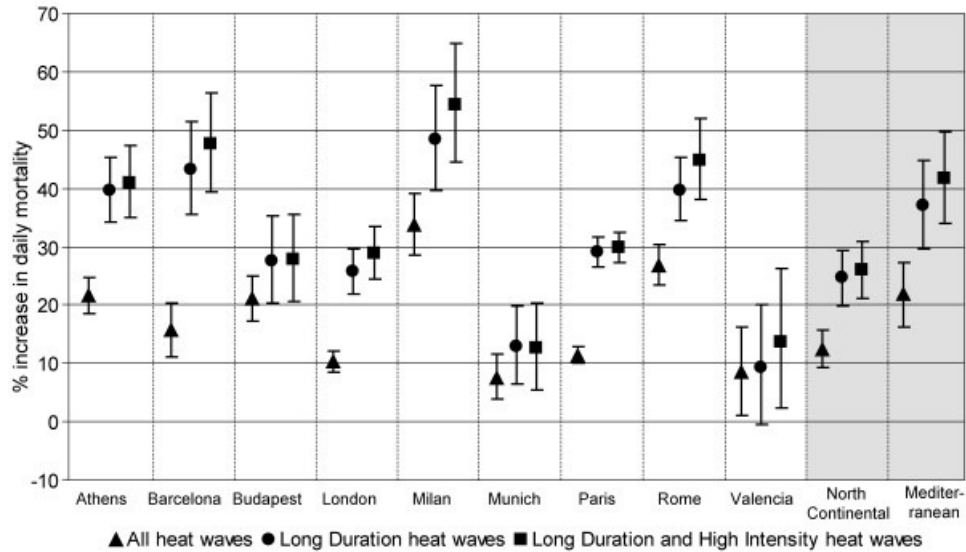
Tabel 2 : Verhoogde sterfte cijfer (dagelijkse mortaliteit) tijdens hittegolven in mediterrane en noordelijke steden in Europa. Bron: (D'Ippoliti et al., 2010). Studieperiode : 1990-2002 en 2004. 2003 werd hier als extreem jaar niet in rekening gebracht.

In Tabel 2 hierboven geven we een overzicht van de oorzaken van het verhoogde dagelijkse sterftcijfer tijdens hittegolven voor een studieperiode 1990 – 2002 en voor 2004 (het extreme jaar 2003 werd door de onderzoekers in deze studie niet in rekening gebracht). Figuur 1 hieronder geeft ook aan dat de toename van het sterftcijfer voornamelijk gerelateerd is aan de duur van een hittegolf, en in mindere mate aan de intensiteit⁵. We zien inderdaad dat wanneer we hittegolven van hoge intensiteit beschouwen, het sterfte cijfer maar een weinig toeneemt t.o.v. wanneer we hittegolven van lange duur beschouwen.

³ Een hittegolf wordt in deze context uniform gedefinieerd als perioden van tenminste 2 dagen waarbij de Tappmax boven de 90 percentiel waarde van de maandelijkse distributie ligt of wanneer de dagelijkse minimum temperatuur boven de 90 percentiel waarde ligt én de Tappmax boven de maandelijkse mediaan waarde. Merk op dat de Tappmax gedefinieerd is als $T_{appmax} = -2.653 + 0.994T_{air} + 0.0153T_{dew}^2$, waarbij T_{air} de luchttemperatuur en T_{dew} de dauwpunt temperatuur. Het is met andere woorden een indicator die zowel luchttemperatuur als vochtigheid in rekening brengt.

⁴ Resultaten van het EuroHEAT project, zie : http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0018/112473/E91350.pdf

⁵ Korte of lange duur van een hittegolf werd gedefinieerd t.o.v. de mediaan in de statistische analyse in , we spreken van een kort hittegolf wanneer de duur korter is dan de mediaan over de periode van 2003

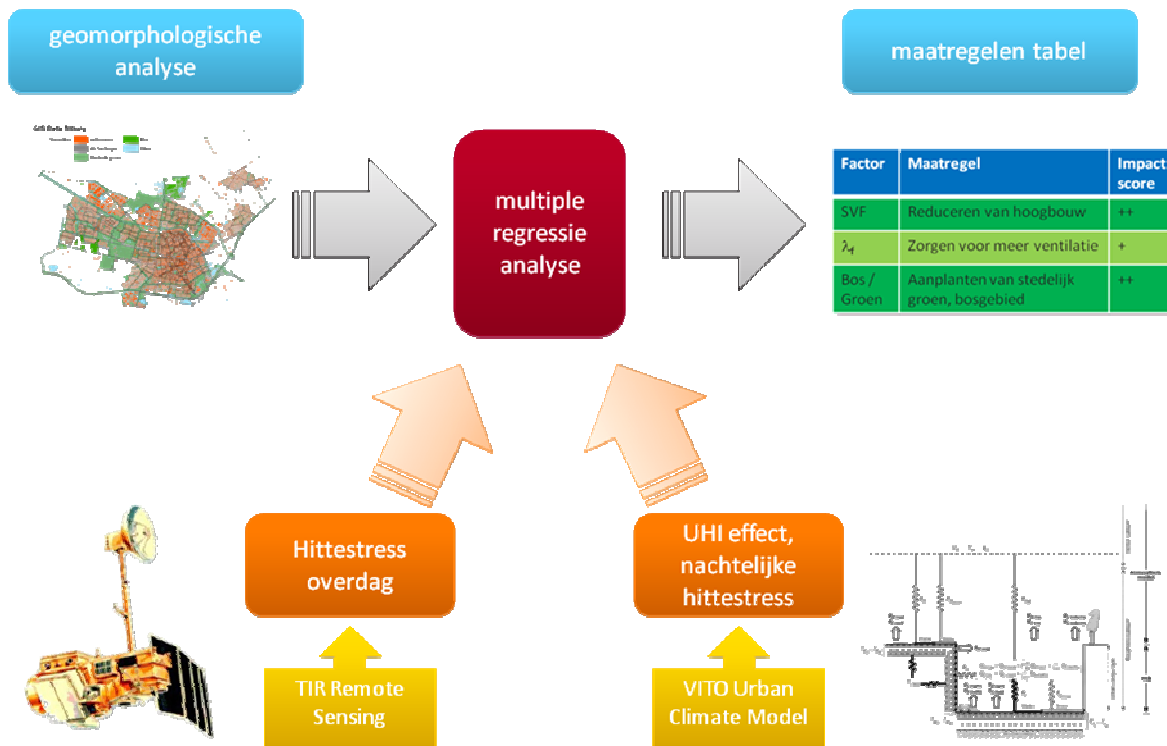


Figuur 1 : Grafiek die het percentage toename in de dagelijkse mortaliteit aangeeft, gemiddeld over alle hittegolven, hittegolven van lange duur en hittegolven van lange duur en hoge intensiteit (D'Ippoliti et al., 2010).

Naast puur medische oorzaken spelen factoren zoals sociale isolatie, lage inkomens en gebrek aan adaptatie capaciteit (door bijvoorbeeld nabijheid van groen, water) ook een belangrijke rol spelen in de kwetsbaarheid voor hittestress.

1.2. PROJECT OVERZICHT

Dit document bevat de schriftelijke neerslag van de hittestress analyse voor Tilburg die in het kader van het Europees interregio project rond functioneel groen werd uitgevoerd. In Figuur 2 hieronder hebben we gepoogd een structureel overzicht te geven van de verschillende taken binnen dit project en hoe ze op elkaar aansluiten.



Figuur 2 : Structureel overzicht van het project.

In een eerste fase zal een geomorphoglogische analyse van de GIS data van Tilburg uitgevoerd worden (beschreven in hoofdstuk 2). We zullen hier enkele indicatoren afleiden voor de subwijken in Tilburg die gelinkt zijn aan de bepalende factoren voor stedelijke warmte ontwikkeling, opgelijst aan het begin van dit hoofdstuk, het gaat hier om factoren zoals het aandeel bebouwde/verharde oppervlakte, stedelijk groen, sky view factor (SVF) and frontal area density (FAD). Deze grootheden zullen verder concreet worden gedefiniëerd en besproken.

Vervolgens zullen we op basis van satelliet-gebaseerde thermisch infrarode (TIR) remote sensing beelden een kaart afleiden van de oppervlakte temperatuur 's middags. Deze kaart geeft aan waar er overdag de grootste stralingswarmte optreedt. Stralings warmte en windsnelheid zijn immers overdag de bepalende factoren voor thermisch comfort (Katzschner, 2006). Op basis van het een stedelijk klimaatmodel dat in het kader van het ESA-DUE urban heat islands project⁶ door VITO is ontwikkeld (Maiheu et al., 2010), zullen we een kaart van het stedelijk warmte-eiland voor Tilburg afleiden, gezien bovenstaande discussie is deze kaart eerder relevant voor de hittestress 's nachts en 's avonds. Het VITO model integreert echter ook satelliet observaties van de oppervlakte temperatuur zowel op lage ruimtelijke resolutie (~1 km) als op hoge ruimtelijke resolutie (~30 – 100 m) via data assimilatie en berekent tijdsreeksen van ruimtelijk expliciete luchttemperatuur boven stedelijk gebied. We dienen op te merken dat het gebruik van remote sensing data en het toepassen van een model noodzakelijk is in deze daar we over geen meteorologische observaties van luchttemperatuur, vochtigheid en eventueel instraling beschikken. Het is daarom, zoals hoger aangegeven, in deze studie ook moeilijk om afgeleide thermische stress indicatoren te berekenen, daar bvb. geen ruimtelijk expliciete informaite over relatieve vochtigheid ter beschikking is. Momenteel is dit een geplande uitbreiding van het VITO stedelijk klimaat model, maar het is niet mogelijk binnen het bestek van deze studie hier reeds een implementatie van te doen.

⁶ Zie: <http://www.urbanheatiland.info>

In het kader van dit project werd aan het VITO model echter wel een streetcanyon parametrisatie toegevoegd, waardoor het model beter in staat is de luchttemperaturen tussen de gebouwen te bepalen. Het grote voordeel van deze aanpak is dat we in staat zullen zijn een UHI kaart voor Tilburg te afleiden op basis van maandelijks statistieken, en dus geen momentopname.

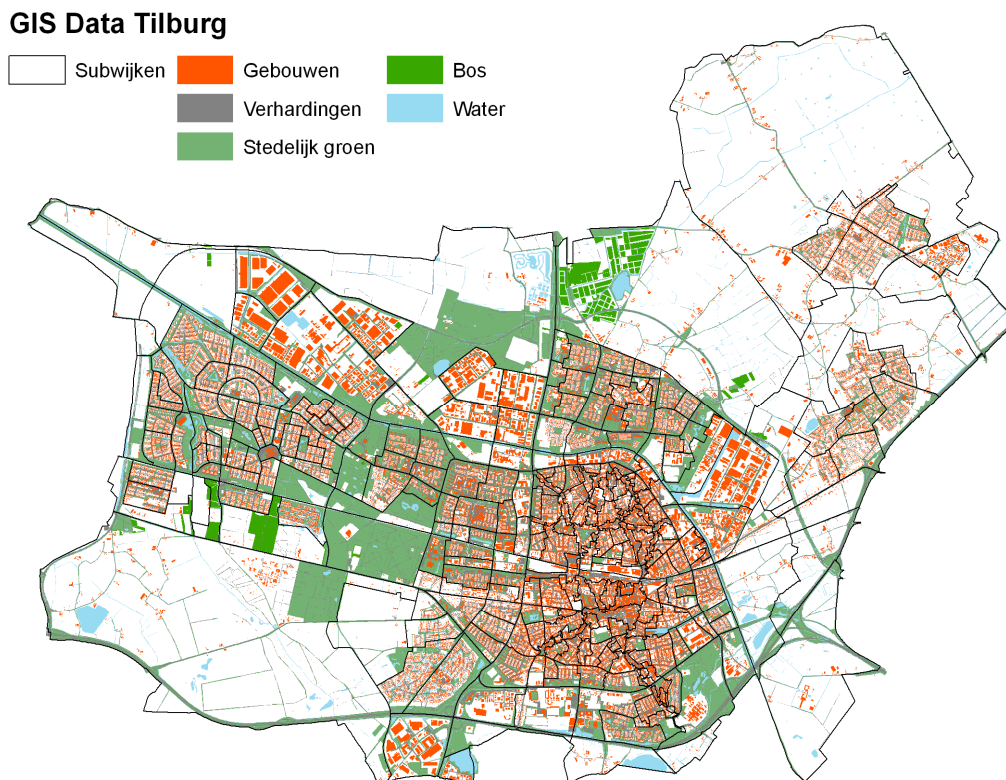
We wensen als slot van deze inleidende tekst nog even duidelijk te stellen dat we in deze géén gebruik maken van een microschaal model zoals ENVI-met (Bruse & Fler, 1998). Dergelijke modellen zijn in staat een heel gedetailleerd beeld te geven van de luchttemperatuur in stedelijke omgeving daar nagenoeg alle fysische processen zoals instraling van de zon, schaduw, materiaaleigenschappen, hitteuitwisseling aan de grond en gebouwenwanden, evapotranspiratie in vegetatie enz... in het model worden berekend. An sich zijn dergelijke modellen dus best geschikt om bijvoorbeeld effecten van individuele groen elementen te bepalen, maar een effectieve doorrekening op het niveau van een ganse stad of gemeente is computationeel niet haalbaar. In de huidige vorm zou het ENVI-met model hiervoor meerdere maanden (tot zelfs jaren) dienen te rekenen.

HOOFDSTUK 2. GEOMORFOLOGISCHE ANALYSE GIS DATA

In dit hoofdstuk zullen we een analyse doorvoeren van de factoren die aanleiding kunnen geven tot hittestress, zij het overdag door ventilatie, instraling en gebrek aan schaduw door gebouwen of vegetatie, zij het 's avonds door verhoogde luchttemperatuur en het beter vasthouden van de warmte in de stedelijke omgeving. Voor deze analyse maakten we gebruik van data die ons ter beschikking is gesteld door de Tilburgse GIS dienst.

2.1. STEDELIJK LANDGEBRUIK

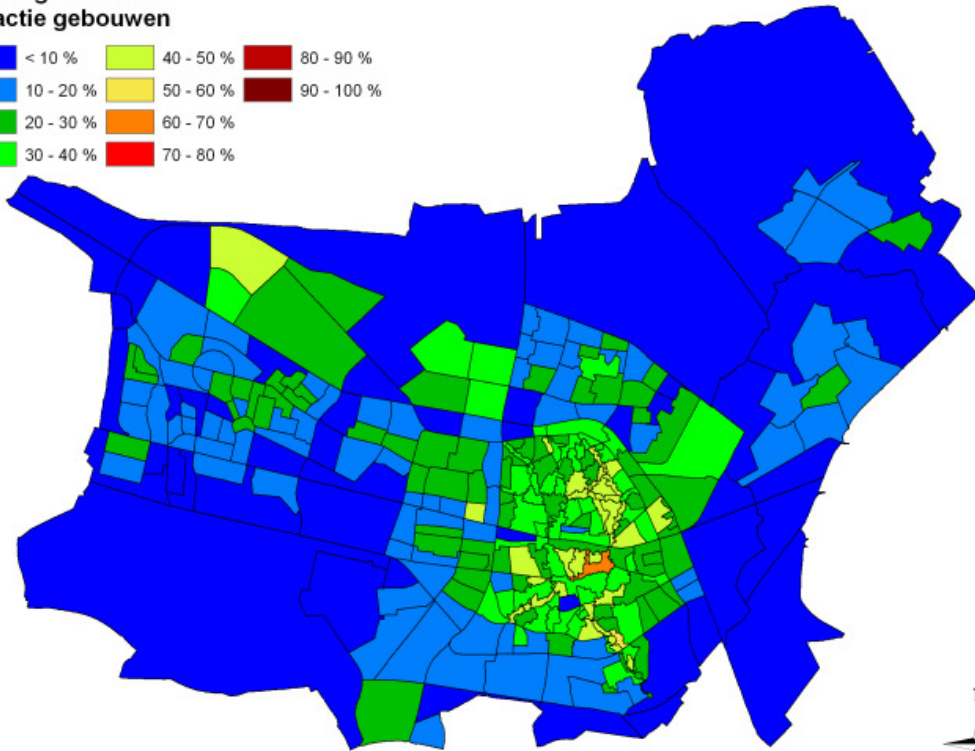
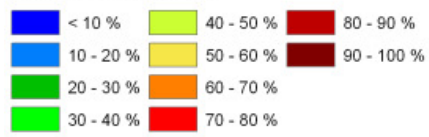
De ons aangereikte GIS data bevatte een zeer gedetailleerde dataset van de lokatie van de gebouwen, de verharde oppervlakken, stedelijk groen/bos en wateroppervlakken voor Tilburg. Een grafische voorstelling van deze stedelijke landgebruiksdata is weergegeven in Figuur 3 hieronder.



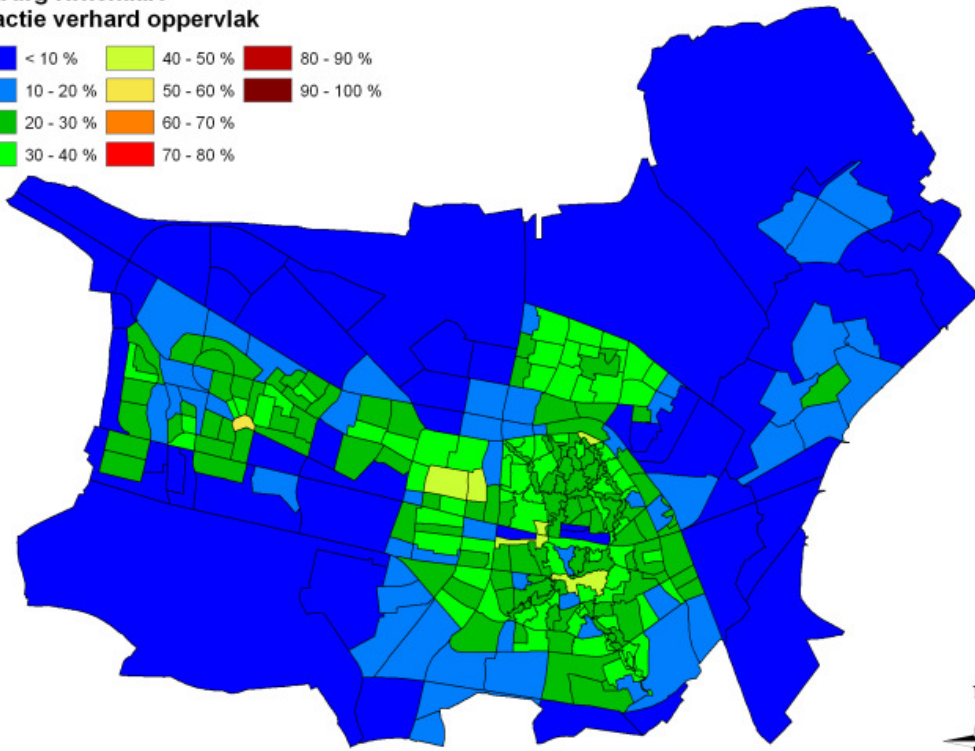
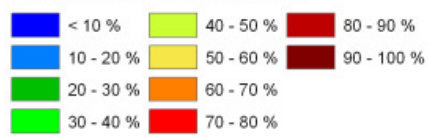
Figuur 3 : Stedelijk landgebruik voor Tilburg op basis van de aangereikte GIS data.

Op basis van deze datasets werd telkens voor elk van de subwijken de fractie van het oppervlak dat door elk van de types stedelijk oppervlak wordt vertegenwoordigd afgeleid. Figuur 4 hieronder geeft de procentuele fracties weer voor elke subwijk.

**Tilburg Hittekaart
Fractie gebouwen**

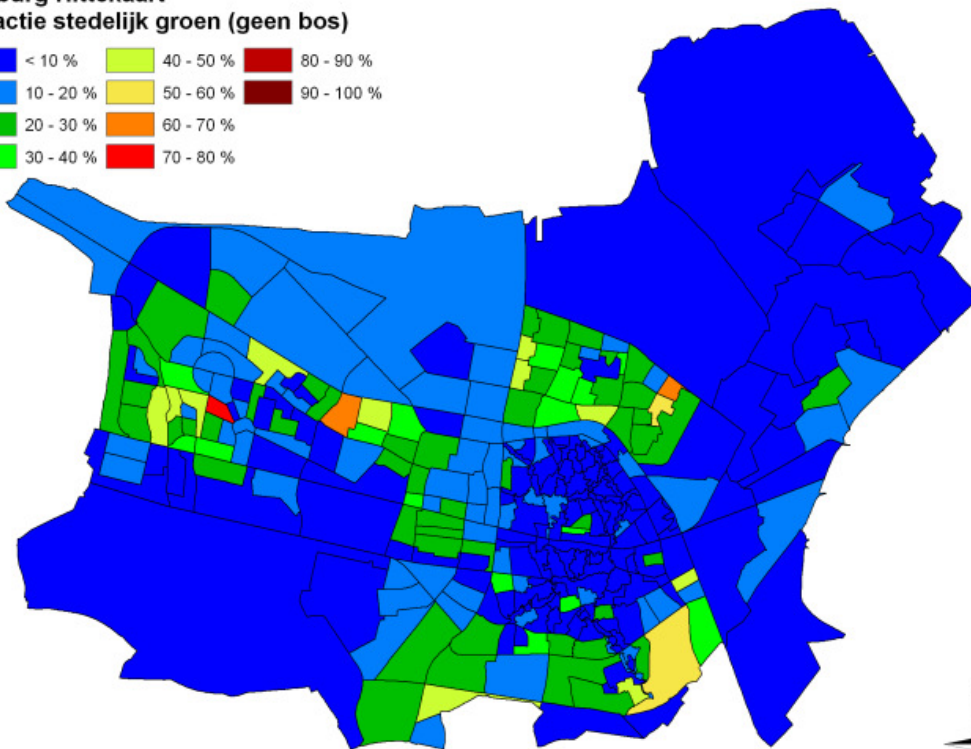
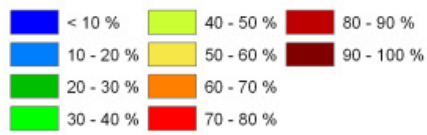


**Tilburg Hittekaart
Fractie verhard oppervlak**



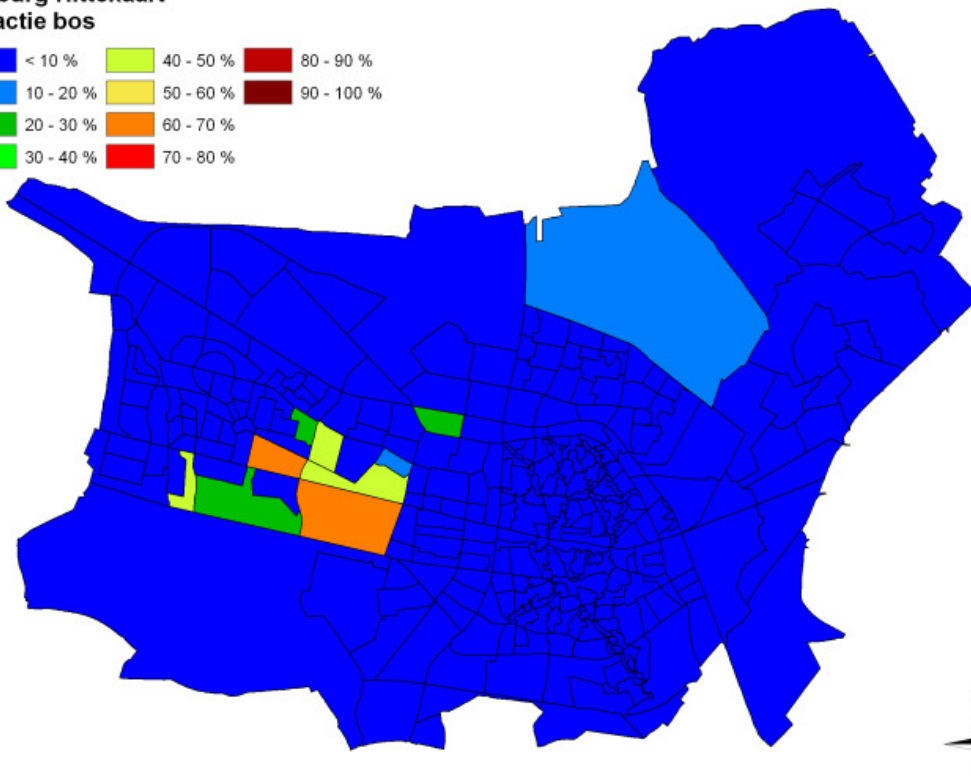
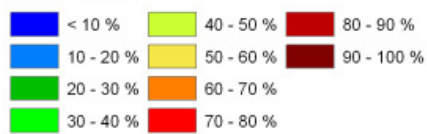
Tilburg Hittekaart

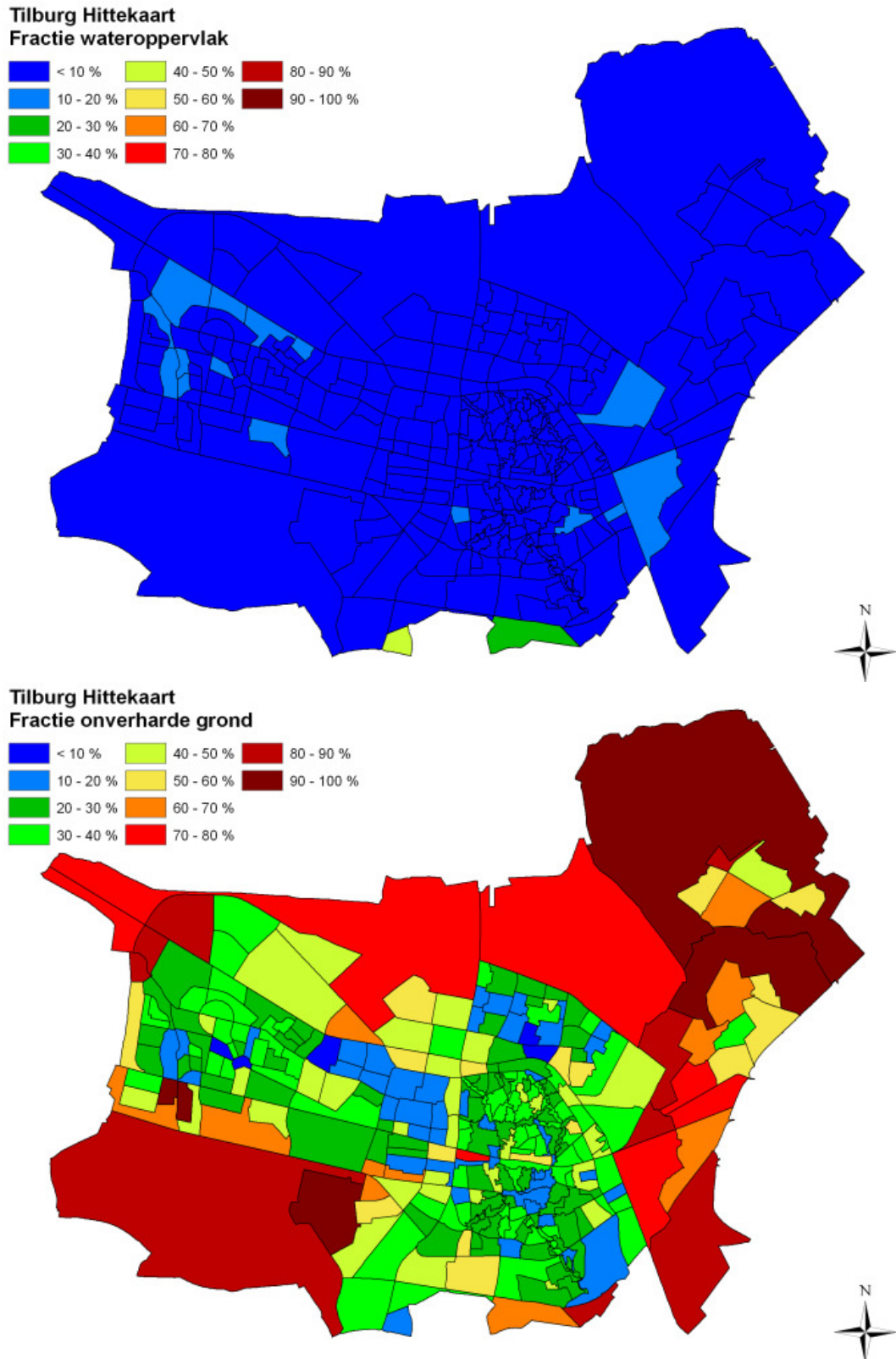
Fractie stedelijk groen (geen bos)



Tilburg Hittekaart

Fractie bos





Figuur 4 : Fracties van de verschillende types stedelijk landgebruik voor Tilburg. Van boven naar onder hebben we de fractie van het oppervlak van de de subwijk bedekt door gebouwen, de fractie verhard oppervlak, de fractie stedelijk groen (behalve bos), de fractie bos, wateroppervlakken en tot slot de fractie naakte bodem, die berekend is als het verschil van de totale oppervlakte met de som van de andere bedekkingstypes.

Het werd vastgesteld dat in de dataset met bosgebied er een zekere overlap bestaat met de dataset voor stedelijk groen. De fractie stedelijk groen die bijgevolg in bovenstaande figuur is weergegeven betreft dus enkel het stedelijk groen dat niet overlapt met het bosgebied. Verder hebben we ook de fractie onverharde grond (Figuur 4 onder) berekend als zijnde het residu van de totale oppervlakte van de subwijk vermindert met de oppervlakte bedekt door de andere types. We dienen hier duidelijk de opmerking te maken dat de weergegeven fracties telkens genormaliseerd zijn met de oppervlakte van de totale subwijk. Voor grotere gebieden (zoals het omringende ruraal gebied) kan dit enigszins verwarrend zijn. Verder is het zo dat de aangeleverde **data omtrent bosgebied onvolledig** is. Zo is enkel de data beschikbaar van het stedelijk groen dat in beheer van de gemeente is én is verder een groot stuk bos onder het oude warande park niet in de dataset opgenomen (Buitengebied Zuid-West). Het is verder wel zo dat dit stuk bos vanuit stedelijk klimatologisch standpunt ideaal gelegen is gezien de overheersende windrichting tijdens de zomer maanden (Zie verder Figuur 28). Niettegenstaande het feit dat het stedelijk warmte eiland effect het meest uitgesproken is onder windstille condities, kan een dergelijke groenbuffer makkelijk voor 1-2 °C verkoeling zorgen. CFD analyses hebben op microschaal aangetoond dat de grootte van de groenzones de belangrijkste parameter is voor het reductie van de luchttemperatuur, zie o.a. (Dimoudi & Nikolopoulou, 2003).

Verder zien we dat de zones met stedelijk groen zich volgens de GIS data hoofdzakelijk bevinden ten noorden van het centrum : in de wijken Stokhasselt, De schans, Quirijnstok en de Lijnse hoek, ten zuiden : Groenewoud en Het Laar, Zorgvlied en de Blaak. Opvallend is ook de relatief hoge bedekking met stedelijk groen in de westelijke wijken rond het Reeshof. We vinden daar relatief gesproken de hoogste bedekking met stedelijk groen voor de bebouwde zones in Tilburg.

Verder is uiteraard het aandeel bebouwd en verhard oppervlak het grootst in de kern van Tilburg. Voor de fractie verhard oppervlak vinden we een relatief uniform beeld over gans het centrum, maar voor de fractie effectief bebouwde oppervlakte zien we toch dat een aantal zones relatief gesproken dichter bebouwd zijn dan andere. In het centrum is dit de buurt ten noorden van het stadhuisplein. In het noordoosten gaat het hier concreet om de Koestraat wijk, de wijk tussen de Wagenaarstraat en de Van Goorstraat en het stuk van de industriezone Lovense kanaaldijk onder de Enschotsestraat. Ten westen van het centrum merken we de Noordhoek wijk op.

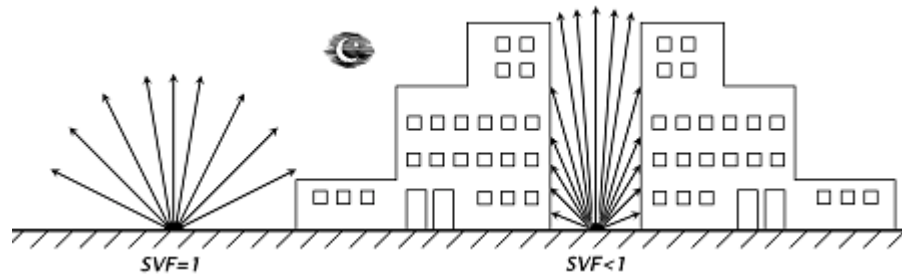
Het aandeel water in de Tilburgse wijken blijft heel beperkt, met in de meeste subwijken < 10 % wateroppervlak.

2.2. STEDELIJKE GEOMETRIE

2.2.1. SKY VIEW FACTOR

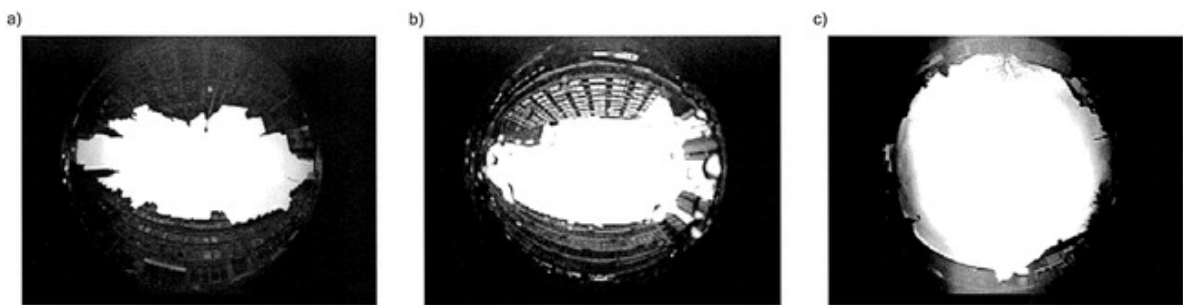
Zoals hoger reeds vermeld speelt de stedelijk geometrie (street canyons) ook een belangrijke rol in het stedelijk warmte eiland. Het is namelijk zo dat bij diepe street canyons, de effectieve albedo van het oppervlak verlaagt. De albedo coëfficiënt geeft aan in welke mate het zonlicht wordt teruggekaatst vanaf het oppervlak (zie verder §2.3). Schaduw effecten van street canyons zorgen voor een verminderde instraling van de zon en dus minder opwarming, terwijl ze op hun beurt dan een weer een zekere weerstand tegen thermische (lang golvige) uitstraling bieden door complexe uitwisselingsprocessen tussen de gebouwen en de lucht in de canyon. De sterk gereduceerde windsnelheid en turbulentie in de streetcanyon zorgen verder ook voor een verminderde uitwisseling met de hogere luchtlagen, waardoor de warme lucht langer blijft hangen. Men kan dus

algemeen stellen : street canyons zorgen voor schaduw, maar houden de opgeslagen warmte langer en efficiënter vast. Een belangrijke grootheid in deze context is de sky view factor, SVF, zoals geïllustreerd in Figuur 5 hieronder.



Figuur 5 : Illustratie van de sky view factor, bron: www.knmi.nl/klimatologie/weeramateurs/UHI/index.html

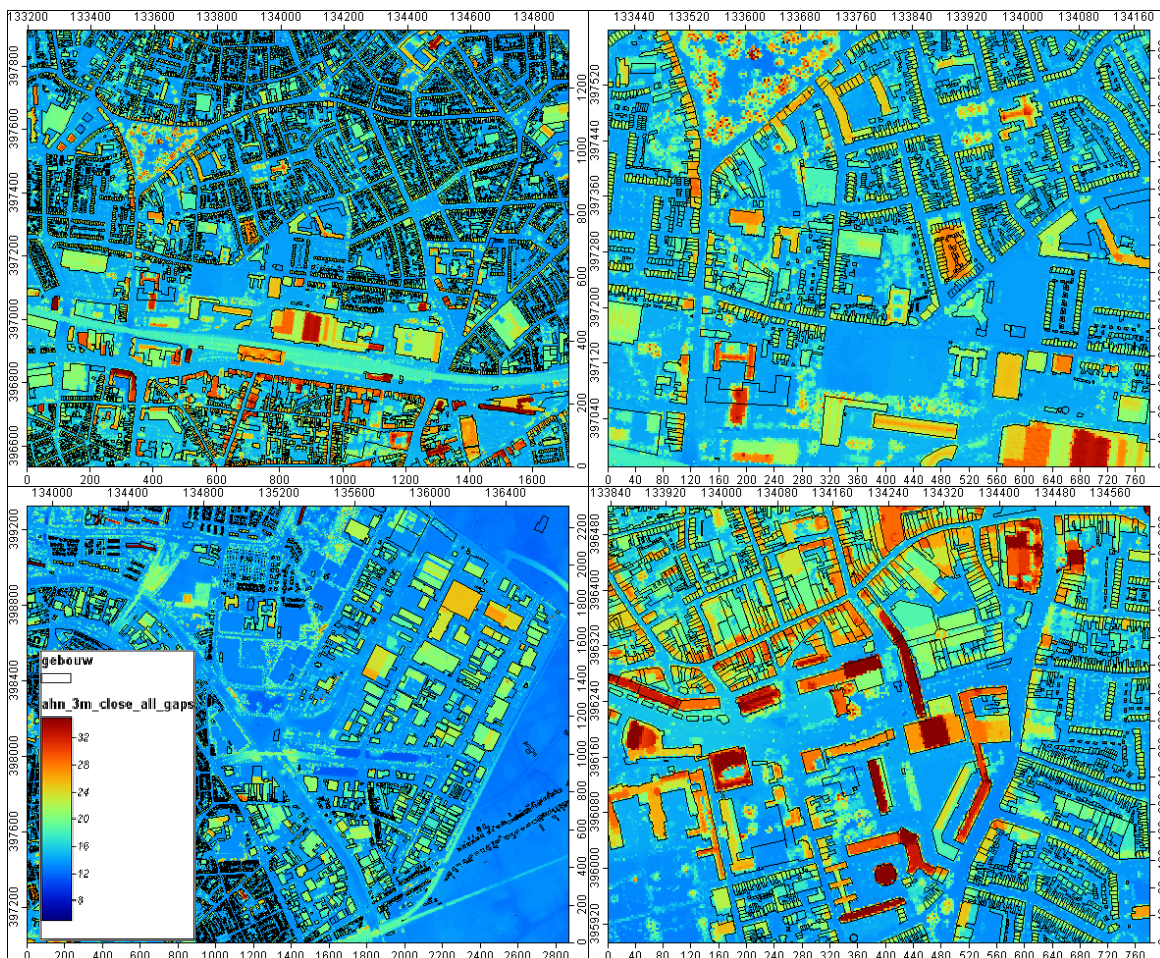
De sky view factor is in feite de fractie van de hemel koepel die zichtbaar is vanaf een punt op de grond. Een SVF van 1 betekent dat men zich in een open veld bevindt waar het ganse firmament te zien is. In stedelijke omgeving, blokkeren gebouwen vaak het zicht, waardoor een deel van het firmament niet zichtbaar is. 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 Figuur 6). Op basis van deze grootheid werd trouwens aan het begin van dit projectverslag een inschatting gemaakt van het maximale UHI effect voor Tilburg.



Figuur 6 : Illustratie van bepaling van SVF met zogeheten fish-eye lenzen. Bron : (Chapman & Thornes, 2004)

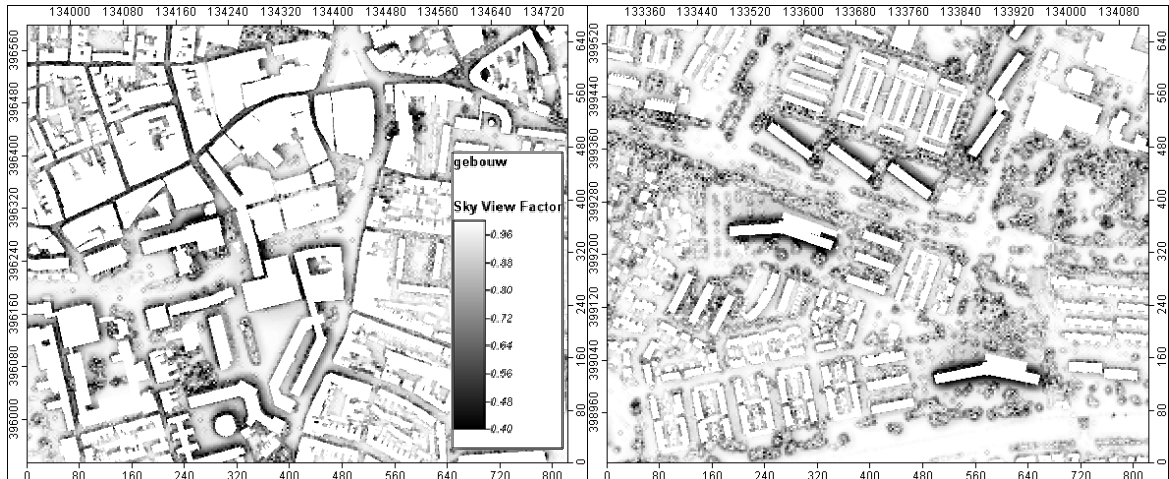
Tussen de aangereikte GIS data bevond zich een extract uit het algemeen hoogte bestand voor Nederland. Het betrof hier echter ruwe X,Y,Z meetpunten, met genoeg detail om individuele gebouwen in Tilburg te onderscheiden. In wat volgt zullen we sky view factoren afleiden op basis van deze dataset. In een eerste stap dienden we deze data om te vormen tot een bruikbaar formaat. De gevolgde procedure hiervoor is in appendix A opgenomen. We dienen op te merken dat er in het westen van Tilburg minder datapunten beschikbaar zijn, waardoor nogal wat ontbrekende waarden optreden. Dit heeft uiteraard een invloed op de kwaliteit van het 3D model voor de westelijke wijken (buurt rond het Reeshof). Figuur 7 toont enkele uitvergrotingen van het resulterende 3D model voor Tilburg. We hebben de gebouwen shapefile over de hoogtekaart afgebeeld om de kwaliteit van de geolokalisatie te kunnen vast stellen. Deze wordt als voldoende geacht. We merken verder ook op dat de overgrote meerderheid van de gebouwen in de shapefile effectief overeenkomen met verhogingen in het hoogtebestand. Daar de beschikbare gebouwen shapefile slechts twee – dimensionale polygonen bevat, is uiteraard niet alle verticale detail in in de contouren vervat. In de hoogtekaart komt dit detail echter wel goed tot uiting.

Verder stellen we ook vast dat niet alle gebouwen in de shapefile voorkomen en dat anderzijds de ruimtelijke resolutie van de hoogtekkaart niet overal voldoende hoog is om alle gebouwen te kunnen onderscheiden.



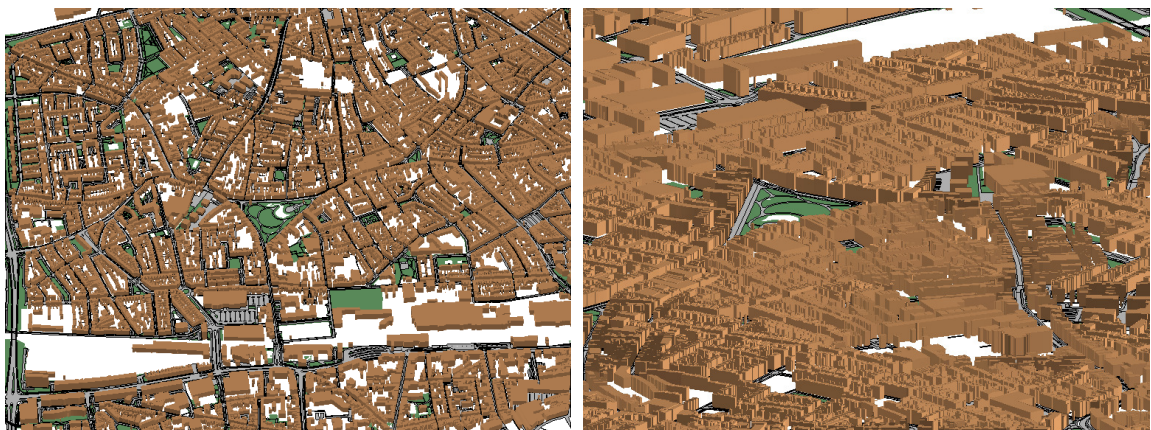
Figuur 7 : Enkele gedetailleerde afbeeldingen van het gereconstrueerde AHN hoogte bestand op 3 m resolutie voor Tilburg samen met de ter beschikking gestelde GIS data met gebouwen contouren. Links bovenaan zien we het station met het Wilhelmina park, rechts boven een detail hiervan, links onder zien we het Industrieterrein – Oost. Rechts onder het administratieve centrum van Tilburg rond het Koningsplein.

Op basis van het gereconstrueerde hoogte bestand kunnen we nu de SVF afleiden. Dit gebeurde aan de hand van het Sky View Factor algoritme dat in het SAGA – GIS pakket is geïmplementeerd (<http://www.saga-gis.org>). Figuur 8 toont duidelijk de sterk lagere SVF naast hoge bebouwing en in smalle straten. Het is echter ook onmiddellijk duidelijk dat er naast de effecten van gebouwen ook duidelijk effecten van vegetatie optreden. De SVF geeft met andere woorden ook een beeld van de schaduw veroorzaakt door de vegetatie. Het is ons echter niet bekend wanneer deze hoogte metingen exact genomen zijn, zodat het moeilijk is iets te zeggen rond de kruindichtheid. Om puur het effect van de stedelijke geometrie te isoleren lijkt het ons dus aangewezen om enkel het effect van de bebouwing mee te nemen in deze analyse en zodoende de SVF data afgebeeld in Figuur 8 wat verder te bewerken en op te kuisen. We kunnen hiermee dan ook gedeeltelijk een 3D model voor de westelijke wijken reconstrueren ondanks de beperktere sampling in de ruwe AHN data.



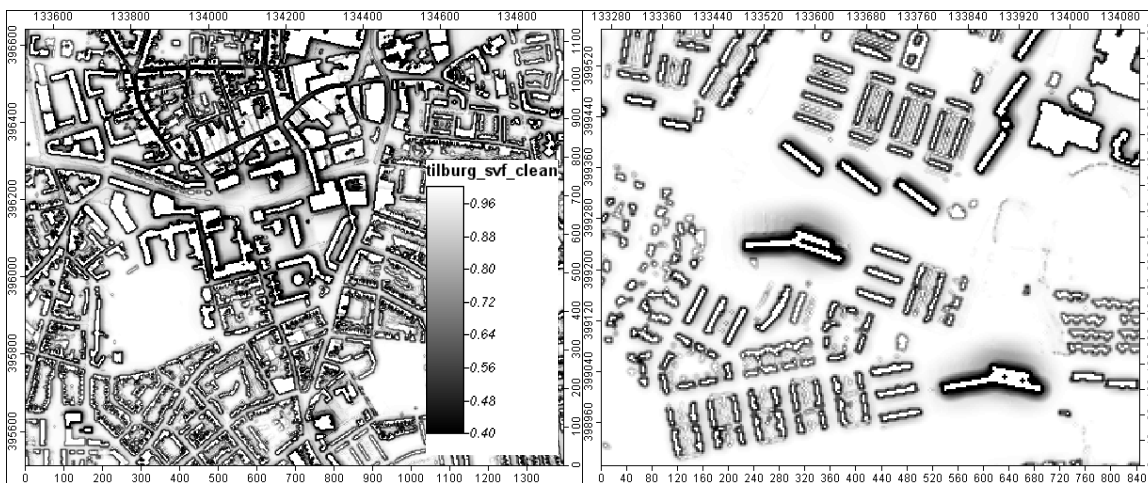
Figuur 8: Enkele voorbeelden van de afgeleide sky view factoren voor Tilburg. De gebouwen (zoals die door de GIS data zijn aangeleverd) zijn uitgewist om duidelijk de SVF in de streetcanyons te laten zien. Links is het administratieve centrum van Tilburg afgebeeld en rechts een stuk van de Lijnse hoek.

Deze verdere bewerking bestaat erin dat we aan de hand van de ons aangereikte shapefiles voor de gebouwen en de verharde oppervlakken (straatniveau) hoogtes uit de AHN data afleiden. Op die manier wissen we effectief de vegetatie uit de straten en parken. Voor de gebouwen bepalen we de maximale AHN hoogte binnen de contouren van de gebouwen-polygonen. We nemen het maximum daar dit de hoogte is welke de zon zal afschermen. Voor de verharde oppervlakken (straten en voetpad) nemen we de minimale AHN hoogte en kennen die toe aan de polygonen in de shapefile die de verharde oppervlakken beschrijft. Door het minimum te nemen beperken we de invloed van eventueel geparkeerde auto's in de straat tijdens de AHN dataname en uiteraard de effecten van vegetatie. Een leuk neveneffect van deze bewerkingen is dat we zodoende beschikken over een gevectoriseerde 3D dataset voor de gebouwen van tilburg. Enkele grafische voorstellingen hiervan voor de wijken ten noorden van het administratieve centrum zijn weergegeven in de figuur hieronder.



Figuur 9 : Grafische voorstelling van het op basis van de ruwe AHN afgeleide hoogtebestand voor Tilburg.

De resulterende sky view factor die zodoende berekend is in Figuur 10 afgebeeld.



Figuur 10 : Opgekuiste versie van de sky view factor voor Tilburg. De voorbeeld regio's stemmen overeen met wijken uit Figuur 8.

We kunnen nu bepalen wat een representatieve sky view factor is op het subwijkeniveau, waarmee we ook de gemodelleerde luchttemperaturen kunnen verklaren. We bepalen hiervoor de mediaan van de sky view factor per subwijk. Deze kaart is weergegeven in Figuur 11 onder.

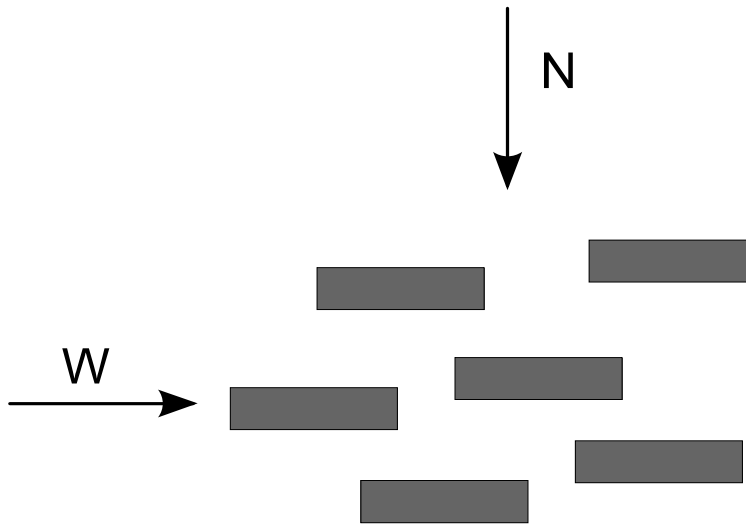


Figuur 11 : Sky View Factor op subwijkniveau voor Tilburg. De afgebeelde waarde is de mediaan van de sky view factor berekend a.d.h.v. het 3D model op 3m resolutie voor Tilburg. We dienen hier op te merken dat de afleiding van de SVF voor de westelijke wijken (Reeshof) minder betrouwbaar is t.g.v. de kwaliteit van de ruwe AHN data.

Gemiddeld gesproken vinden we voor het administratieve centrum van Tilburg een SVF van ongeveer 0.80 – 0.85. Al bij al geeft dit aan dat er in Tilburg niet echt extreme streetcanyons aanwezig zijn. We zien dat de laagste sky view factor pal in het centrum tot 0.65 bedraagt, want niet verwonderlijk is gezien de smalle steegjes in de wijk ten noorden van het stadhuisplein. Ten noorden van het station merken we in verhouding ook een relatief lage sky view factor (0.72) in de wijk rond de Kasteeldreef en de Bukskinstraat, ten gevolge van een duidelijk street canyon effect. En in de wijk tussen de Wagenaarstraat en de Van Goorstraat. Ten zuiden merken we duidelijk een verlaagde sky view factor in de Korvelwijk (~0.73).

2.2.2. FRONTAL AREA DENSITY

Een tweede belangrijke morfologische parameter heeft te maken de windsnelheid. Zoals hoger aangegeven is het zo dat in stedelijke omgeving de windsnelheid lager ligt door het afremmende effect van de gebouwen. Een eenvoudige parameter om dit in te schatten is de zogeheten *frontal area density*. Deze parameter drukt namelijk als functie van de windrichting uit wat het totale “geprojecteerde oppervlak” is waartegen de wind “aanwaait”, relatief t.o.v. de horizontale oppervlakte van het beschouwde terrein. De figuur hieronder illustreert dit.



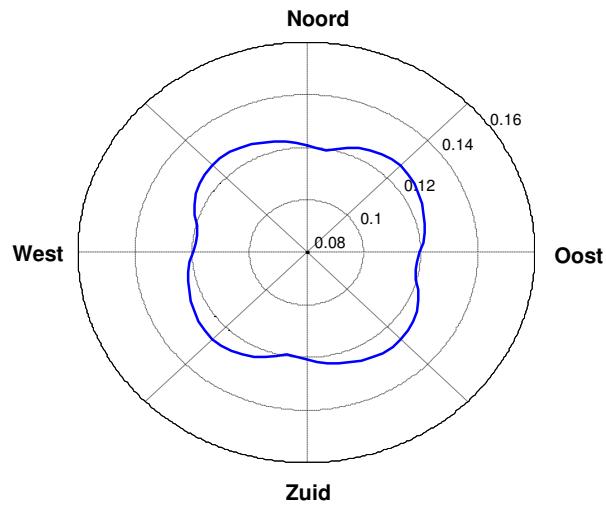
Figuur 12 : Eenvoudige schets ter illustratie van de front area index.

Stel dat de wind in Figuur 12 vanuit het Noorden waait, dan zal die veel meer afgeremd worden dan wanneer de wind uit het Westen waait. De wind “ziet” namelijk een groter oppervlak aan obstakels. De schets laat dus m.a.w. duidelijk zien dat de totale geprojecteerde oppervlakte van gebouwen loodrecht op de windrichting een maat is hoe sterk het windveld wordt afgeremd. De front area density wordt gedefiniëerd als zijnde de verhouding van het geprojecteerde oppervlak van de gebouwen loodrecht op de windrichting met de totale oppervlakte van het beschouwde gebied :

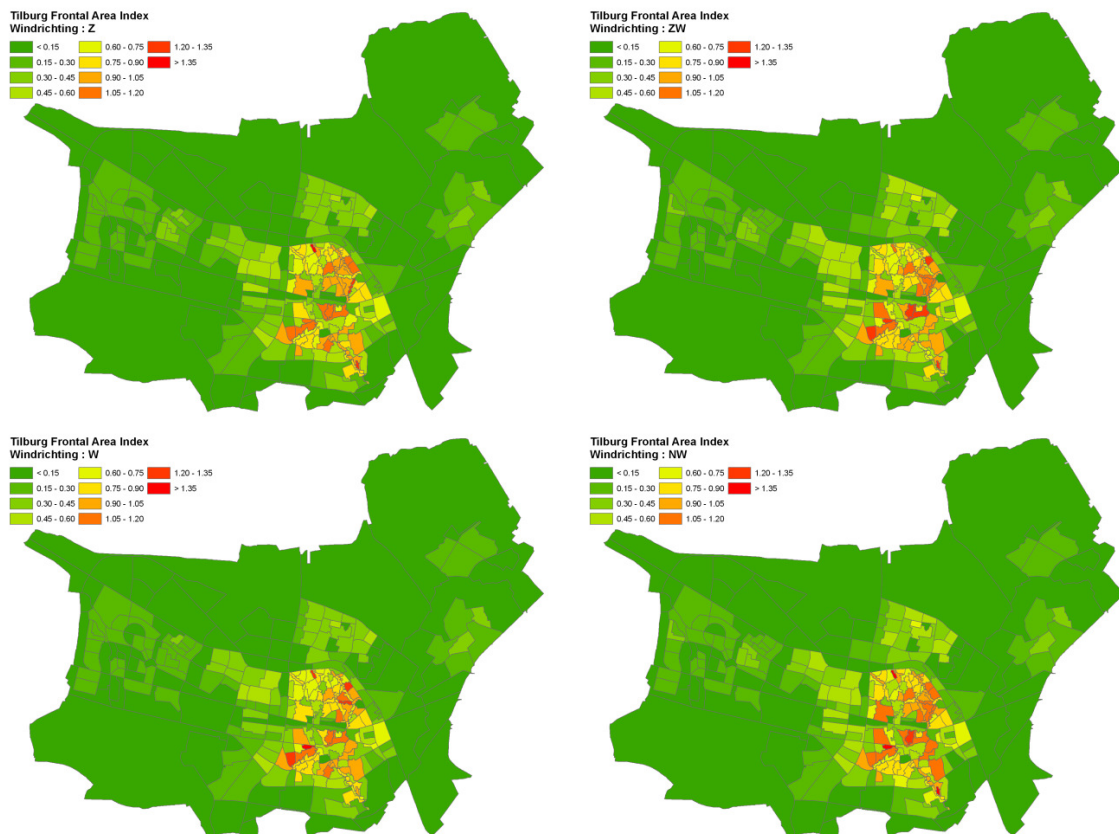
$$\lambda_f = \frac{\sum \text{Frontaal oppervlak van de gebouwen}}{\text{Totaal oppervlak van het gebied}}$$

Op basis van deze index λ_f geven ondermeer (Ratti et al., 2002) aan hoe de zgn. aerodynamische ruwheidslengte kan worden geparаметriseerd, welke het windsnelheidsprofiel in de stedelijke omgeving bepaalt. Dit is op zich weer van belang is voor het bepalen van de ventilatie. Hier zullen we ons beperken tot de FAD op zich als verklarende variabele.

Een interessante oefening in deze is de analyse of er zich in Tilburg een bepaalde preferentiële windrichting voordoet waarvoor de ventilatie het grootst is. Is er met andere woorden een bepaalde windrichting waarvoor het windveld het minst wordt afgeremd ? Figuur 13 toont de gemiddelde frontal area density als functie van de windrichting voor gans Tilburg. Op zich is er weldegelijk een directioneel effect aanwezig, zij het heel klein. We vinden een maximum in de frontal area density bij wind vanuit zuid-westelijke richting. Dit houdt in dat wind komende vanuit het zuid-westen iets meer zal worden afgeremd dan bvb vanuit puur Westelijke richting. Maar nogmaals, dit effect is bijzonder klein. Uiteraard is dit effect in typisch Europese steden over het algemeen erg klein door de willekeurige oriëntatie van de gebouwen. Voor typische Amerikaanse steden echter kan dit effect door het regelmatig rechthoek bouwpatroon veel groter zijn, waardoor men daadwerkelijk preferentiële ventilatie richtingen kan krijgen.



Figuur 13 : Frontal area density voor gans Tilburg als functie van de windrichting.



Figuur 14 : Front Area Index voor Tilburg boven links voor wind komende van uit het Zuiden, rechtsboven het Zuid-Westen, links onder het Westen en rechts onder het Noord-Westen. De kaarten zijn identiek voor respectievelijk Noorden, Noord-Oosten, Oosten en Zuid-Oosten.

In Figuur 14 zien we nu de Frontal Area density op subwijk niveau voor Tilburg afgebeeld. We merken zoals reeds opgemerkt een relatief gelijkaardig patroon tussen de verschillen de subwijken. Dit geeft aan dat we weinig verschil verwachten tussen de verschillende windrichtingen voor de hittevorming in Tilburg. Enkele wijken zoals het historisch centrum, de Korvel wijk en de wijk tussen de Wagenaar en de Vangoor straat in het Noordoosten van Tilburg lijken een iets hogere λ_f te kennen voor wind uit het ZW.

Voor de analyse van de impactfactoren in wat volgt nemen we de density voor de dominante windrichting, nl. het ZW (zie ook de KNMI klimatologische grafieken uit Figuur 28).

2.3. ALBEDO

Zoals hoger reeds een aantal keer vermeld, speelt de albedo een belangrijke rol in het reguleren van de energie balans in een stad. In mediterrane gebieden zal men typisch gebouwen wit verven om zoveel mogelijk zonlicht te weerkaatsten. Dit zorgt ervoor dat er minder warmte wordt opgeslagen in de muren, waardoor die koeler blijven. In deze studie zijn wij echter van oordeel dat er geen voldoende informatie beschikbaar is op lokaal niveau om een betrouwbare gevoeligheidsstudie rond albedo te kunnen doen. Merk op dat we voor de UHI modellering we echter wel de albedo in rekening brengen, maar dan gebaseerd op een parametrisatie op basis van een landgebruiksdataset.

Het dient verder gezegd dat het wit verven van huizen niet over de hele lijn een positieve impact heeft op de hittestress. Bij hoge albedo wordt immers veel zonlicht weerkaatst en wanneer dit aan gevels gebeurt kan dit aanleiding geven tot een verhoogde instraling in de streetcanyon, waardoor het discomfort van personen in de straat sterk kan toenemen. Gezien wij over te weinig gedetailleerde informatie beschikken t.a.v. de coatings van huizen, zullen we hier in deze studie verder geen uitspraak over doen.

In twee volgende hoofdstukken zullen we de stralingstemperatuur aan het oppervlak (Land Surface Temperature) afleiden van satelliet informatie op hoge resolutie en zullen we een modelmatige inschatting van het gemiddeld en maximaal stedelijk warmte eiland effect voor Tilburg doen. We kunnen stellen dat de stralingstemperatuur een representatief is voor de hittestress overdag, terwijl het kaartmateriaal met het stedelijk warmte eiland effect eerder aangeeft welke hinder de bevolking 's avonds en 's nachts zal ondervinden tijdens hittegolven. Daarna zullen we op basis van een regressie analyse met de in dit hoofdstuk afgeleide verklarende factoren een score tabel voor maatregelen opstellen.

HOOFDSTUK 3. AFLEIDING STRALINGSTEMPERATUUR AAN DE HAND VAN SATELLIET GEGEVENS

In dit hoofdstuk bespreken we het opstellen van een hoge resolutie oppervlakte temperatuurskaart (Land Surface Temperature of LST) voor Tilburg. Deze kaart is van belang voor het inschatten van de hittestress overdag, gezien het hier effectief gaat om de stralingstemperatuur die aangeeft hoe sterk oppervlakken opwarmen. We zullen deze gegevens ook dienen te gebruiken ter downscaling van de resultaten van het VITO stedelijk klimaat model in volgend hoofdstuk.

Voor het opstellen van de oppervlaktetemperatuurskaart maken we gebruik van de (Enhanced) Thematic Mapper (TM/ETM+) aan boord de verschillende Landsat⁷ satellieten (Landsat 5 en 7 respectievelijk). Via de USGS Global Visualization Viewer⁸ is de ruwe Landsat data makkelijk te selecteren en te downloaden. We dienen hier echter op te merken dat het om ruwe data gaat (8-bit ADC counts), die dus nog dient gecalibreerd te worden en gecorrigeerd voor atmosferische effecten.

Onderstaande Tabel 3 geeft een overzicht van de beschikbare LandsAT data. We merken dus dat er over een periode van meerdere jaren slechts enkele bruikbare opnames in de tabel aanwezig zijn.

<i>Scene</i>	<i>Instr.</i>	<i>Datum</i>	<i>Tijd</i>	<i>Transmissie</i>	R_{up} [$W.m^{-2}$, $s^{-1}.\mu m^{-1}$]	R_{down} [$W.m^{-2}$, $s^{-1}.\mu m^{-1}$]
LE71980242002091EDC01	ETM+	01/04/02	10:22	0.82	1.18	1.95
LE71980242002267EDC00	ETM+	24/09/02	10:21	0.89	0.72	1.22
LE71980242003222EDC01	ETM+	10/08/03	10:22	0.73	2.23	3.51
LE71980242005147ASN00	ETM+	27/05/05	10:23	0.67	2.55	4.05
LE71980242005195ASN00	ETM+	14/07/05	10:23	0.69	2.38	3.78
LE71980242006182ASN00	ETM+	01/07/06	10:23	0.74	2.06	3.30
LE71980242006198ASN00	ETM+	17/07/06	10:23	0.78	1.79	2.90
LE71980242007217ASN00	ETM+	05/08/07	10:24	0.80	1.64	2.66
LE71980242009270ASN00	ETM+	27/09/09	10:24	0.80	1.43	2.32
LE71980242010113ASN00	ETM+	23/04/10	10:26	0.91	0.54	0.93
LE71980242011100ASN00	ETM+	10/04/11	10:27	0.87	1.91	1.52
LT51980242003262MTI01	TM	19/09/03	10:11	0.71	2.25	3.52
LT51980242010249MOR00	TM	06/09/10	10:24	0.83	1.22	2.00
LT51980242010265MOR00	TM	22/09/10	10:24	0.81	1.43	2.33

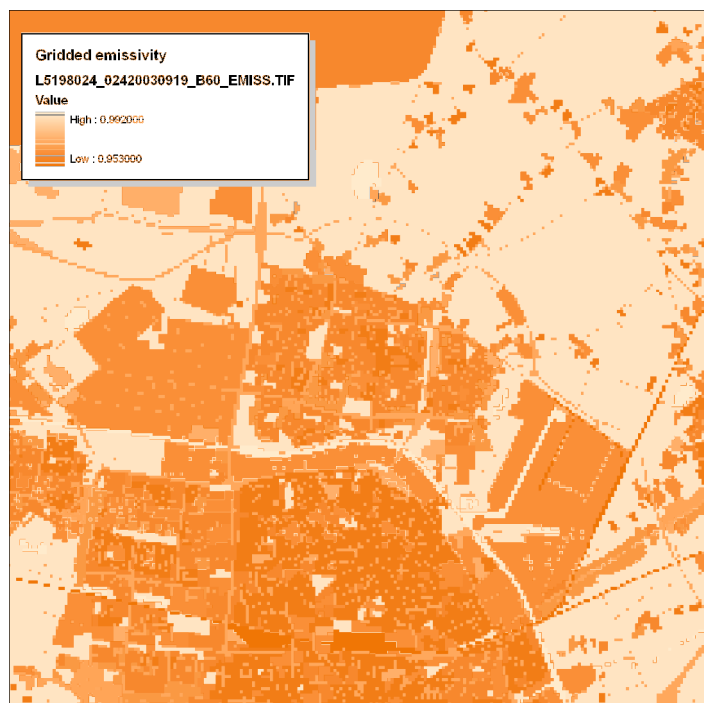
Tabel 3 : Overzicht van de gedownloadede Landsat scenes met opname tijd (UTC) en atmosferische correctie parameters.

⁷ <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

⁸ <http://glovis.usgs.gov/>

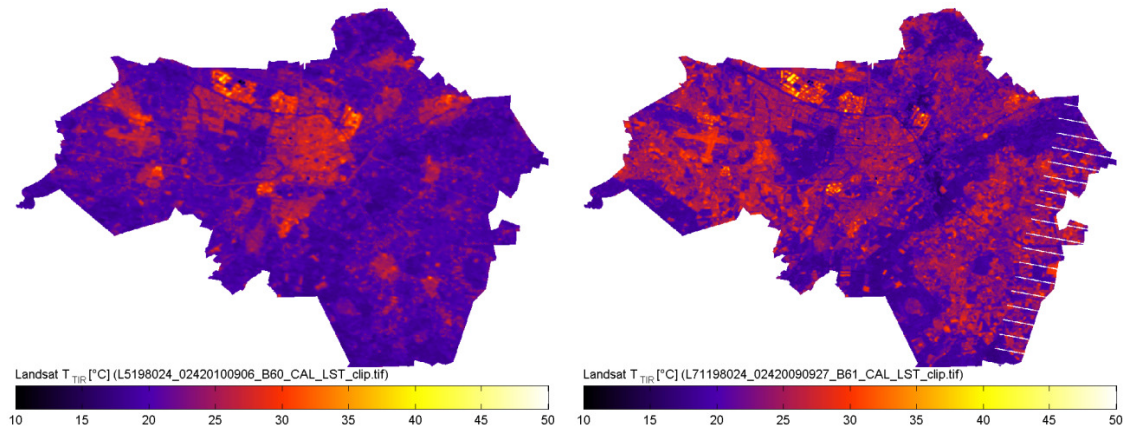
Verder zien we ook dat de acquisitie tijd telkenmale ron 10:30 UT ligt, wat enigszins spijtig is naar de downscaling van de modelresultaten toe daar het stedelijke warmte eiland effect eerder tijdens de late avond tot uiting komt.

Vooraleer we met deze data aan het werk kunnen dienen de beelden eerst gecorrigeerd te worden voor atmosferische effecten. Verder dienen we ook de emissiviteit van het stedelijk oppervlak in rekening te brengen voor de afleiding van de stralings temperatuur aan het oppervlak. De emissiviteit geeft aan in welke mate de uitgestraalde thermische energie van een lichaam bij een bepaalde temperatuur T afwijkt van die van een ideale zogeheten zwarte straler. Bepaalde materialen zoals metaal kennen immers een zeer lage emissiviteit, wat betekent dat bij dezelfde temperatuur, een metaal veel minder energie gaat uitstralen dan pakweg beton of gras. Deze verschillen in emissiviteit werden in de afleiding van de LST kaart ook in rekening gebracht op basis van een opzoektabel gebaseerd op de EEA Urban Atlas data. Een voorbeeld van de resulterende emissiviteit voor Tilburg is hieronder in weergegeven.



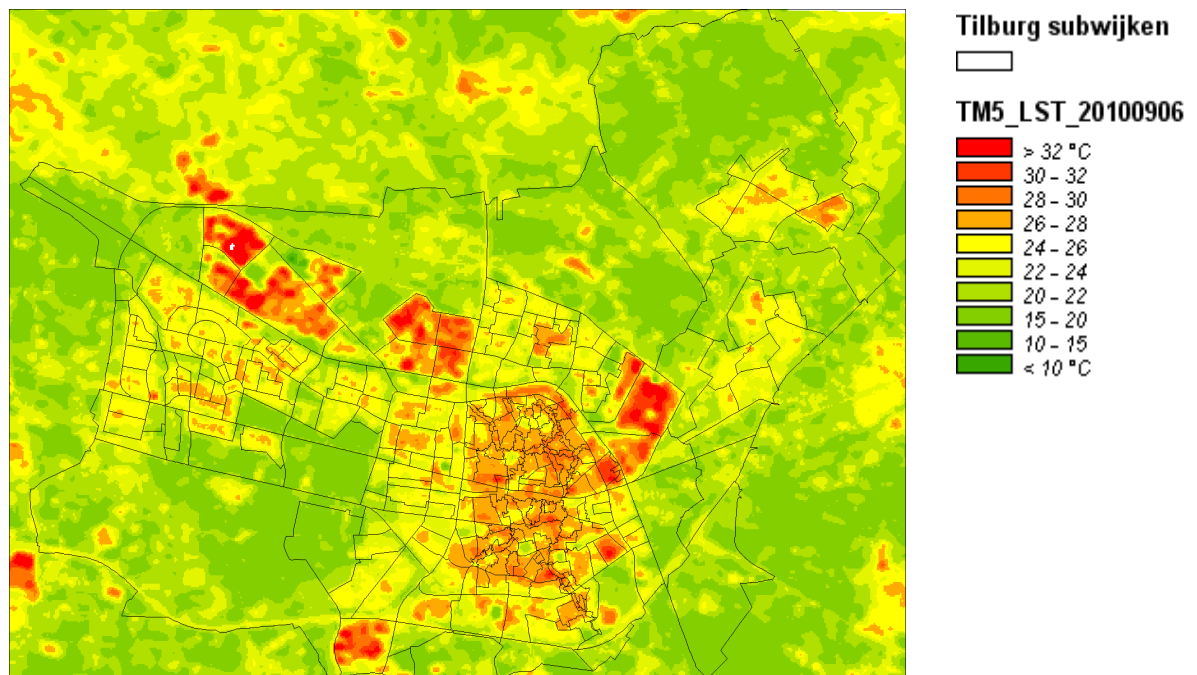
Figuur 15 : Voorbeeld van de resulterende emissiviteitskaart voor de afleiding van de oppervlakte stralingstemperatuurs kaart gebaseerd op de Landsat data.

We verwijzen de geïnteresseerde lezer naar **appendix D**, waar de afleiding van de LST oppervlakte temperatuurskaarten uitgebreid wetenschappelijk gedocumenteerd is. Figuur 16 hieronder toont enkele voorbeelden van afgeleide oppervlakte temperatuursbeelden. Een volledig archief is in **appendix C** opgenomen.

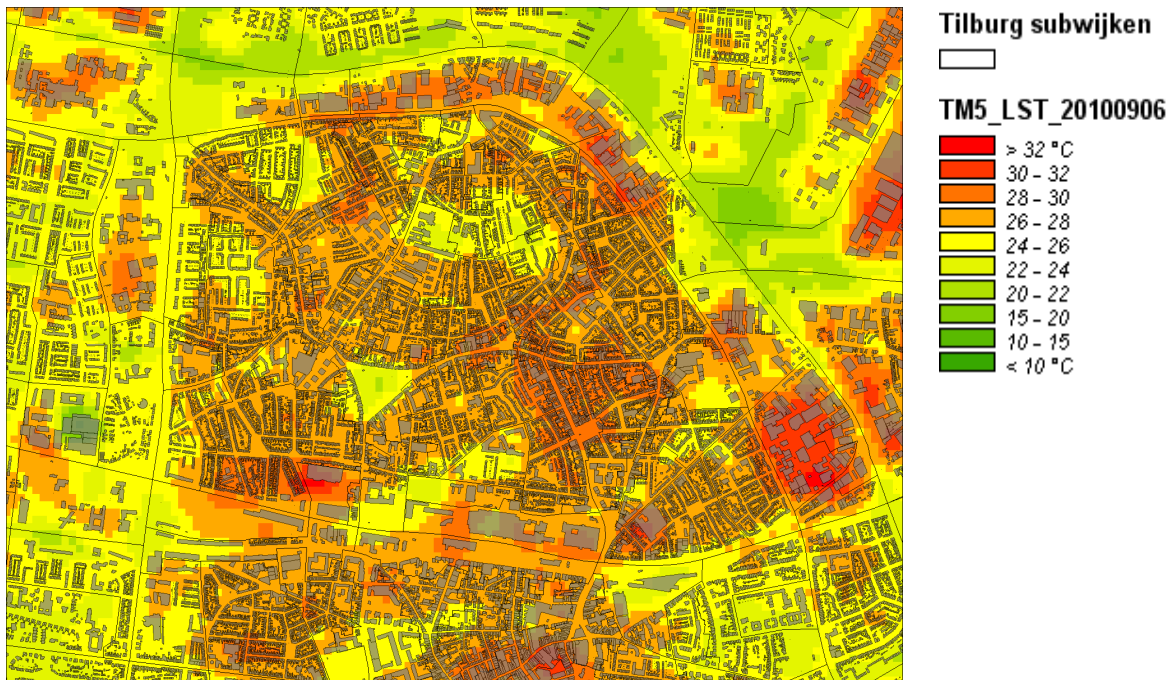


Figuur 16 : Voorbeeld van enkele resulterende Landsat LST beelden in °C (links: Landsat 5, 2010.09.06, rechts: Landsat 7, 2009.09.27)

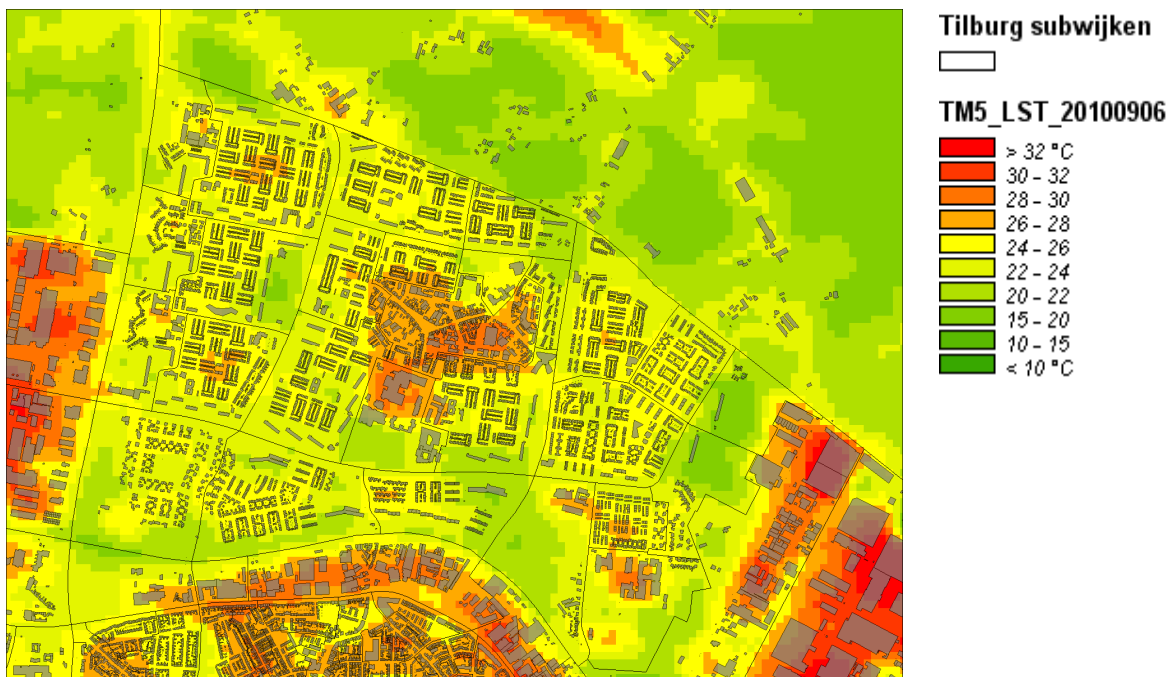
Hieronder geven we een aantal voorbeelden van de opname van 6 September 2010, de datum die het dichtst aanleunt bij de periode van de model runs. Dit beeld zullen we gebruiken voor de downscaling van de UHI model resultaten, de verdere regressie analyse in HOOFDSTUK 5 en identificatie van de hotspots overdag.



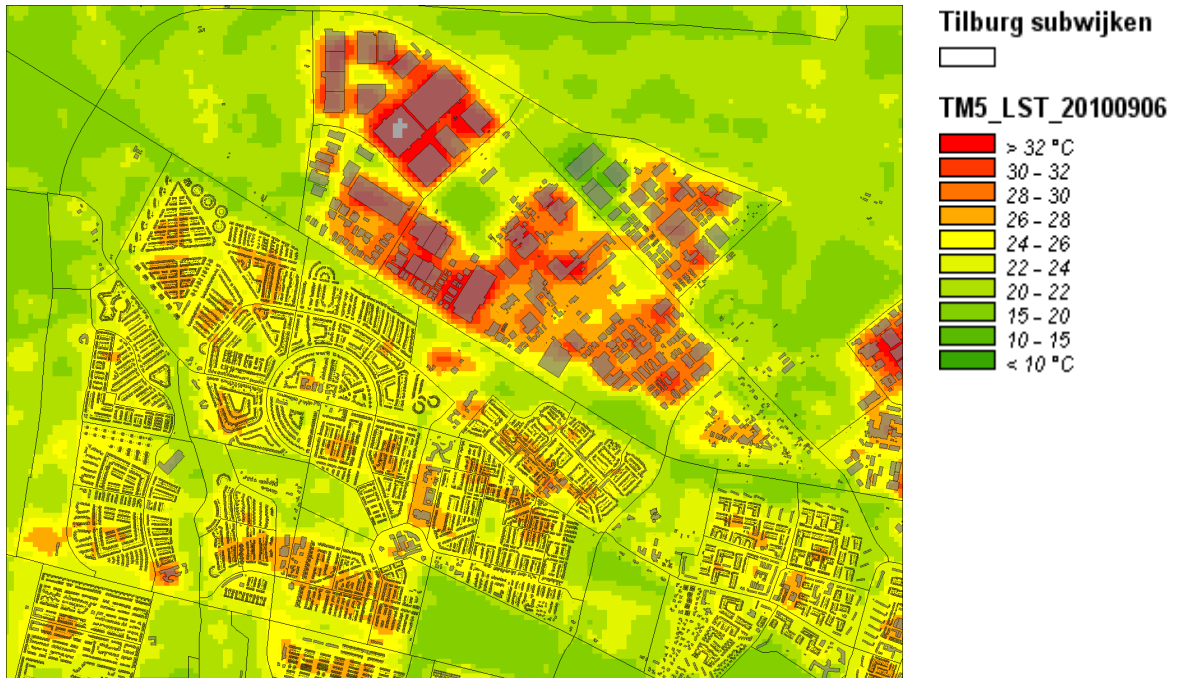
Figuur 17 : LandsAT5 TM oppervlakte temperatuursbeeld voor Tilburg op 06/09/2010 omstreeks 10:30 UTC.



Figuur 18 : Analoog als hierboven maar ditmaal ingezoomd op het administratieve centrum van Tilburg.



Figuur 19 : Idem, maar ditmaal de wijken ten noorden van Tilburg.



Figuur 20 : Idem, maar voor de Westelijke wijken in Tilburg.

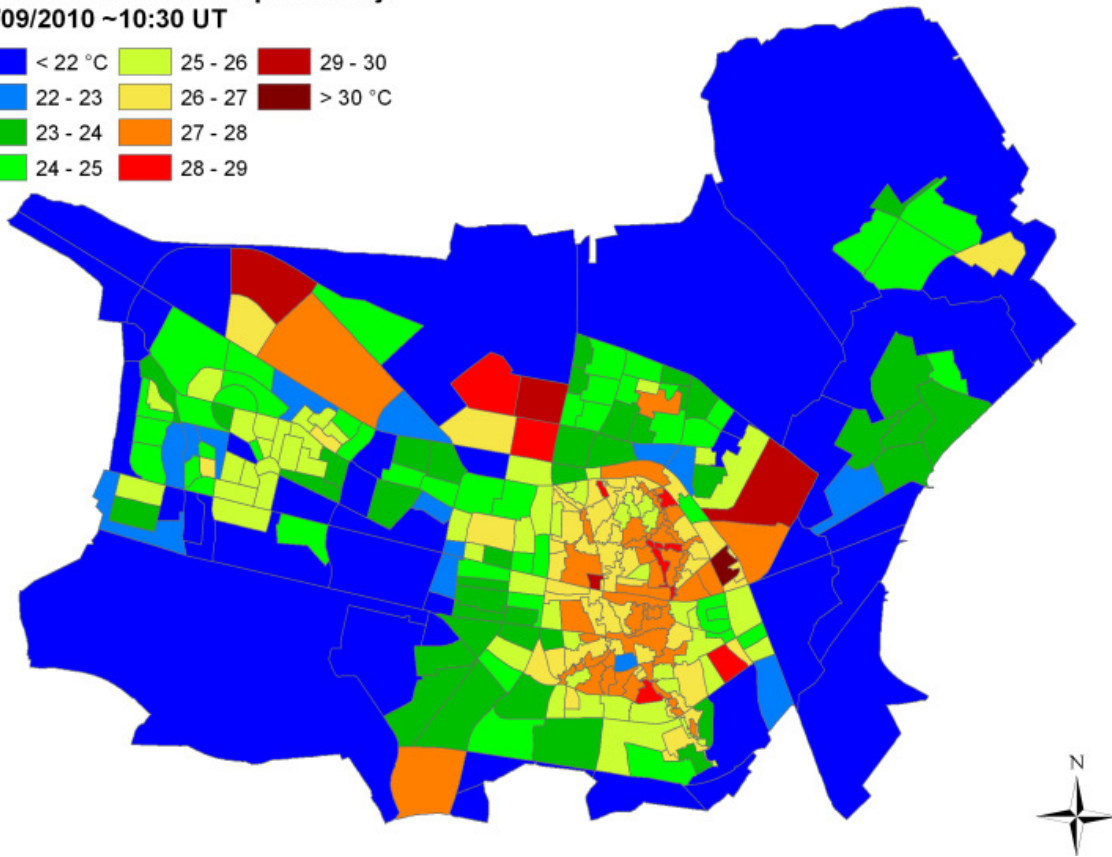
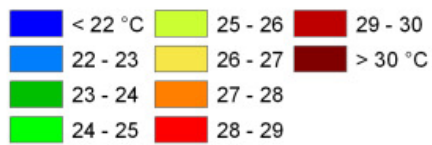


Figuur 21 : En tenslotte de zuidelijke wijken van Tilburg.

We merken hier in dit LandsAT beeld duidelijk de verhoogde stralingstemperaturen boven het centrum van Tilburg. We merken een effect van een kleine 10 °C in de stralingstemperatuur. Zoals op verschillende van de afbeeldingen te zien is lijken de industrieterreinen veel heter dan de andere gebieden. Industriegebouwen hebben typisch daken of roofings met een lage warmte capaciteit (e.g. golfplaten e.d.), welke vlug opwarmen door de zon. Vandaar dat in de LST beelden deze gebieden verschillende graden °C heter lijken dan de rest van de stad. Typische stadsparken

en vegetatie elementen kennen algauw een reductie in oppervlakte temperatuur van 4-6 °C. Figuur 22 hieronder geeft hetzelfde beeld op subwijkniveau.

**LandSAT mediaan LST per subwijk
06/09/2010 ~10:30 UT**



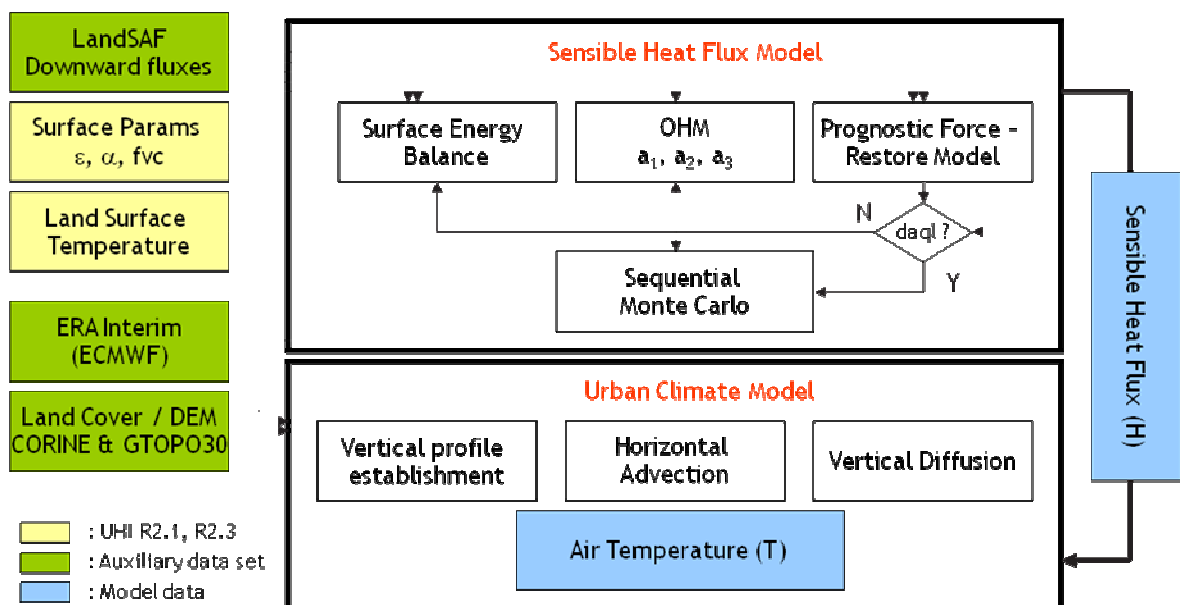
Figuur 22 : Uitgemiddelde (mediaan) oppervlakte temperatuur per subwijk voor het gebruikte landsat beeld van 06/09/2010.

Aan het eind van HOOFDSTUK 5 zullen we deze kaart, samen met de kaart van het stedelijk warmte eiland effect meer in detail bespreken in het licht van de verklarende factoren.

HOOFDSTUK 4. TECHNISCHE BESCHRIJVING OPSTELLEN LUCHTTEMPERATUURSKAART

Aan de hand van de oppervlakte temperatuurskaart kunnen we uitspraken doen over de hittestress ten gevolge van instraling overdag. Wanneer we echter een uitspraak willen doen over het de hittestress ten gevolge van het stedelijk warmte eiland effect, wat gezien het discours van §1.1 van groter belang is naar gezondheidseffecten toe. Om het zogeheten urban heat island effect voor Tilburg op een ruimtelijk expliciete manier te bepalen maken we gebruik van het VITO stedelijk klimaat model. Dit model werd in de schoot van het ESA – DUE Urban Heat Islands project ontwikkeld en relatief uitgebreid gevalideerd boven Parijs. Het model maakt gebruik van een tijdsreeks van oppervlakte temperatuursbeelden op 1 km ruimtelijke resolutie. Het spreekt vanzelf dat deze resolutie relatief grofschalig is voor de analyse van binnenstedelijke effecten. Er zal dus ook een downscaling dienen te gebeuren naar hogere ruimtelijke resolutie op dergelijke analyse goed te kunnen uitvoeren.

4.1. HET VITO URBAN CLIMATE MODEL (UCM)

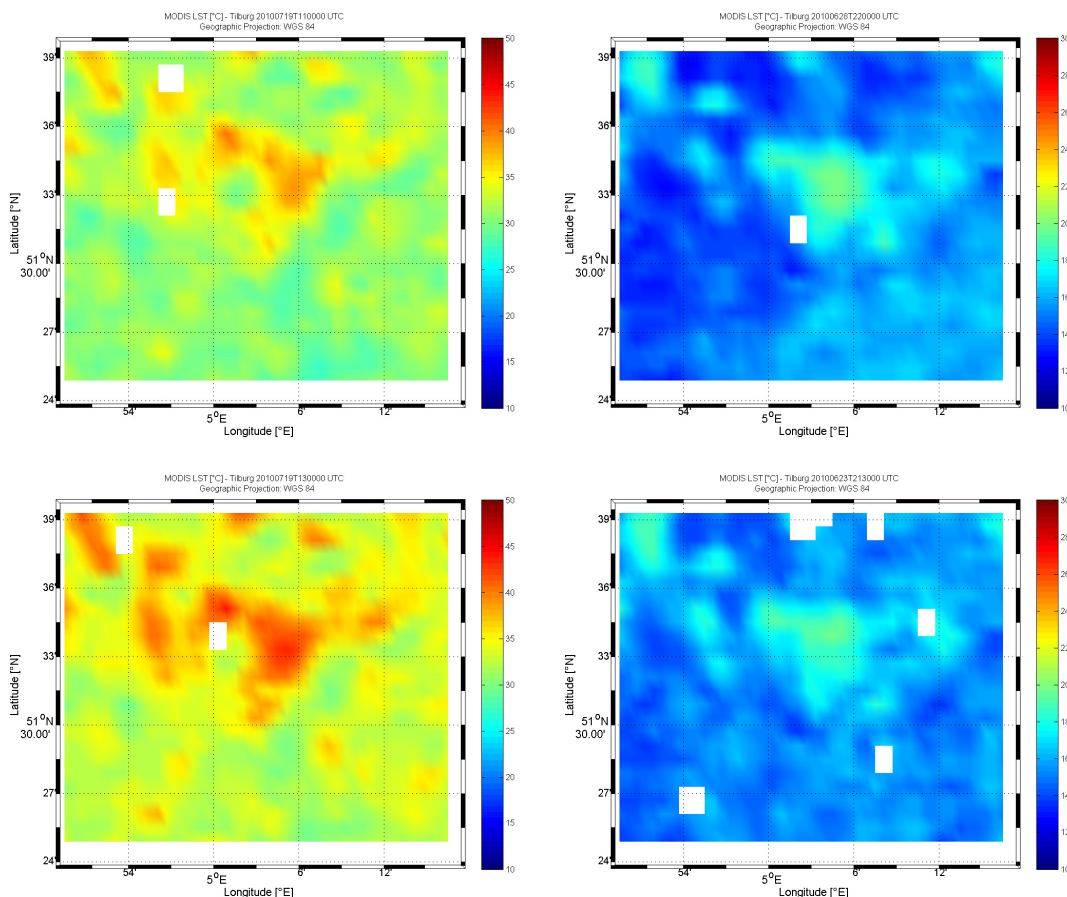


Figuur 23 : Schematische weergave van de verschillende componenten in het urban climate model (UCM) ontwikkeld door VITO.

Voor een gedetailleerde beschrijving van het stedelijk klimaatmodel maken we gebruik van het VITO urban climate model. Een technische beschrijving hiervan is te vinden in (Maiheu et al., 2010).

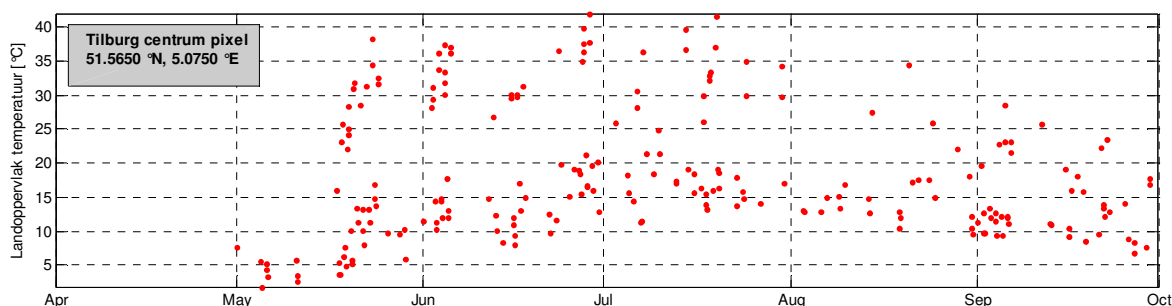
Onderstaande grafiek geeft schematisch weer welke de componenten aanwezig zijn in het model. Een eerste module gaat de turbulente warmteflux van het oppervlak naar de atmosfeer berekenen en heeft daarvoor informatie nodig over de neerwaartse stralingsfluxen, de oppervlakte temperatuur en andere karakteristieken van het oppervlak, met name de emissiviteit, albedo en vegetatiebedekking. Op basis van de resulterende stedelijke warmtefluxen, zal een atmosferische dispersiemodule het effect van atmosferische stabiliteit, windsnelheid én richting op de verspreiding van de warmte in de atmosfeer berekenen. Deze module maakt gebruik van grootschalige meteorologische randvoorwaarden en terrein informatie.

De gebruikte databronnen voor het opstellen van de modelberekeningen zijn uitgebreid beschreven in **appendix E**. Wat dit model uniek maakt is het feit dat het gebruik maakt van satelliet gebaseerde opnames van oppervlakte temperatuur op 1 km. Deze data worden in het model gebruik in een data assimilatie schema. We gebruiken met andere woorden remote sensing observaties ter verbetering van de intrinsieke model berekeningen van de stedelijke luchttemperatuur. Enkele voorbeelden van die oppervlakte temperaturen zijn opgenomen in Figuur 24.



Figuur 24 : Enkele voorbeelden van 1 km MODIS LST data voor Tilburg. We zien telkens in de links een beeld overdag en rechts een beeld 's nachts. Bovenaan zien we de opname voor 19/7/2010 - ~11:00 UTC links en rechts 28/6/2010 - ~22:00 UTC, onderaan links 19/7/2010 - ~13:00, rechts 23/6/2010 ~21:30 UTC. Dit lege pixels zijn ontbrekende waarden in de data.

Voor deze studie maakte we enkele gebruik van de vrij beschikbare oppervlakte temperatuursdata, afkomstig zijn van het MODIS instrument, aanboord van de NASA satellieten EOS-TERRA en EOS-AQUA. Figuur 25 geeft een voorbeeld van de beschikbaarheid van goede opnames gedurende het beschouwde zomerseizoen van 2010. We bekijken een pixel in het centrum van Tilburg.

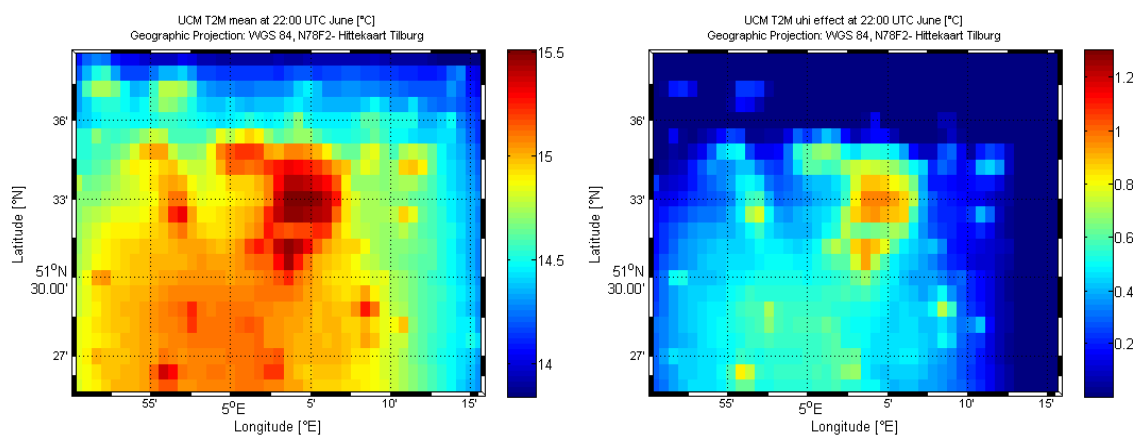


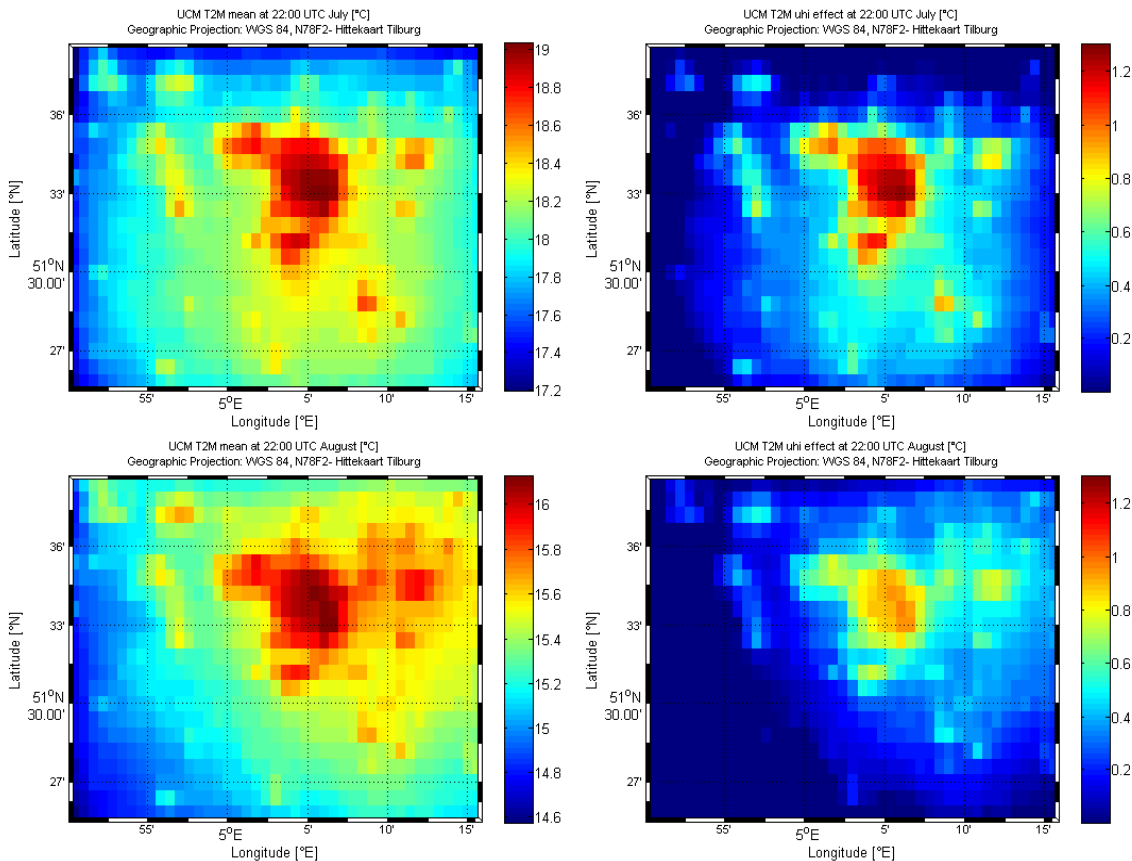
Figuur 25 : Tijdsreeks van MODIS LST voor een 1 km pixel over het centrum van Tilburg (51.565 °N, 5.0750°E). Elk datapunt in rood afgebeeld stelt een goede LST observatie voor de 1 km pixel boven het centrum van Tilburg.

4.2. RESULTATEN RUWE URBAN CLIMATE MODEL BEREKENINGEN

4.2.1. BESPREKING RESULTATEN LUCHTTEMPERATUUR OP 1 KM

Hier zullen we de resultaten van de lage resolutie modellering voorstellen en bespreken. Zoals afgesproken hebben we de zomer periode van 2010 doorgerekend en zullen we nagaan op welke plaatsen in Tilburg de hoogste luchttemperaturen gesimuleerd worden, deze analyse zal resulteren in een hittekaart op 1 km, welke we nadien zullen verfijnen aan de hand van hoge resolutie Landsat data. We dienen hier reeds op te merken dat met het oog op hitte risico de temperaturen in de late avond de meest belangrijkste zijn. Dit is wanneer het stedelijke hitte eiland effect het sterkst aanwezig is.



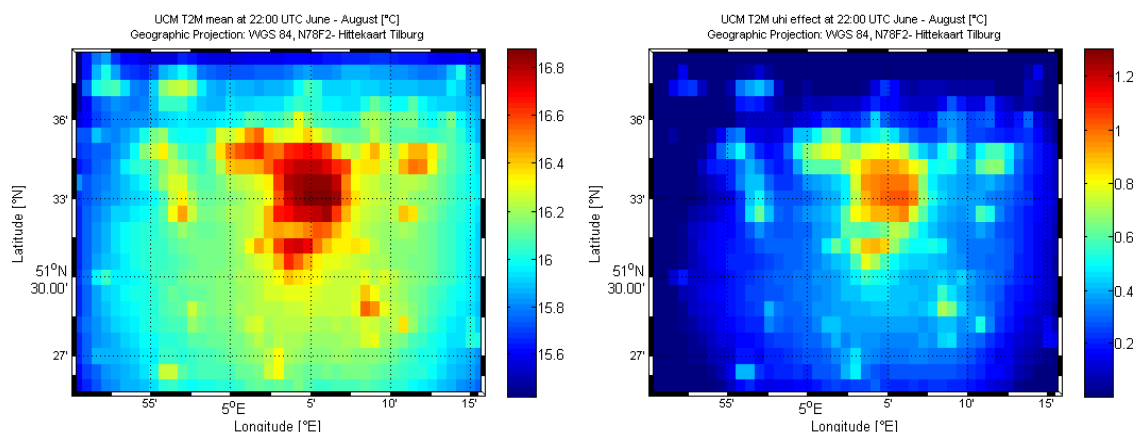


Figuur 26 : Maandgemiddelden van de luchttemperatuur op 1 km zoals berekend door het VITO UCM om 22:00 UTC 's avonds voor Juni (boven), Juli (midden) tot Augustus(onder). Links is telkens de gemiddelde luchttemperatuur weergegeven om 22:00 UTC 's avonds, rechts dezelfde grafiek, maar verminderd met de gemiddelde temperatuur over het domein (en afgekapt op 0).

In Figuur 26 hierboven hebben we de maandgemiddelde temperaturen om 22:00 UTC (0:00 CEST), afgebeeld voor Juni, Juli en Augustus. We merken eerst en vooral op dat in de late avond de luchttemperatuur in het stedelijk gebied hoger is dan in het omringende domein. Dit wordt expliciet duidelijk wanneer we naar de figuren in de rechterkolom van Figuur 26 kijken. Hier hebben we opnieuw de maandgemiddelde luchttemperatuur om 22:00 UTC geplot, maar ditmaal verminderd met het domein gemiddelde. Op die manier krijgen we een ruwe inschatting van het UHI effect per maand. We zien hier al duidelijk dat in de maand Juli voor 2010 dit meest uitgesproken was. We zien een gemiddeld effect van ~ 1.2 °C in het centrum van de stad. Voor de maanden Juni en Augustus 2010 zien we dat het UCM dit effect iets hoog inschat, orde ~ 0.8 °C.

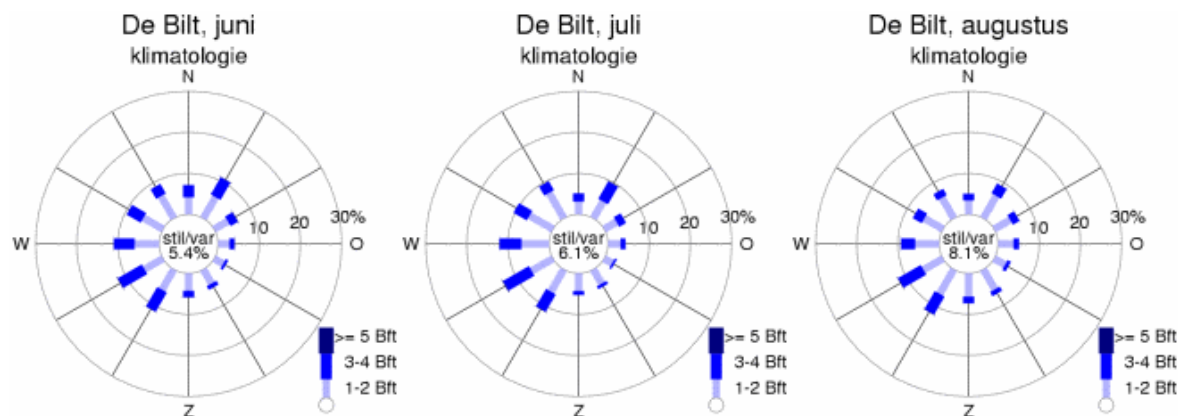
Wat interessant is, is de vergelijking met de windrozen van Figuur 62. We merken duidelijk dat in functie van de overheersende windrichting tijdens de beschouwde period er sprake is van een zgn. "urban plume". Een stedelijke pluim waarbij warmere stedelijke lucht windafwaarts getransporteerd wordt, waardoor het buiten stedelijk gebied ook een hogere temperatuur kent.

Het gemiddelde voor de periode Juni – Augustus hebben we hieronder afgebeeld.



Figuur 27 : Analoog als voor Figuur 26, ditmaal gemiddeld over de period Juni – Augustus 2010.

Voor het inschatten van de risico's verbonden met het stedelijk warmte eiland achten we de kaart in Figuur 27 hierboven het meest relevant. Op zich kunnen we ook stellen dat de beperkte periode van 3 maanden die we beschouwen qua windrichting representatief toch in zekere mate representatief kan genoemd worden voor de klimatologische situatie met overheersende ZW-winden. Ter vergelijking beelden we in Figuur 28 onderaan de klimatologische windrozen van het KNMI af.



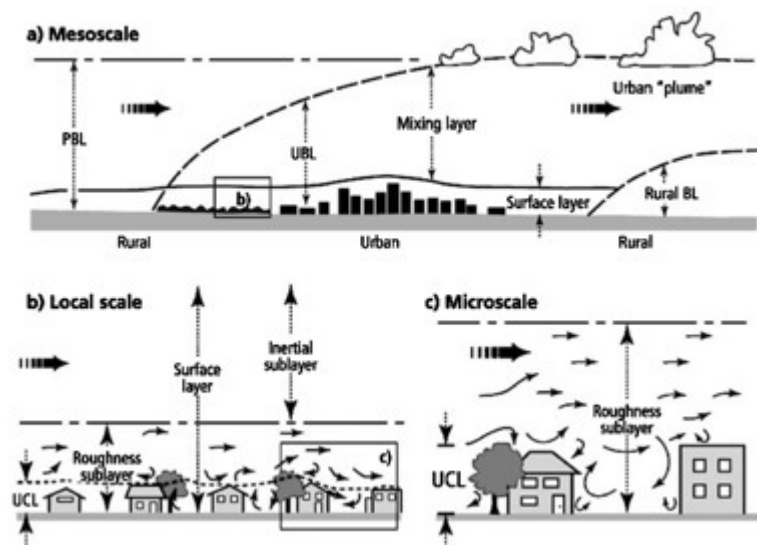
Figuur 28 : Klimatologische windrozen voor de KNMI meteo mast in De Bilt voor Juni, Juli en Augustus. Bron: <http://www.knmi.nl/kd/windrozen/index.cgi>

We merken dus inderdaad dat de uitgesproken WZW richting in Juli, ZW in augustus en een iets grotere component in verhouding vanuit het Noorden voor Juni zoals we die vinden voor de zomer van 2010 (zie Figuur 62) in de ECMWF data overeenstemt met de klimatologische situatie voor Nederland.

Vooraleer we de kaart uit Figuur 27 met de stedelijke luchttemperatuur gaan downscalen naar een hogere resolutie willen we eerst een kwaliteitscontrole op deze modellering doorvoeren.

4.2.2. KWALITEITSCONTROLLER STEDELIJKE LUCHTTEMPERATUUR OP 1 KM

We dienen hier duidelijk te stellen dat de validatie van de UCM resultaten een moeilijk gegeven is. Er zijn eerst en vooral reeds weinig tot geen temperatuursmetingen beschikbaar in het binnenstedelijk gebied (en errond), en ten tweede is er altijd het punt van de ruimtelijke representativiteit. Voor stedelijke luchttemperatuursmetingen zijn er WMO richtlijnen gekend (Oke, 2006). De dynamische evolutie van het stedelijk microklimaat is sterk afhankelijk van de schaal waarop men kijkt, daar de uitwisseling van warmte op een volledig andere schaal plaatsgrijpt. Een illustratie hiervan is in Figuur 29 opgenomen. Het is daarom ook moeilijk om in-situ metingen rechtstreeks te gaan vergelijken met modelresultaten die in dit geval op een 1 km grid berekend zijn. Normaal gesproken dringen zich dan ook gedetailleerde analyses op van de in-situ meet plaats en hoe representatief die zijn en voor welke omgeving.



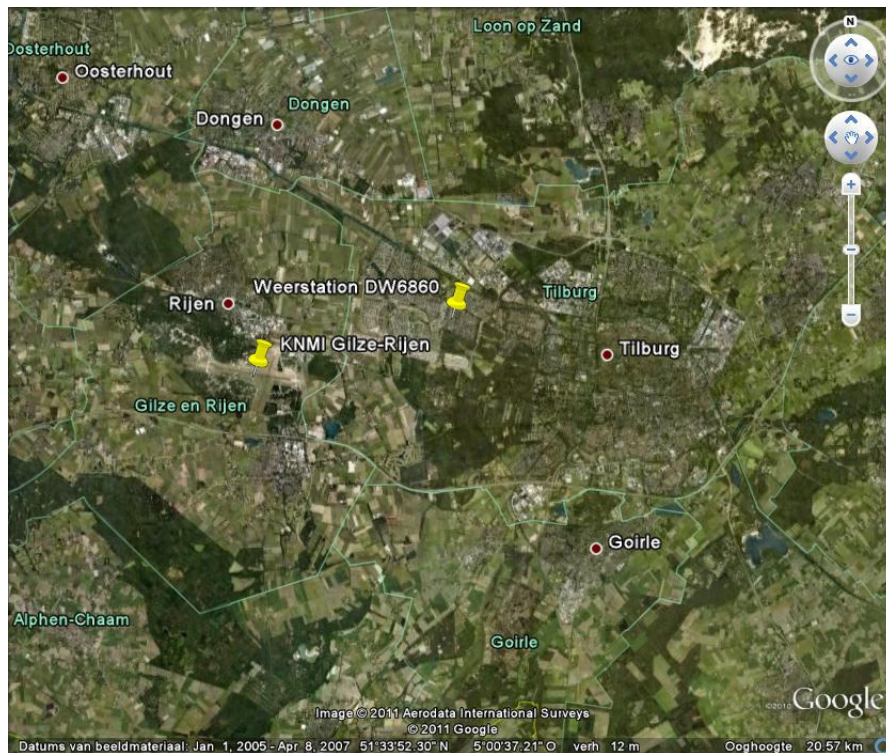
Figuur 29 : Schema van de verschillende klimatologische niveaus in stedelijke gebieden (Oke, 2006).

In dit project waren geen luchttemperatuur datasets voor handen bij de opdrachtgever. Daarom zijn we nagegaan of er andere bronnen kunnen aangeboord worden voor validatie van de modelberekeningen. Via het Citizen Weather Observation Program⁹ (CWOP) vonden we een amateur-meteoroloog, Dhr. Arnaut Stomphorst, in Tilburg, die graag z'n metingen (station ID DW6860) ter beschikking stelde voor dit project. In Figuur 30 zijn enkele fotos opgenomen van zijn meetopstelling, zie ook <http://weerstationtilburgreeshof.organisten.eu/>. Voor 2010 zijn er data beschikbaar vanaf eind mei met een sample interval van 5 minuten. Naast de metingen van het station DW6860 kunnen we ook beschikken over de metingen van het KNMI, waarvoor 1 station zich binnen het 1 km modeldomein bevindt, nl. aan de luchthaven in Gilze-Rijen (KNMI station nr 350). Helaas zijn er geen stations gevonden in binnenstedelijk gebied van Tilburg.

⁹ <http://www.wxqa.com>

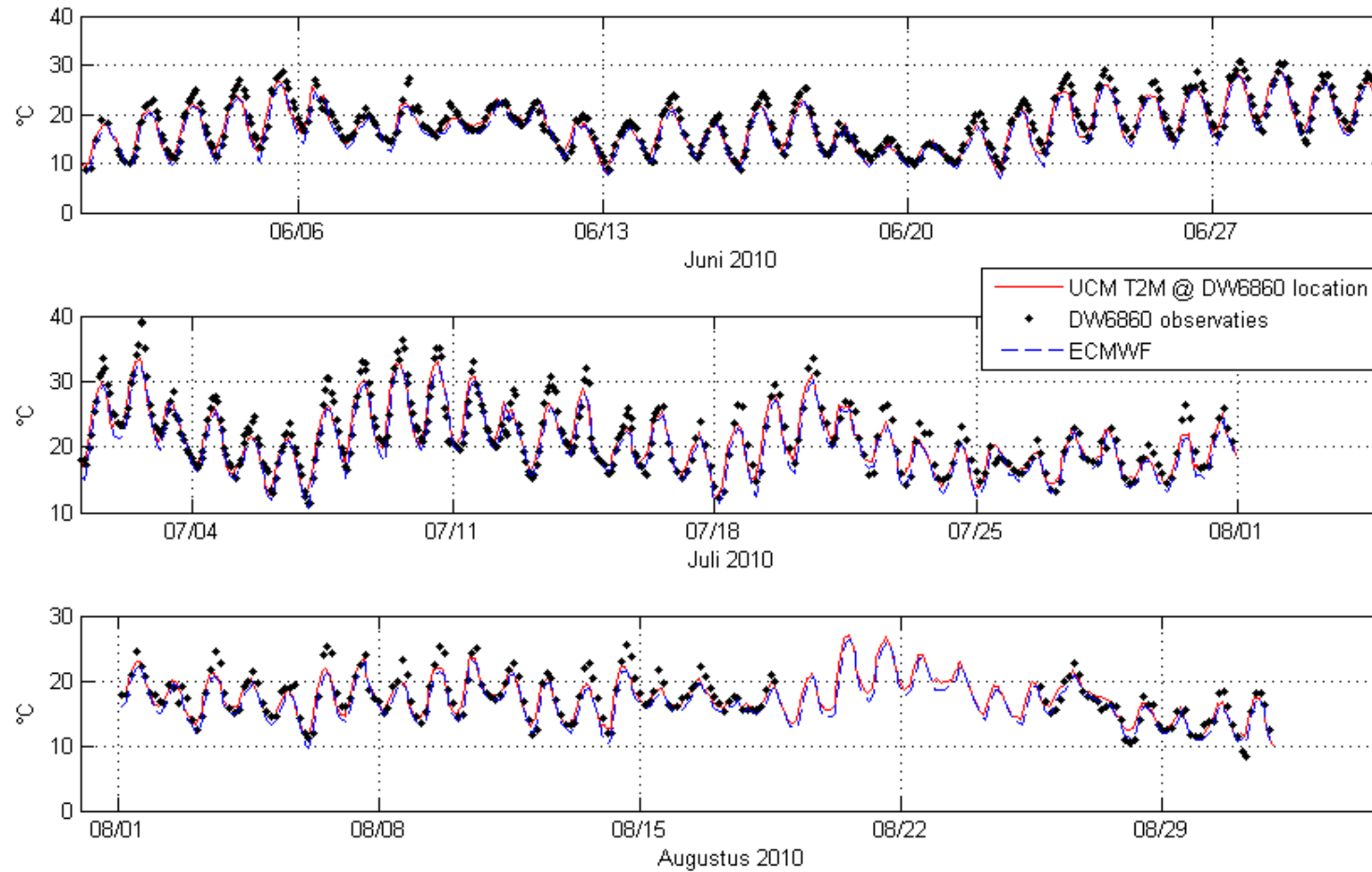


Figuur 30 : Meetinstrumenten, met dank aan : Arnout Stromphorst.

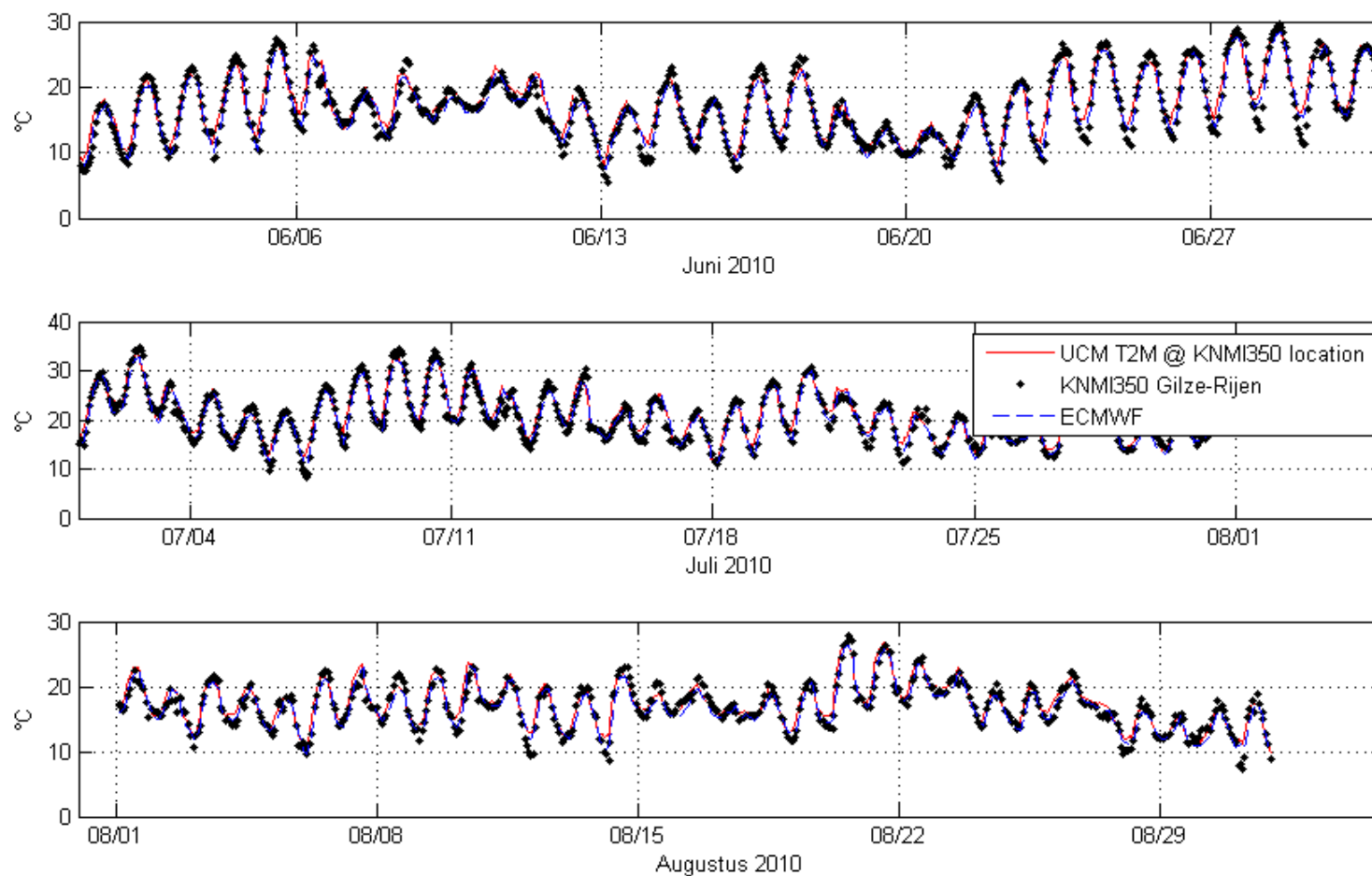


Figuur 31 : Lokatie van de gevonden data voor validatie voor Tilburg. De pins geven de lokatie van respectievelijk het DW6860 weerstation van A. Stromphorst en het KNMI 350 station aan de luchthaven te Gilze-Rijen.

In een eerste validatie oefening hebben wij de luchttemperatuursmetingen rechtstreeks vergeleken met met de 1 km model output, die we interpolateerde op de lokatie van de metingen.



Figuur 32 : Validatie oefening tussen het UCM, de ECMWF geïnterpoleerd naar het centrum van het modelgrid en de metingen van het DW6860 station te Tilburg. De data voor het DW6860 station te Tilburg werden ter beschikking gesteld door Dhr. Arnaut Stomphorst, amateur meteoroloog en lid van het Citizen Weather Observer Program (<http://www.wxqa.com>).



Figuur 33: Validatie oefening tussen het UCM, de ECMWF geïnterpoleerd naar het centrum van het modelgrid en de metingen van het KNMI station nr 350 te Gilze-Rijen (<http://www.knmi.nl>) . We bekijken telkens de maanden Juni-Juli-Augustus.

De tabel hieronder geeft enkele validatie statistieken aan, waarbij we de RMSE (Root Mean Squared Error), bias, verklaarde variantie en index of agreement¹⁰ berekend hebben.

	RMSE		BIAS		R ²		IOA	
	UCM	ECMWF	UCM	ECMWF	UCM	ECMWF	UCM	ECMWF
KNMI station Gilze-Rijen (51.567°N, 4.933 °E)	1.6K	1.2K	0.6K	0.0K	0.94	0.96	0.98	0.99
DW6860 station (51.57942°N, 5.01027°E)	1.9K	1.9K	-0.4K	-1.3K	0.89	0.93	0.96	0.97

Tabel 4 : Validatie statistieken voor de stations DW6860 en KNMI350 te Tilburg. We vergelijken telkens het Urban Climate Model en de domein waarde voor ECMWF. De statistieken zijn gebaseerd op de maanden Juni-Juli-Augustus.

Op zich merken we dat de overeenkomst tussen voor de tijdsreeksen relatief goed is. De overeenkomst is het best voor het eerder ruraal station nabij de luchthaven in Gilze-Rijen. Voor het stedelijk station zien we dat de BIAS die voor het ECMWF model (waarvoor de temperatuur gemiddeld met 1.3 K te laag inschat wordt) groter is dan voor het UCM (BIAS van -0.4 K). Met andere woorden zien we dus in deze heel beperkte validatie dat het stedelijk effect beter door UCM wordt weergegeven.

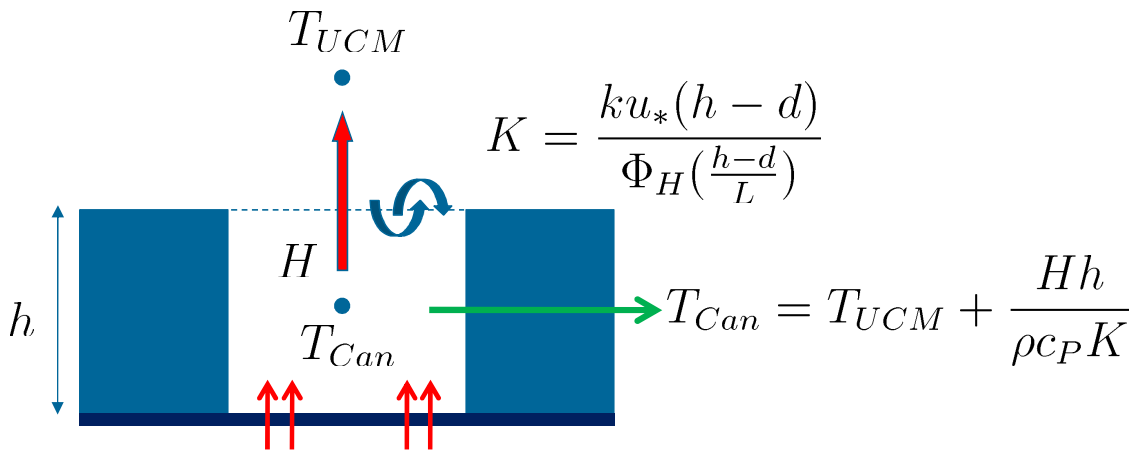
Er kon echter geen bevredigende validatie van het stedelijk – ruraal temperatuurverschil gevonden worden op basis van de metingen die voor handen zijn. We dienen hier echter de beperkte representativiteit van het DW6860 station te benadrukken, wat eerder een algemeen probleem is in stedelijke omgeving. Op de fotos in Figuur 30 is duidelijk te zien dat het meettoestel zich heel dicht bij de bebouwing bevindt. Ondermeer door de locatie op een binnenkoer (en dus beperktere circulatie) verwachten we dus veel grotere effecten (welke we ook observeren in de validatie oefening van Figuur 32) dan dewelke representatief zijn voor een gridcel van 1 km. Inderdaad, het UCM gaat overdag de gemeten temperaturen in het station systematisch onderschatten.

4.3. BEREKENING URBAN CANOPY TEMPERATUREN

Gezien we vast stelden dat het UCM op zich niet echt representatief is voor de temperaturen in de urban canopy laag (i.e. straat niveau), maar eerder voor de temperaturen op lokale schaal (inertial sublayer, zie Figuur 29), leek het ons aangewezen hiervoor te corrigeren. Hiervoor werd een extra module bij het UCM ontwikkeld die op basis van de berekende luchttemperaturen en de warmte fluxen de temperaturen inschatten op straatniveau, i.e. rekening houdende met de gebouwen. Deze module is gebaseerd op (Solazzo, Di Sabatino, Aquilina, Dudek, & Rex Britter, 2010), waarin de correctie term wordt uitgedrukt als functie van de turbulente warmte flux H, welke in het UCM berekend wordt en een uitwisselings variabele K, welke de turbulente menging aan de top van de

¹⁰ Willmott's Index of Agreement is gedefinieerd als $IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$, waarbij M en O respectievelijk voor Model en Observatie staan. Waarden dicht tegen 1 geven een heel goeie overeenkomst tussen model en observaties.

gebouwen en dus bijgevolg de ventilatie als functie van de atmosferische stabiliteit in rekening brengt.

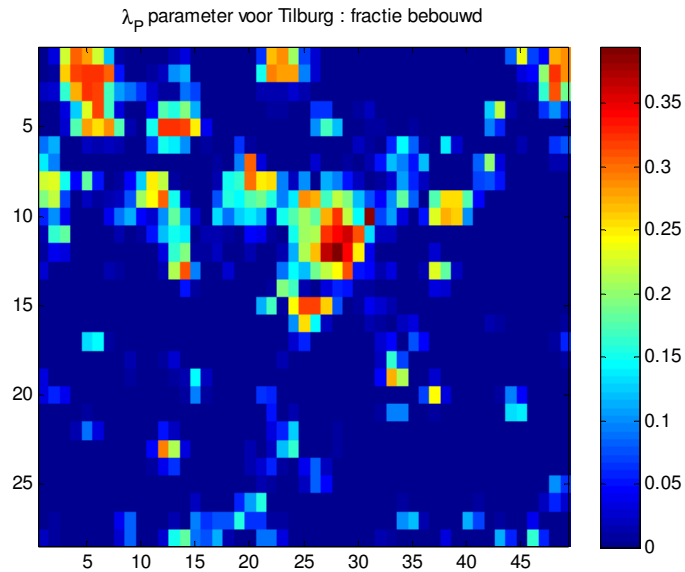


Figuur 34 : Schematisch overzicht van de berekening van de luchttemperatuur op straatniveau (T_{can}) op basis van de UCM luchttemperaturen. k is de von Karman constante (0.41), u^* de wrijvingsnelheid [m/s], ρ de massadichtheid van lucht bij standaard atmosfeer (1.18 kg/m³) en c_p de warmtecapaciteit (1008 J/kg/K).

Voor de verplaatsings hoogte (displacement height, d) passen we de parametrisatie van (Macdonald, R. F. Griffiths, & Hall, 1998) toe, welke deze grootheid uitdrukt als functie van de fractie bebouwde oppervlakte λ_P waarbij geldt :

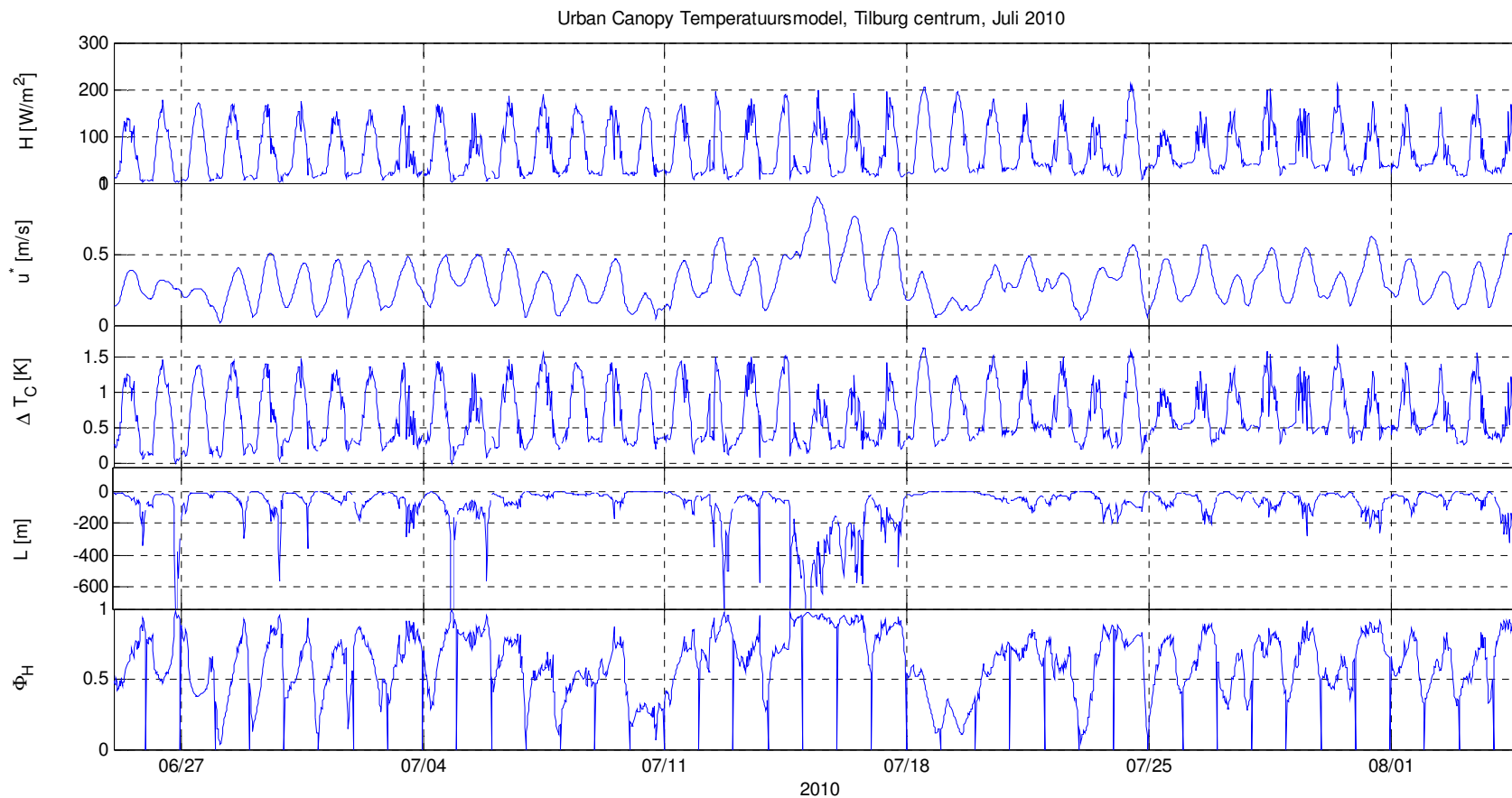
$$\frac{d}{h} = 1 + \alpha^{-\lambda_P} (\lambda_P - 1)$$

met $\alpha = 4.43$ (zie ook (Ratti et al., 2002)). We bepaalden dan ook voor elke pixel in het 1x1 km grid de fractie ingenomen door gebouwen. Voor de pixels waarvoor we gegevens in de GIS data terugvonden die ons ter beschikken gesteld werden, gebruikten we uiteraard de GIS data. Voor de overige pixels namen we aan dat de helft van de fractie verstedelijkt gebied (bepaald op basis van de CORINE landgebruiks dataset) door gebouwen is ingenomen.



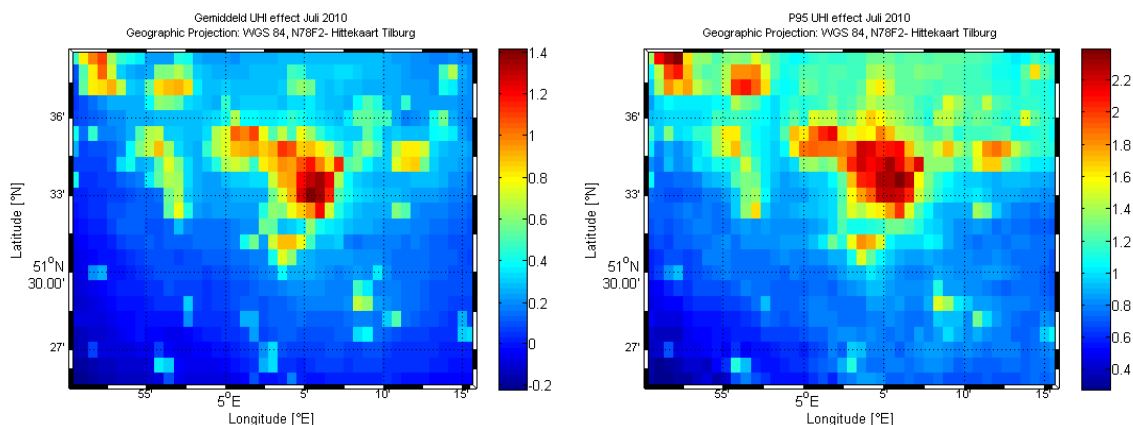
Figuur 35 : Fractie van de oppervlakte in elke 1 x 1 km pixel bedekt door gebouwen.

In Figuur 36 onder zijn de resultaten van deze nieuwe module weergegeven voor een pixel in het centrum van Tilburg. De 3^e rij in de figuur bevat het street level temperatuur increment. We merken dat makkelijk waarden tot anderhalve graad gehaald worden. Ook effecten van de stabiliteit zijn duidelijk merkbaar in het model. In de periode tussen 14-17 Juli merken we duidelijk een aantal dagen op met een verhoogde wrijvingsnelheid u^* , dit betekent dat er meer turbulente uitwisseling zal zijn met de hogere luchtlagen. Het gevolg hiervan is dat het temperatuur increment in de streetcanyon kleiner wordt zoals ook in de figuur wordt aangegeven.



Figuur 36 : Resultaten van het nieuw ontwikkelde urban canopy temperatuurmodel voor tilburg. De figuur toont de periode Juli 2010. Van boven naar onder zijn voor een pixel in het centrum van Tilburg de sensible heat flux, de wrijvingsnelheid, het canopy temperatuur increment ΔT_C , de Monin-Obukhov lengte en de stabiliteitsfunctie weergegeven. De relevante rij in de grafiek is de middelste die het temperatuur increment op straat niveau t.o.v. het UCM aangeeft.

Na een validatie van deze module met de data van het hobby station DW6860 konden wij vaststellen dat de model BIAS effectief verbeterde, van een onderschatting van gemiddeld 0.44 °C naar 0.19 °C. De RMSE verbeterde slechts weinig, van 1.91 naar 1.87 °C. We kunnen vervolgens nu opnieuw het gemiddelde UHI effect bekijken dat volgt uit het UCM samen met de street canyon module. We bestudeerden hiervoor de maand juli van 2010 daar deze maand de hoogste temperaturen kende gedurende 2010.



Figuur 37: Gemiddelde (links) en 95ste percentiel van het UHI effect (rechts) voor Tilburg.

In Figuur 37 zijn het gemiddelde en het 95^{ste} percentiel van het UHI effect voor Tilburg afgebeeld. Deze figuren tonen met andere woorden het gemiddelde en extremale temperatuursverschil t.o.v. de omliggende rurale gebieden voor de maand Juli 2010. Als referentie temperatuur voor “landelijk gebied” werd ditmaal telkens de mediaan temperatuur op genomen van alle pixels waar volgens de CORINE 2006 dataset geen stedelijk oppervlak voorkomt.

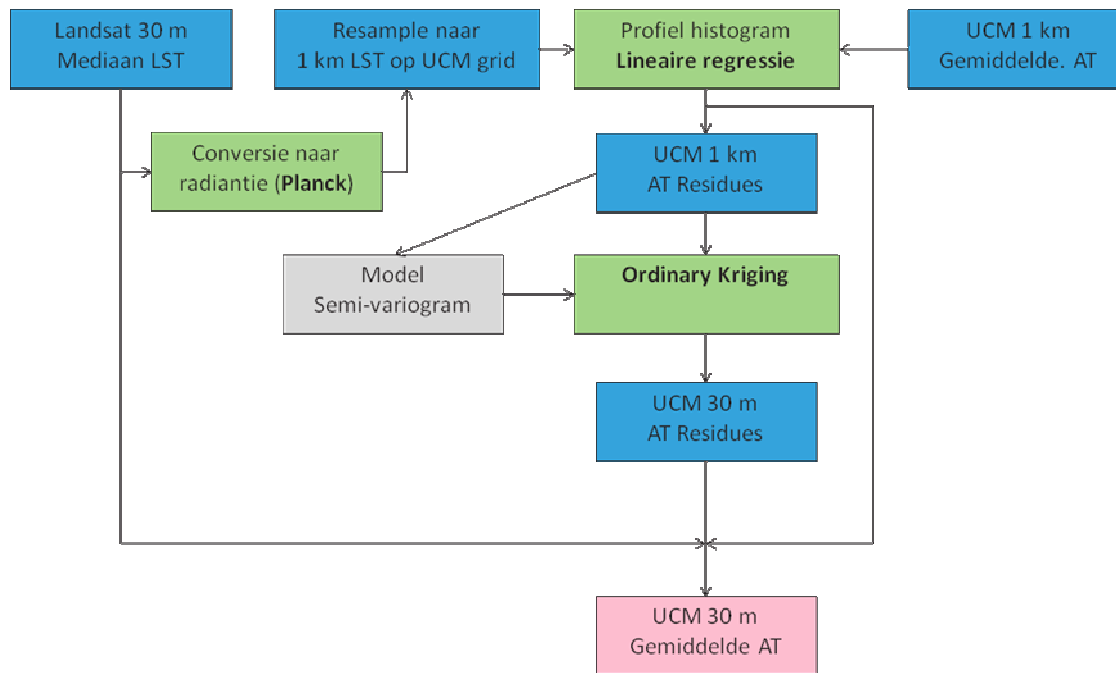
We stellen vast dat het model een gemiddeld effect in het centrum van Tilburg voorspeld van 1.4 °C. Dit is in relatief goede overeenstemming met de studie van (G.J. Steeneveld, et al,2011) welke een gemiddelde effect van 1.8 K bepaalde. We dienen hierbij echter op te merken dat het hobby meteostation hiervoor gebruikt tegen een gebouw aan staat, wat op zich aanleiding geeft tot een hoger UHI effect gezien de muur van het gebouw in de directe omgeving van de sensor als warmte buffer kan dienen. Voor het 95^{ste} percentiel vinden we een UHI effect tot 2.3 °C in het centrum van Tilburg en stellen we vast dat deze waarde in de modellering lager uitvalt dan wat verwacht wordt voor Tilburg op basis van de relatie uit (Oke, 1988) en (G.J. Steeneveld, et al,2011), welke telkens een maximaal effect van ~4 °C vooropstellen. Op zich kunnen we gelijkaardige argumenten aanhalen als voor de gemiddelde temperatuur. We dienen ook op te merken dat dergelijke extremum indicatoren zoals maximum of de P95 waarde enorm gevoelig zijn een dat een zo lang mogelijke tijdsreeks dient in acht genomen te worden.

In het volgende stuk zullen we deze kaarten verder verfijnen door middel van een downscaling aan de hand van hoge resolutie LandsAT beelden.

4.4. DOWNSCALING MET HOGE RESOLUTIE LANDSAT BEELDEN

In appendix zijn alle geprocesste landsat beelden opgenomen. Om de lage resolutie luchttemperatuursdata te downscalen maken we vervolgens gebruik van 1 enkel LandSAT LST

beeld. Jammer genoeg beschikken we niet over een beeld tijdens de maand Juli van 2010 waarvoor we in Figuur 37 het lage resolutie streetcanyon UHI effect berekenden. Het is echter wel belangrijk om een recent LST beeld te nemen gezien over de periode waarvoor we data van LandsAT hebben er zich nieuwe stedenbouwkundige ontwikkelingen kunnen hebben voorgedaan. We namen bijgevolg het beeld van op 6/9/2010 (LT51980242010249MOR00, zie Tabel 8). Dit beeld werd in vorig hoofdstuk reeds besproken. Merk op dat de ruimtelijke resolutie van dit beeld in de orde van 100 m is, gezien we echter in de LandsAT processing alle beelden naar een uniform grid geprocesst hebben, is dit beeld geïnterpoleerd naar 30 m resolutie zoals die van het ETM+ instrument aan boord LandsAT 7.



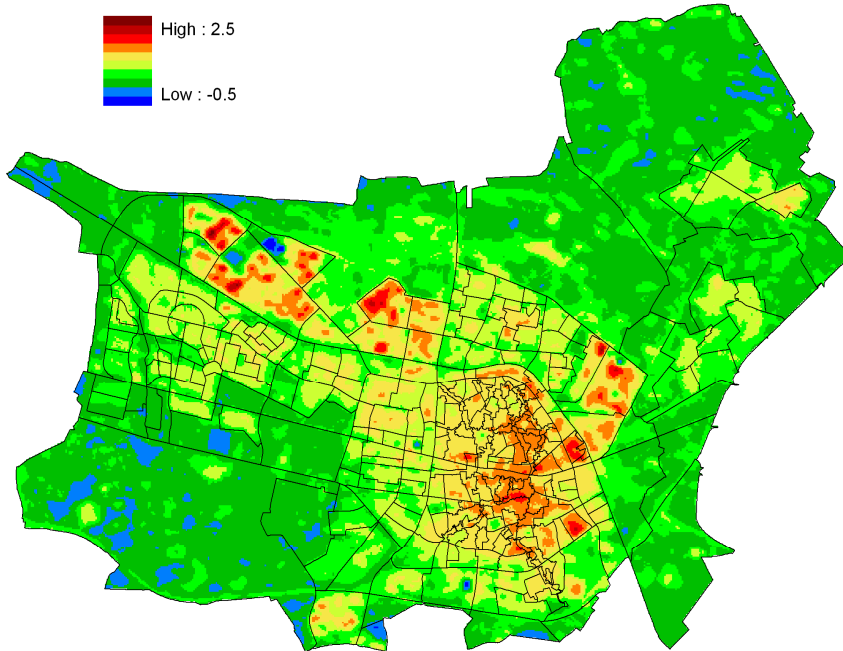
Figuur 38 : Schematische weergaven van de downscaling methodiek, waarbij de grofschalige stedelijke luchttemperaturen berekend met het UCM worden gedownscaled aan de hand van het hoge resolutie Landsat LST beeld.

Het schema hierboven in Figuur 38 geeft de gevolgde methodiek van het downscalen weer. Vertrekkende vanaf het hoge resolutie LST beeld voeren we eerst een hersampling naar het model grid van het stedelijk klimaat model door. Dit doen we via conversie naar radianties (uitgestraald vermogen per eenheid van ruimtehoek en per eenheid van oppervlakte en golflengte). Vervolgens vergelijken we deze hersampled oppervlakte temperatuurwaarden met het gemiddelde UHI effect en het 95^{ste} percentiel. Door middel van een eenvoudige lineaire regressie wordt het verband tussen beide variabelen vastgelegd. De residu's van de lineaire regressie worden vervolgens geïnterpoleerd naar het hoge resolutie grid, gebruik makende van de Ordinary Kriging geospatiale interpolatie techniek. De geïnterpoleerde residu's worden tenslotte bij de regressielijn, toegepast op het hoge resolutie LST grid, bijgeteld.

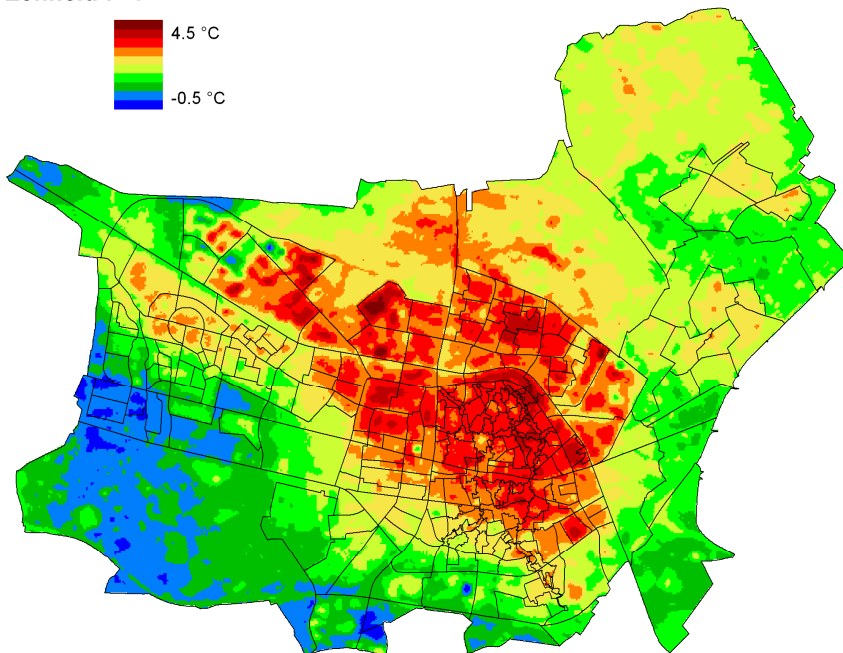
Het resultaat van deze bewerking is een gedownscalede luchttemperatuurskaart op de resolutie van het Landsat grid zoals afgebeeld in

Figuur 39.

Tilburg Hittekaart - Juli 2010
UHI Effect Gemiddelde
Eenheid : °C

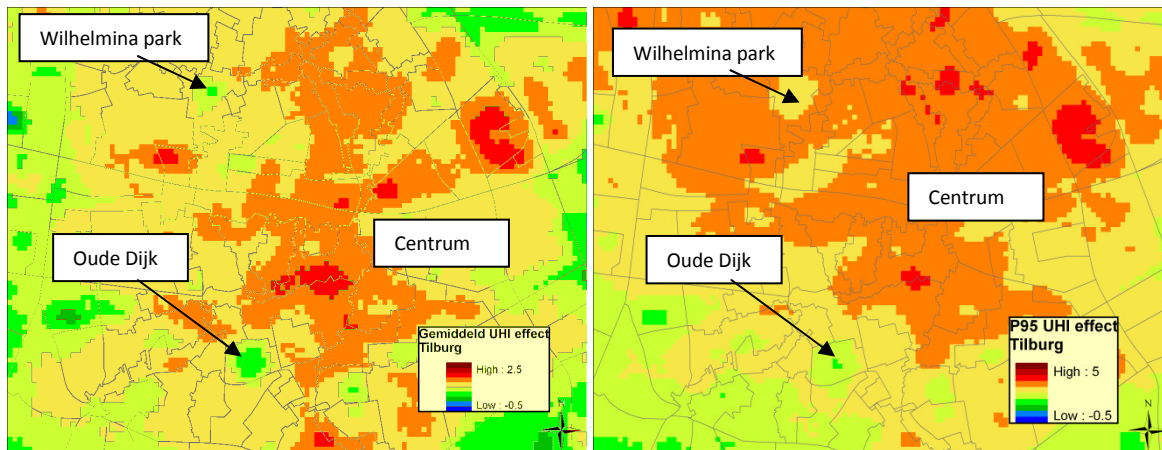


Tilburg Hittekaart - Juli 2010
UHI Effect 95 percentiel
Eenheid : °C



Figuur 39 : Hittekaarten voor Tilburg waarbij we rechts het 95ste percentiel van het UHI effect voor Tilburg laten zien, en links het gemiddelde effect.

We merken een verschil van gemiddeld ongeveer ~ 1 °C tussen de zones met het meest prominente stedelijk warmte eiland effect en de groene zones in Tilburg zoals het Wilhelmina park en de Oude Dijk.



Figuur 40 : Zoom in op een aantal parken in Tilburg en hun effect op het stedelijk warmte eiland.

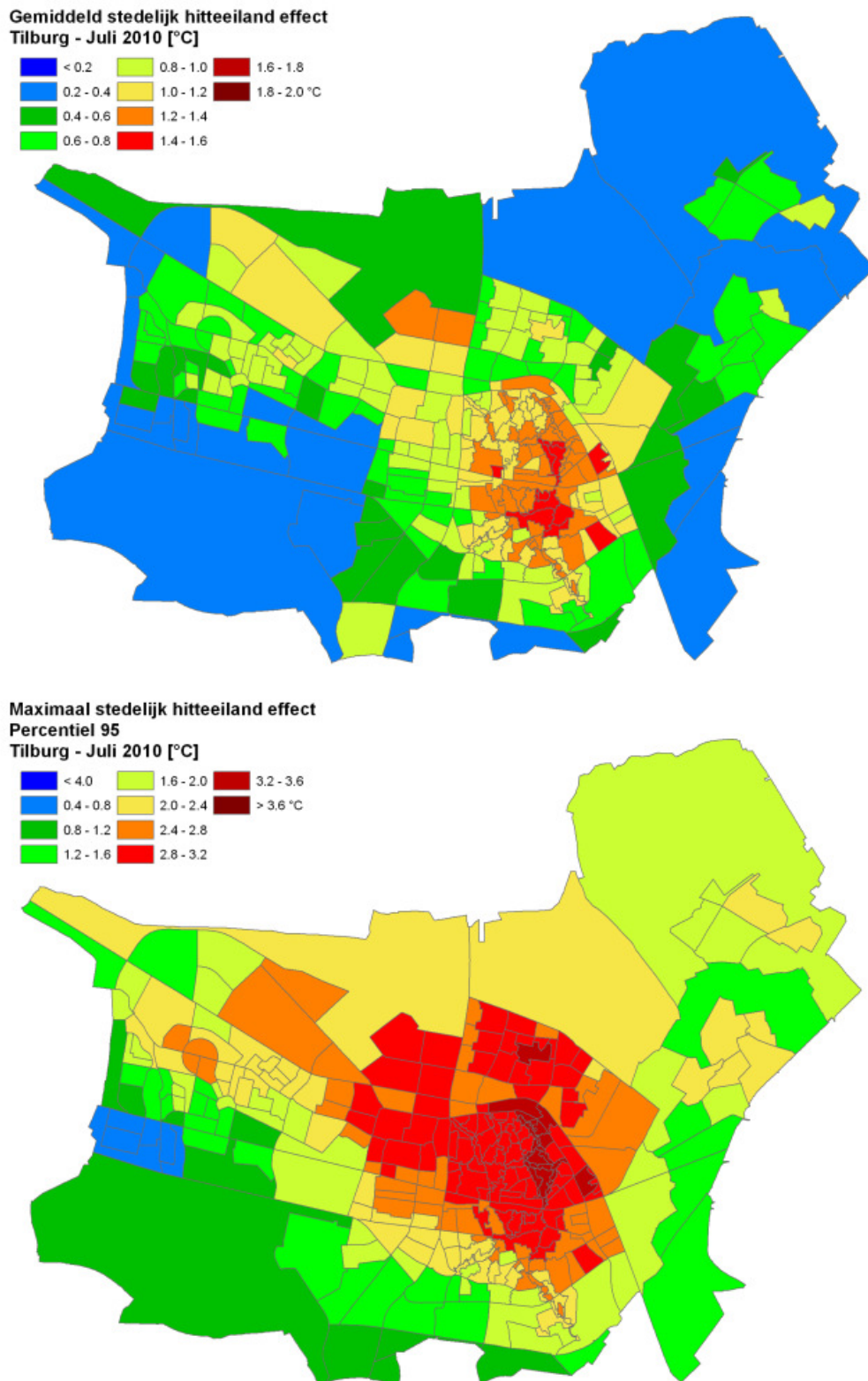
We zien ook dat voor het extreme (P95) UHI effect we een temperatuurverschil tot 2 graden optekenen tussen de Oude dijk en het centrum.

We wensen hier echter nogmaals erop te drukken dat de resultaten van deze modellering geen microschaal effecten in rekening brengen. Het temperatuurverschil tussen verschillende wijken kan lokaal nog groter zijn, maar om deze zaken adequaat in kaart te brengen dienen we gebruik te maken van een microschaal modelering aan de hand van ENVI-met of gelijkaardig model, wat voor een ganse stad computationeel niet haalbaar is. Verder wensen we ook erop te drukken dat de nodige voorzichtigheid geboden is bij de interpretatie van de P95 extremum waarden in het UHI effect. Het is zo dat de gemodelleerde periode absoluut niet volstaat om een klimatologisch relevant beeld te kunnen vormen van de extremen van de hittevorming in Tilburg. Hiervoor zou een veel langere modelleer periode in acht dienen genomen te worden.

4.5. RESULTERENDE GEMIDDELTE EN EXTREMALE UHI INTENSITEITS KAART OP SUBWIJK NIVEAU

Wanneer we de hoge resolutie informatie uit

Figuur 39 aggregeren naar het subwijkniveau, dan verkrijgen we de kaarten die hieronder zijn afgebeeld. Voor de aggregatie naar subwijken nemen wij telkens de mediaan luchttemperatuur.



Figuur 41 : Resulterende gemiddelde (boven) en P95 (onder) UHI intensiteits kaarten voor Tilburg.

In volgend hoofdstuk zullen we deze kaarten vervolgens verder in detail bespreken en koppelen via aan de verschillende verklarende variabelen, afgeleid in HOOFDSTUK 2.

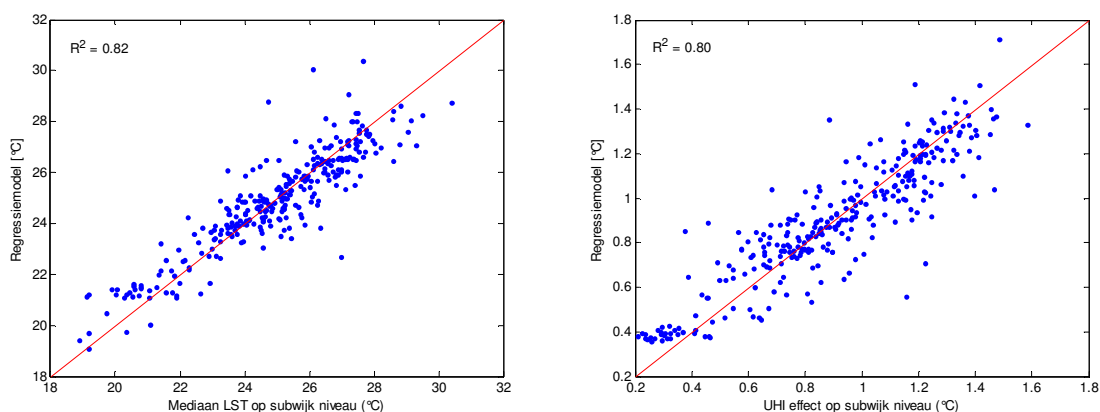
HOOFDSTUK 5. BESPREKING VERKLARENDE FACTOREN

In dit hoofdstuk zullen we verschillende elementen van deze studie samenbrengen. In een eerste paragraaf beschrijven we een kwantitatieve regressie analyse welke de verklarende factoren in verband brengt met de afgeleide kaarten van de stralingstemperatuur overdag en de kaart met het gemiddelde stedelijk warmte eiland effect. Vervolgens leiden we kwalitatieve scores af voor de bijhorende maatregelen, gebaseerd op de gevoeligheidscoëfficiënten die volgen uit de regressie analyse. Tenslotte zullen we op basis van de LST en UHI kaarten de hotspots in Tilburg identificeren en bespreken in het licht van de matrix aan maatregelen.

5.1. REGRESSIE ANALYSE HITTEKAARTEN

Om een verband te kunnen vastleggen tussen de verklarende factoren, die we in het eerste hoofdstuk afleidden op basis van de GIS data, en de hittekaarten dienen we een regressie analyse uit te voeren. Op die manier kunnen we vaststellen welke aan de verklarende factoren gekoppelde structurele maatregelen het meest efficiënt zijn om ingezet te worden in Tilburg. We kunnen dus aan elk van de factoren een relatief gewicht koppelen dat bepaalt welk effect de corresponderende maatregel heeft.

Daar een aantal van de afgeleide factoren sterk gecorreleerd zijn, denk maar aan de sky view factor, de frontal area density en de fractie bebouwd oppervlak. Het is duidelijk dat bij hoge fractie bebouwde oppervlak, typisch in het centrum van een stad, men ook de laagste sky view factor zal aantreffen. Om hiermee te kunnen omgaan zullen we gebruikmaken van partiële kleinste kwadraten regressie (Partial Least Squares of PLS, (Rosipal & Kramer, 2006), (Jong, 1993)). Ordinaire multiple lineaire regressie technieken falen immers wanneer een aantal van de predictor variabelen sterk gecorreleerd zijn. Partiële kleinste kwadraten regressie omzeilt dit door middel van een principal component analyse.



Figuur 42 : Resultaten van de regressie analyse, we zien links de vergelijking van het regressiemodel met de verklarende factoren uit HOOFDSTUK 2 en de oppervlakte temperatuur overdag. Rechts zien we het analoge voor het UHI effect.

De resultaten van de regressie analyse zien we in Figuur 42 afgebeeld. Dankzij het gebruik van de PLS techniek vinden we tot 80 % verklaarde variantie in het UHI effect en tot 82 % van het oppervlakte temperatuurbeeld overdag, op zich heel bevredigende resultaten. De regressie coëfficiënten zijn in Tabel 5 gegeven.

Verklarende factor	LST gevoeligheid		UHI gevoeligheid	
	genorm.	ongenorm.	genorm.	ongenorm.
Fractie bebouwd terrein	0.9888	17.6056	0.8572	2.1658
Fractie verhard oppervlak	0.0436	0.9325	0.0670	0.2033
Frontal Area Density	-0.0051	-0.0335	-0.0076	-0.0071
Sky View Factor	0.2193	6.7251	0.0155	0.0675
Fractie water	-0.0221	-1.1582	-0.0505	-0.3753
Stedelijk groen	-0.0067	-0.1127	0.0291	0.0699
Bos & grote groenbuffers	-0.1065	-3.1187	-0.0309	-0.1284
Constante term	-	14.4831	-	0.3093
Verklaarde variantie		82 %		81%

Tabel 5: PLS Regressie coëfficiënten (sensitivities) voor de verklarende factoren t.o.v. het LandSAT LST beeld en het gemiddelde UHI effect. De tabel toont zowel de coëfficiënten van een genormeerde regressie (waarbij de z-score¹¹ genomen is van de originele data.)

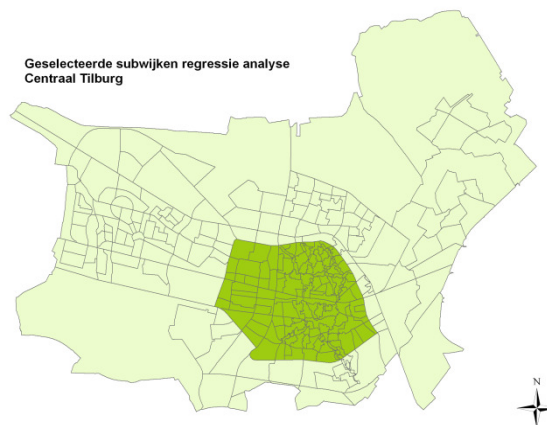
Op zich zijn deze regressie coëfficiënten niets anders dan een kwantificatie van de gevoeligheid van de LST of UHI waarden t.a.v. de verschillende verklarende factoren. Wanneer we een (ongenormeerde) coëfficiënt voor bos vinden van -3.11 t.a.v. de stralingstemperatuur (LST), dan betekent dit dat bij toename van de fractie bebost gebied in een wijk met 10 %, we een afname van $-3.1187 * 0.10 = -0.3$ graden vinden in stralingstemperatuur. Toch is bij interpretatie hiervan toch enige voorzichtigheid geboden en moet men zich altijd bewust zijn van de onderliggende modelberekeningen of aannames. We geven hieronder nu een meer gedetailleerde bespreking van deze regressie analyse, waarna we een vertaling naar effectiviteit zullen doen voor beleidsmaatregelen in volgende paragraaf.

We vinden overduidelijk dat zowel het LST beeld als de UHI intensiteit de grootste gevoeligheid hebben ten aanzien van de fractie bebouwd terrein. Deze komt in de analyse voor Tilburg naar voor als zijne 5-6 keer groter dan voor grote groenbuffers. Ook de SVF is voor het LST beeld heel sterk positief gecorreleerd met een gevoeligheid van 0.67 °C per 10 % sky view factor. Dit is relatief logisch gezien een hogere sky view factor overdag ook hogere instraling van de zon (en bijgevolg hogere temperaturen) met zich meebrengt. We dienen hier echter een kleine caveat in te bouwen in die zin dat zones met de hoogste sky view factor (naast open terrein) typisch ook industriële zones zijn. In het LST beeld stelden we daar ook de hoogste stralings temperaturen vast, maar dit kan ten dele worden toegeschreven aan de materialen gebruikt voor de dakbedekking van grote industriële complexen. We merken dat het UHI effect blijkbaar een relatief lage gevoeligheid heeft t.a.v. de SVF. Dit kan deels te verklaren zijn door het feit dat er al bij al weinig hoogbouw in Tilburg aanwezig is, waardoor de gebouwen de nachtelijke uitstraling maar weinig reduceren. Het is echter zo dat bij deze analyse op gans het grid, de SVF voor de westelijke wijken in Tilburg iets minder

¹¹ Met Z-score wordt bedoeld dat een variabele X genormeed wordt als $(X - E[X]) / \text{STD}(X)$, waarbij E[X] het gemiddelde en STD[X] de standaardafwijking.

goed bepaald zijn gezien de kwaliteit daar van de AHN data. De frontal area density is niet echt prominent aanwezig in de als verklarende factor. Dit is in overeenstemming met de observatie dat er qua directioneel effect in Tilburg, welk een geprefereerde ventilatie richting zou kunnen inhouden, weinig op te tekenen valt. Uiteindelijk is in deze de ventilatie ook gekoppeld aan de fractie bebouwd terrein. Hoe lager deze fractie, hoe minder gebouwen en dus beter de ventilatie. Wat stedelijk groen betreft merken we dat de LST data de hoogste gevoeligheid heeft t.a.v. bos en grote groenbuffers, welk voornamelijk door de Oude warande en het bosgebied ten West – Zuidwesten van Tilburg bepaald wordt. Uiteindelijk is de omvang van stedelijk groen de meest bepalende factor op het stedelijk klimaat, zie ondermeer (Dimoudi & Nikolopoulou, 2003). Opvallend is echter wel de relatief lage gevoeligheid in zowel de LST als UHI data t.a.v. ander stedelijk groen in deze analyse. Dit is enigszins verassend maar kan verklaard worden door het feit dat we de regressie analyse voor gans het model domein in Tilburg uitgevoerd hebben. De impact van de grotere groenbuffers is op deze schaal veel groter en op zich is in het binnestedelijk gebied in Tilburg (zie Figuur 4) in verhouding weinig stedelijk groen aanwezig. Het lijkt ons daarom aangewezen om de analyse te herhalen, maar enkel toegespitst op het centrale gedeelte van Tilburg. Op die manier kunnen we beter de gevoeligheid t.a.v. het inplanten van stedelijk groen inschatten.

Figuur 43 hieronder geeft aan op welk gebied wij de analyse voortzetten. Een extra argument voor het beperken van het analyse domein tot de centrale wijken van Tilburg is het feit dat het hoogtemodel voor de Westelijke wijken niet zo heel nauwkeurig is, dit kan duidelijk een effect hebben op de inschatting van de gevoeligheid t.a.v. de SVF en de FAD.



Figuur 43 : Geselecteerde subwijken voor de regressie analyse voor het centrum van Tilburg. We selecteerden de wijken binnen de Ringbaan Noord, Oost, Zuid en West, aangevuld met de wijken tussen de Rueckertbaan en de Baroniebaan tot aan de Oude Warande.

De regressie coëfficiënten van de gevoeligheids analyse voor het centrum van Tilburg zijn aangegeven hieronder in Tabel 6. Het valt reeds op dat de verklaarde variantie bij selectie van de centrale subwijken lager ligt dan voor de regressie analyse op gans het domein. Desalniettemin kunnen we toch spreken van een relatief bevredigend resultaat. Merk ook op in Tabel 6 we ons enkel beperkten tot stedelijk groen, en dus geen apart bosgebied in rekening gebracht hebben. Dit is voor de geselecteerde subwijken vrijwel verwaarloosbaar.

Verklarende factor	LST gevoeligheid		UHI gevoeligheid	
	genorm.	ongenorm.	genorm.	ongenorm.
Fractie bebouwd terrein	0.5770	8.1850	0.6756	1.4462

Fractie verhard oppervlak	-0.0019	-0.0376	-0.0079	-0.0231
Frontal Area Density	0.1022	0.4635	-0.1535	-0.1051
Sky View Factor	0.1456	2.7303	-0.0772	-0.2184
Fractie water	-0.0776	-5.4195	0.0384	0.4046
Stedelijk groen	-0.2552	-3.7802	-0.2049	-0.4580
Constante term	-	21.3273	-	0.9873
Verklaarde variantie		59 %		60 %

Tabel 6 : Analoge regressie coëfficiënten , maar ditmaal wanneer we enkele de centrale subwijken selecteren.

Opnieuw vinden we dat de meest bepalende factor uiteraard de fractie bebouwd terrein is. De fractie verhard oppervlak is hier in deze klein en zelfs een weinig negatief, wat een beetje contra-intuïtief lijkt zelfs. Opvallend is echter wel dat de SVF voor de centrale subwijken in Tilburg weldegelijk de verwachte dynamiek weerspiegelt. T.a.v. de oppervlakte temperatuur kunnen we duidelijk stellen dat dat er een niet-geringe positieve correlatie is. Met name : in wijken met hogere sky view factor zal overdag meer verhitting optreden dan daar waar er relatief hoge gebouwen zijn. Voor het UHI effect merken we echter dat er een kleine, maar toch significante negatieve correlatie optreedt. Dit houdt in dat plaatsen met een lagere sky view factor een sterker UHI effect zullen kennen, wat te verwachten is. Uiteindelijk is er in Tilburg relatief veel laagbouw aanwezig, dus zal sowieso het effect van de Sky View Factor minder spelen dan in grotere steden, met een relatief groter aandeel van hoge gebouwen en smalle straten.

De coëfficiënten van de frontal area density en verhard oppervlak zijn relatief gezien het geringst, en op zich terug wat contra-intuïtief. Opvallend is echter wel de fractie water, welke voor de oppervlakte temperatuur een relatief hoog negatief gewicht kent. Op zich logisch, gezien de hoge warmtecapaciteit van water. Water zal dus maar heel traag opwarmen en op het moment van de LST opname (~'s middags) aan het oppervlak relatief koel zijn t.o.v. de omgeving. Voor het UHI effect lijkt water hier een omgekeerde correlatie te vertonen. Nu an sich kan het zo zijn dat wanneer het UHI effect meest uitgesproken is, 's nachts, zou het kunnen dat de omringende omgeving sneller afkoelt dan wateroppervlakken, welke (typisch aan het eind van de zomer) dan een iets hogere temperatuur kunnen hebben. Of dit effect daadwerkelijk aan de oorzaak ligt van de positief gecorreleerde gevoeligheid voor fractie water t.a.v. de UHI intensiteit is in deze studie echter wel de vraag en verdient verdere studie, zeker gezien we downscaling van het UHI effect met een LST beeld is gebeurd dat overdag is genomen. Te meer, voor de regressie analyse op het volledige grid vinden we dat de fractie water weldegelijk negatief gecorreleerd is met het UHI effect. Het is m.a.w. veel realistischer hier te stellen dat de fractie water in het centrale deel van Tilburg te gering is om hier goede uitspraken te kunnen over doen en we beter afgaan op de resultaten voor gans het domein in deze.

Wat we wel merken in deze analyse op het centrale deel van Tilburg is het feit dat stedelijk groen zoals verwacht prominent aanwezig is als verklarende factor voor zowel de stralingstemperatuur (LST) overdag als voor het UHI effect. Wanneer we een inschatting maken, dan zien we dan bij een toename van de fractie stedelijk groen met 30 %, we een vermindering van het UHI effect van ~ 0.14 °C vinden, wat ongeveer 10 % is van het gemiddelde UHI effect in Tilburg¹².

Op basis van de bovenstaande regressie analyse en dus relatieve verhouding tussen de verschillen de gevoeligheden t.a.v. de verklarende factoren, zullen we hieronder nu een vertaling maken naar beleidsmaatregelen welke in Tilburg kunnen worden toegepast.

¹² Analyse op basis van het ongenormeerde gewicht : $0.30 * (-0.4580) = 0.14$ is ongeveer 10 % van de gemiddelde UHI intensiteit.

5.2. VERTALING NAAR BELEIDSMAATREGELLEN

Met elk van de verklarende factoren kunnen vervolgens beleidsmaatregelen gekoppeld worden welke het effect van het stedelijk warmte eiland mitigeren. Op basis van de regressie analyses die hierboven zijn beschreven kunnen we vervolgens een impact score toekennen aan elk van de verklarende factoren. Deze impact scores zijn gradaties die de effectiviteit weerspiegelen van de maatregelen. We dienen er hier op te drukken dat deze scores een vertaling zijn van de regressiecoëfficiënten, aangevuld met een best mogelijke inschatting gezien de verschillende caveat's die we hierboven besproken hebben. We beperken ons hier ook tot de verklarende factoren die we in deze studie onder de loupe genomen hebben. Op zich is het geweten dat albedo effecten een belangrijke rol kunnen spelen. We beschikken echter niet over voldoende nauwkeurige gegevens om de albedo nauwkeurig genoeg te kunnen inschatten voor de verschillende subwijken. Een alternatief ware gevoeligheidsstudie geweest met het stedelijk klimaat model, maar deze vallen echter buiten de scope van deze studie.

Verder dienen we duidelijk te stellen dat deze scores effectief zijn toegepast op de concrete situatie in Tilburg. Om een voorbeeld te geven, daar Tilburg hoofdzakelijk reeds uit laagbouw bestaat, heeft het ook geen zin om zwaar in te zetten op de reductie of de toename van de sky view factor, hoewel deze factor over het algemeen gesproken wel heel effectief is voor het mitigeren van het stedelijk warmte eiland.

Verklarende Factor	Beleidsmaatregel	Effectiviteit hittestress overdag	Effectiviteit hittestress tgv. UHI effect
Bebouwd oppervlak	Reductie van bebouwde oppervlak, creëren van open zones welke meer ventilatie in de hand werken.	++	+++
Frontal Area Density	Het oriënteren van streetcanyons volgens de dominante windrichting bij nieuwe wijkontwikkelingen	0	0
Sky View Factor	Reductie van de hoogbouw, opleggen van beperkingen inzake hoogte/breedte verhouding bij nieuwe ontwikkelingen	-	+
Water oppervlak	Aanleggen van vijvers en opengooien van eventueel overkapte rivieren.	+	+
Stedelijk groen	Inplanten van groen elementen in de straten.	++	++
Bos, natuurgebied	Aanleggen van grote zones aaneengesloten natuurgebied.	+++	+++

Tabel 7 : Tabel met effectiviteitsscores voor Tilburg voor het mitigeren van hittestress overdag en t.g.v. het UHI effect. We kennen volgende scores toe : **heel effectief** (+++), **effectief** (++) , **minder effectief** (+), **niet effectief** (0) tot leidt tot **verslechtering** (-)

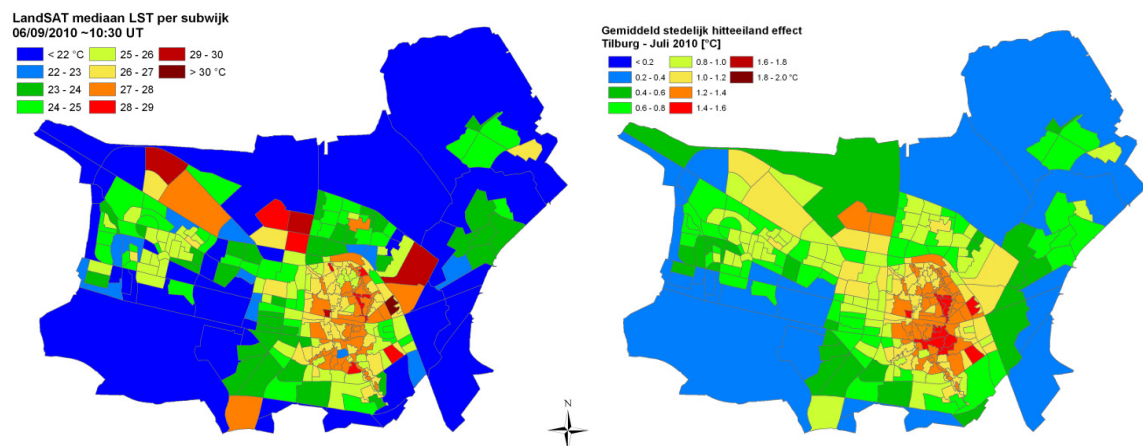
We dienen hier ook op te merken dat deze matrix van effectiviteitsscores zich op het niveau van de subwijken bevindt. Deze scores zijn ook gebaseerd op een analyse voor Tilburg. Het is bijgevolg niet mogelijk deze scores te veralgemenen. Voor effectiviteit van microklimatologische ingrepen zoals het inplanten van individuele groenelementen in straten dienen we te verwijzen naar microschaal modellering met een model zoals ENVI-met. Verder is het ook zo dat de exacte invulling van dergelijke beleidsmaatregelen duidelijk buiten de scope van deze studie valt en dient te gebeuren op een politiek-maatschappelijk niveau. Deze scores dienen louter ter ondersteuning van stedenbouwkundige ontwikkeling op vlak van stedelijk klimaat.

In de score tabel voor beleidsmaatregelen hebben we het enkel over de fractie bebouwd oppervlak, de frontal area density, de SVF, wateroppervlakken en stedelijk groen. De fractie verhard oppervlak zal in de praktijk sterk gelinkt zijn aan het inplanten van stedelijk groen. Gezien de resultaten van de gevoeligheidsanalyse hierboven niet echt eenduidige resultaten opleverden ten aanzien van deze parameter laten we die weg uit de tabel. Immers, wanneer men Figuur 4 in beschouwing neemt, dan is de distributie van de fractie verhard oppervlak relatief uniform over het bebouwde gebied in Tilburg, waardoor de gevoeligheidsanalyse weinig kan vertellen.

Uiteraard zijn het reduceren van de fractie gebouwen of het reserveren van meer ruimte voor bos en natuurgebied de meest effectieve maatregelen die een beleid kan nemen voor het reduceren van hittestress, zowel overdag als 's nachts. Aan het reduceren van de fractie bebouwd oppervlak kennen we een iets lagere score toe voor de hittestress overdag als voor het mitigeren van het UHI effect an sich. De achterliggende reden hiervoor is deels het feit dat relatief gesproken het gewicht dat toegekend wordt aan de fractie bebouwd terrein t.o.v. het gewicht bvb voor bos/natuurgebied (zie Tabel 6), maar ook het feit dat een reductie van gebouwen zal aanleiding geven tot meer instraling op street canyon niveau (gelinkt aan de SVF). Het is duidelijk dat de frontal area density voor Tilburg in de praktijk weinig gaat opleveren, dit was reeds duidelijk toen bleek dat er al bij al weinig directioneel effect op te tekenen valt en op zich is dit ook een maatregel die praktisch in de praktijk weinig toepasbaar is. Wat de sky view factor betreft zien we dat de bijhorende maatregel (i.e. reductie van hoogbouw) slechts beperkt effectief is voor de hitteontwikkeling in Tilburg, immers is er reeds heel wat laagbouw aanwezig. Voor de hittestress overdag is deze reductie zelfs negatief gezien er dan meer instraling kan optreden. Als meeste efficiënte maatregel in het binnenstedelijk gebied is dus het aanplanten van stedelijk groen, wat zowel voor schaduw als voor een verminderde opwarming van de lucht zorgt.

5.3. IDENTIFICATIE HOTSPOTS EN VOORGESTELDE OPLOSSINGEN

In een laatste paragraaf brengen we deze inzichten nu in verband met een aantal concrete hotspots die we in de UHI en LST kaarten kunnen identificeren. We dienen eerst en vooral op te merken dat bij analyse van de luchtfotografie beelden uit Google Earth (<http://earth.google.com>) het blijkt dat Tilburg op zich al een heel groene stad is, waar sowieso de additionele stress ten gevolg van de stedelijke omgeving relatief beperkt zal blijven in vergelijking met de grotere stedelijke agglomeraties.



Figuur 44 : We herhalen hier de afgeleide mediaan oppervlakte stralingstemperatuur op subwijk niveau en het gemiddeld stedelijk hitteiland effect (rechts) berekend respectievelijk aan de hand van remote sensing LandSAT data en het VITO stedelijk klimaat model.

Wat opvalt ten eerste is het feit dat de stralingstemperatuur het hoogst is voor de **industrieterreinen**, het gaat hier concreet om het industrieterrein Oost, Industrie terrein Kraaiven, Industrieterrein Vossenberg en het terrein tussen de Enschtsestraat en de Insulindestraat ten Oosten van het Centrum.



Figuur 45 : Google Earth screenshots van de betrokken industrie terreinen. Bovenaan links : het industrie terrein Oost, rechts de Kraaiven, in het midden links de Vossenberg en rechts het gebied tussen de Enschtsestraat en de Insulinde straat, en onderaan het terrein aan de hoventseweg.

We merken op uit Figuur 11 dat deze industrie terreinen een relatief hoge SVF kennen samen met een verhoogde fractie bebouwing en verminderde vegetatie. De instraling overdag is m.a.w. relatief groot en door het ontbreken van schaduw en vegetatie voor verdamping kan hier de grootste hittestress ontstaan. Het effect in deze zones is in de UHI kaart relatief minder, gezien er hier ook meer uitstraling kan plaatsvinden en het in deze zones dus ook vlugger afkoelt. We dienen hierbij wel de bemerking te maken dat de oppervlakte temperatuur in deze buurten een klein beetje een vertekend beeld kan geven door het gebruik van bepaalde roofings op grote industriële gebouwen. Typisch zijn dit bvb. dunne golfplaten daken, welke vlug opwarmen in de zon. Daar we geen gegevens hierover beschikbaar hebben is het moeilijk kwantitatief deze effecten in te schatten. Maar al bij al kunnen we toch stellen dat de hittestress in deze gebieden overdag het grootst zal zijn. Te meer ook doordat dergelijke typische roofings maar weinig warmte opslaan, de opslag warmteflux is m.a.w. relatief laag, wat meer energie overlaat voor de turbulente warmte flux en dus het opwarmen van de omliggende atmosfeer. Eenvoudige maatregelen hier zijn uiteraard het voorzien van extra vegetatie elementen op de grote industriële terreinen.

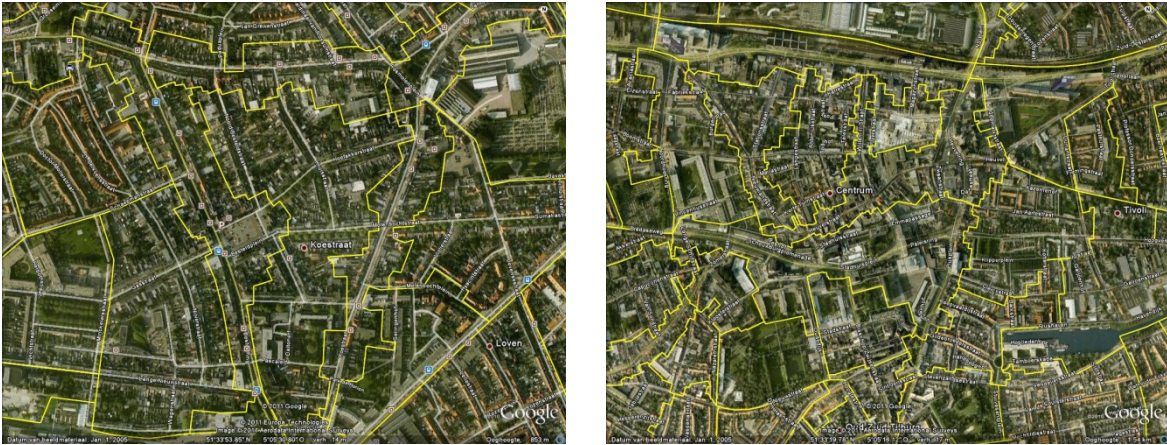
Vervolgens merken we op dat hittestress in de westelijke wijken van Tilburg (**Reeshof**) eerder beperkt is. Dit wordt gestaafd door het relatief hoge aandeel van stedelijk groen in die buurt (zie Figuur 4) die voor voldoende schaduw en afkoeling zorgt, terwijl we daar ook een hoge SVF hebben door de lage bebouwing. Hierdoor is slechts in heel beperkte mate een hitte eiland effect aanwezig t.o.v. het centrale deel van Tilburg. We zien daar ook duidelijk dat de densiteit van de bebouwing een stuk lager ligt t.o.v. het centrum (10 – 20 % t.o.v. 30 – 50 % in het centrum).



Figuur 46 : Google earth screenshot van de westelijke wijk (Reeshof, links). Rechts zien we de centrale buurt in de noordelijke wijken, met name rond de bouwmarkt Karwei.

Een analogoos verhaal kunnen we vertellen over de **noordelijke wijken**, de Quirijnstok en Stokhasselt-noord. We merken echter wel dat de centrale subwijk rond de bouwmarkt Karwei een verhoogde stralingstemperatuur kent. Deze buurt heeft duidelijk een minder aandeel aan stedelijk groen dan de omringende buurten (zie Figuur 4).

Wat het **centrale gedeelte** van Tilburg betreft merken we duidelijk twee zones waar het stedelijk warmte eiland effect het grootst is. De eerste zone situeert zich in de buurt rond de Koestraat, meer bepaald in de driehoek tussen de Koestraat, de Besterdring en de molenstraat, zie de screenshot hieronder.



Figuur 47 : Hotspot zones in het centrale deel van Tilburg, met links de buurt rond de koestraat en rechts de centrale winkelbuurt van Tilburg.

De tweede zone is gelegen in het centrale deel van Tilburg, met name de buurt rond het Koningsplein en de Heuvelstraat. Deze buurten kennen een relatief lage sky view factor en een relatief hoog aandeel aan bebouwde oppervlakte, met relatief weinig stedelijk groen, vergelijk terug met Figuur 4 en Figuur 11. Deze buurten zien we prominent in de UHI kaart naar voren komen. Het zijn dus regio's waar het stedelijk warmte eiland effect in Tilburg het sterkst zal spelen met name door de verhoogde bebouwing en verlaagde SVF, met dus toegenomen nachtelijke temperaturen t.o.v. de omringende wijken. De hittestress overdag in deze buurten zal echter eerder vergelijkbaar zijn met de rest van de stad.

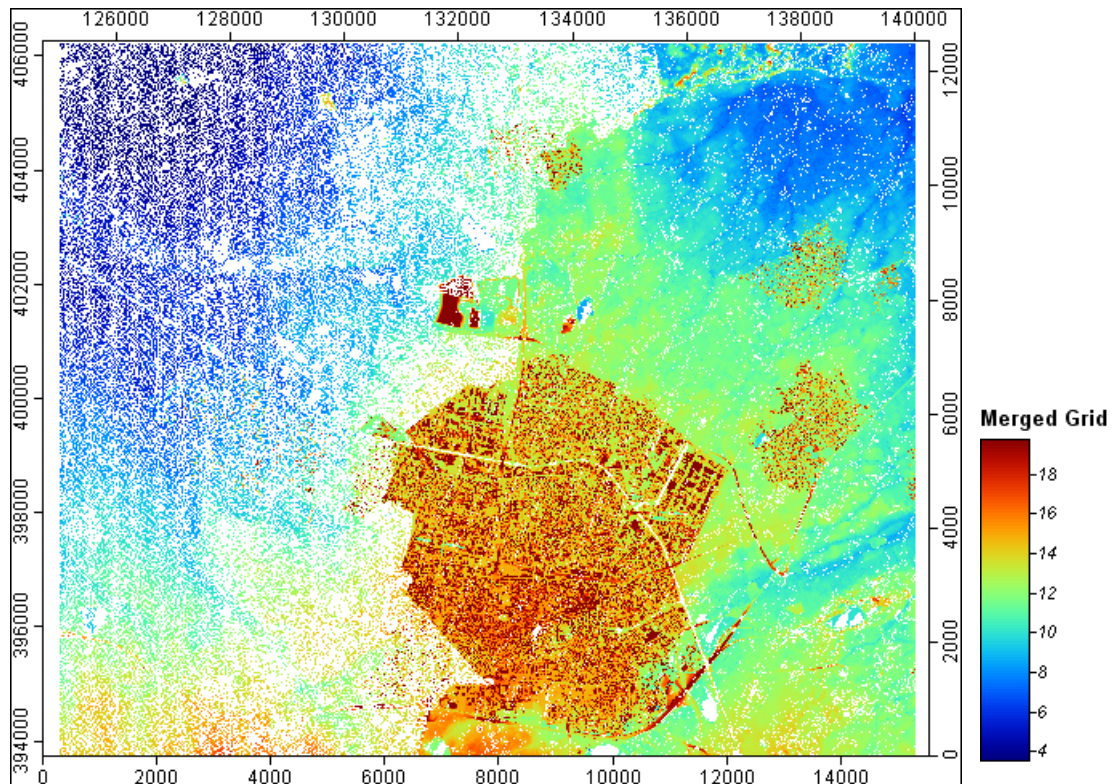
LITERATUURLIJST

- Barsi, J. a., Barker, J. L., & Schott, J. R. (2003). 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), 00(C)*, 3014-3016. Ieee. doi:10.1109/IGARSS.2003.1294665
- Barsi, Julia a. (2005). Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. *Proceedings of SPIE, 5882*, 58820E-58820E-7. Spie. doi:10.1117/12.619990
- Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software, 13*, 373-384.
- Chapman, L., & Thornes, J. E. (2004). Real-Time Sky-View Factor Calculation and Approximation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 21(5)*, 730-741. doi:10.1175/1520-0426(2004)021<0730:RSFCAA>2.0.CO;2
- Coll, C., Galve, J. M., Sanchez, J. M., & Caselles, V. (2010). Validation of Landsat-7/ETM+ Thermal-Band Calibration and Atmospheric Correction With Ground-Based Measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48(1)*, 547-555. doi:10.1109/TGRS.2009.2024934
- Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment : microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings, 35*, 69-76.
- 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
- Erell, E., & Williamson, T. (2007). Intra-urban differences in canopy layer air temperature at a mid-latitude city. *International Journal of Climatology, 27*, 1243-1255. doi:10.1002/joc.1469
- Jimenez-Munoz, J. C., Cristobal, J., Sobrino, J. a, Soria, G., Ninyerola, M., & Pons, X. (2009). Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(1)*, 339-349. doi:10.1109/TGRS.2008.2007125
- Jong, S. D. (1993). SIMPLS: An alternative approach to partial least squares regression. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 18(3)*, 251-263. Elsevier. doi:10.1016/0169-7439(93)85002-X
- Katzschner, L. (2006). Behaviour of People in Open Spaces in Dependence of Thermal Comfort Conditions. *PLEA2006 - The 23th Conference on Passive and Low Energy Architecture*.
- Macdonald, R. W., Griffiths, R. F., & Hall, D. J. (1998). An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmospheric Environment, 32(11)*, 1857-1864. doi:10.1016/S1352-2310(97)00403-2

- Maiheu, B., Ridder, K. D., Benedicte Dousset, Manuta, P., Ceriola, G., Viel, M., Daglis, I. A., et al. (2010). Modelling Air temperature via Assimilation of Satellite Derived Surface Temperature within the Urban Heat Island Project. *EARSeI Workshop Proceedings of the Joint SIG Workshop* (pp. 1-17).
- Oke, T. R. (2006). Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites. *WMO Instruments and Observing Methods*, (81).
- Ratti, C., Di Sabatino, S., Britter, R., Brown, M., Caton, F., & Burian, S. (2002). Analysis of 3-d Urban Databases with Respect to Air Pollution Dispersion for a Number of European and American Cities. *Water, Air and Soil Pollution*, 2, 459-469.
- Robine, J.-M., Cheung, S. L. K., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.-P., & Herrmann, F. R. (2008). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies*, 331(2), 171-178. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18241810>
- Rosipal, R., & Kramer, N. (2006). Overview and Recent Advances in Partial Least Squares. *Statistical and optimization Perspectives Workshop (SLSFS 2005), Revised Selected Papers* (pp. 34-51).
- Solazzo, E., Di Sabatino, S., Aquilina, N., Dudek, A., & Britter, Rex. (2010). Coupling Mesoscale Modelling with a Simple Urban Model: The Lisbon Case Study. *Boundary-Layer Meteorology*, 441-457. doi:10.1007/s10546-010-9536-6
- Wan, Z. (1999). *MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD) v3.3. Contract*. Institute for Computational Earth System Science, University of California; Santa Barbara. Retrieved from http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf
- Wan, Z. (2007). *MODIS Land Surface Temperature Products Users ' Guide. Quality Assurance*. ICES University of California. Retrieved from http://www.ices.ucsb.edu/modis/LstUsrGuide/MODIS_LST_products_Users_guide_C5.pdf
- T.R. Oke, *Boundary layer climates*. Routledge; 2nd edition 1988 (ISBN 978-0415043199)
- G.J. Steeneveld, et al, Quantifying Urban Heat Island Effects And Human Comfort For Cities Of Variable Size And Urban Morphology In The Netherlands. *Journal of Geophysical Research* 2011, doi:10.1029/2011JD015988
- 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.
- E. Thom, The discomfort index, *Weatherwise* 12(1959), pp. 57-60.
- P.O. Fanger, *Thermal Comfort*, (1970).
- Givoni, Estimation of the effect of climate on man: Development of a new thermal index. In: UNESCO, Editor, *Israel Institute of Technology, Haifa* (1963), p. 85.

BIJLAGE A : VERWERKING RUWE DATA ALGEMEEN HOOGTEBESTAND NEDERLAND

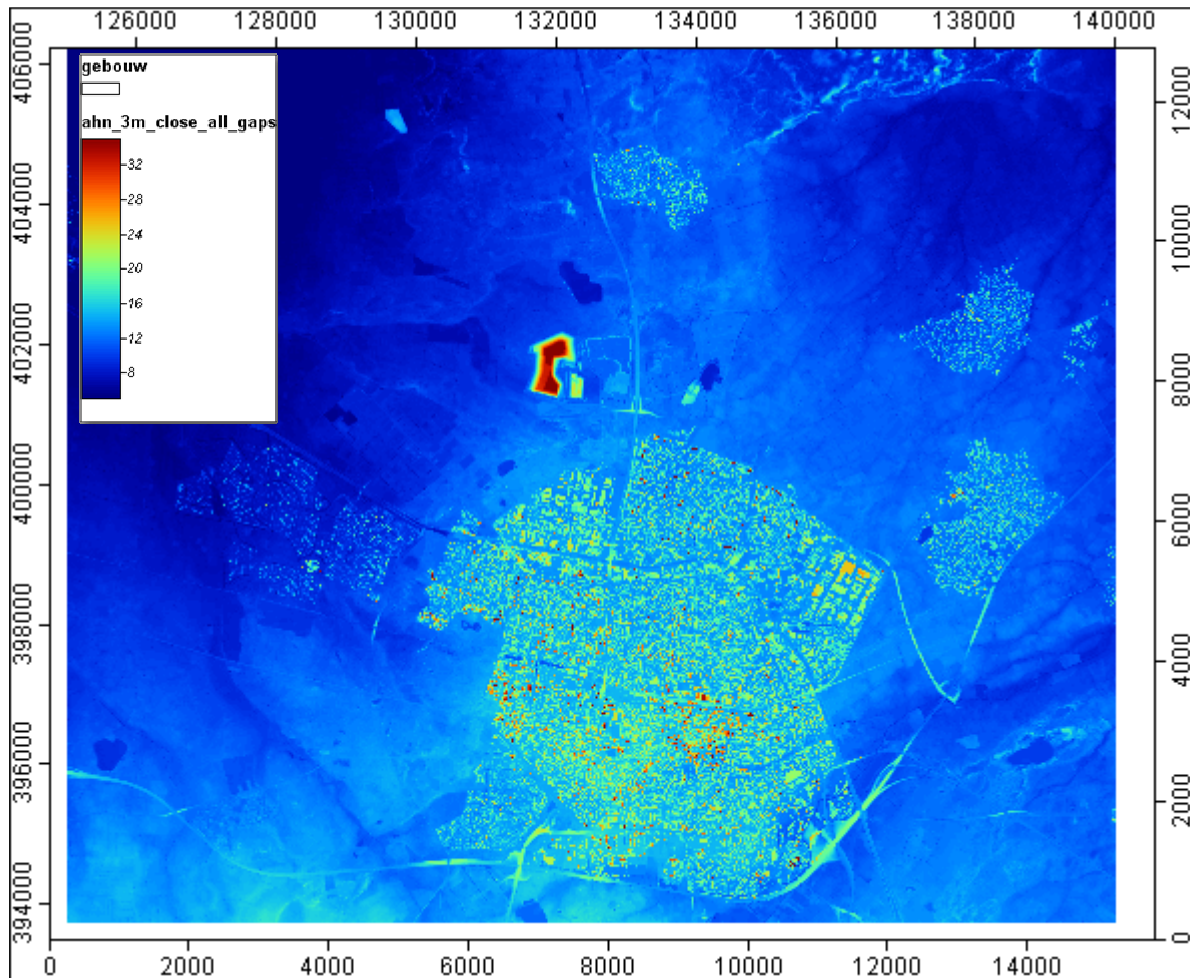
Voor het afleiden van de Sky View Factor en het bepalen van de frontal area index van de gebouwen is een 3D hoogtemodel nodig voor Tilburg. Hiervoor werd ruwe AHN data ter beschikking gesteld in de vorm van een X,Y,Z ascii tabel. De ruwe meetpunten werden ingelezen en geconverteerd tot een raster met een ruimtelijke resolutie van 3 m. Dit bleek na analyse het optimale compromis te zijn tussen het niveau van detail waarop de gebouwen worden weergegeven en de bedekking door de beschikbare meetpunten in de AHN data.



Figuur 48 : Ruwe AHN hoogte data, verzameld op een 3x3m grid. De legende geeft de hoogte in m aan.

Figuur 48 hierboven geeft een beeld van de beschikbare hoogte metingen. We merken duidelijk dat de data relatief gedetailleerd is voor Tilburg. Naar het westen zijn er echter minder datapunten beschikbaar, waardoor nogal wat ontbrekende waarden optreden. Dit heeft uiteraard een invloed op de kwaliteit van het kaartmateriaal voor de westelijke wijken. Voornamelijk de wijken Heerevelden, Dongewijk, Campenhoef, Huibeven, Gesworen Hoek, Dalem en Tuindorp De Kievit kennen een minder kwalitatieve sampling in de ruwe ter beschikking gestelde AHN data.

We pogen in eerste instantie deze ontbrekende waarden aan te vullen zodat we een raster krijgen waarvoor we de sky view factor kunnen berekenen. Het resultaat van deze berekening is afgebeeld in Figuur 49 hieronder.



Figuur 49 : Het volledige, op basis van de ter beschikking gestelde LIDAR hoogtemetingen gereconstrueerde hoogtebestand op 3 m. Ontbrekende pixelwaarden werden door interpolatie bijgevuld.

BIJLAGE B : WIST QUERY VOOR MODIS LST BEELDEN

Ter referentie geven we de WIST query die gebruikt is voor het afhalen van de MODIS 1km LST data.

```

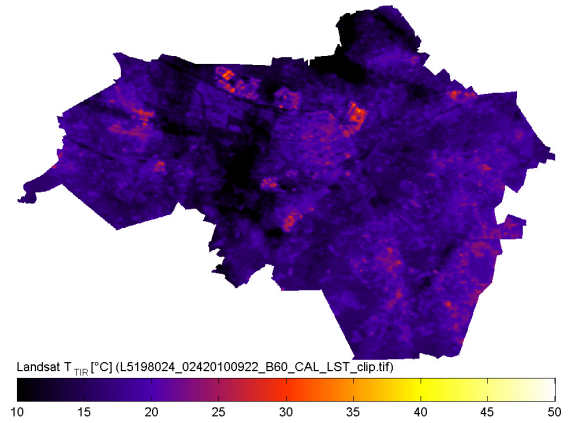
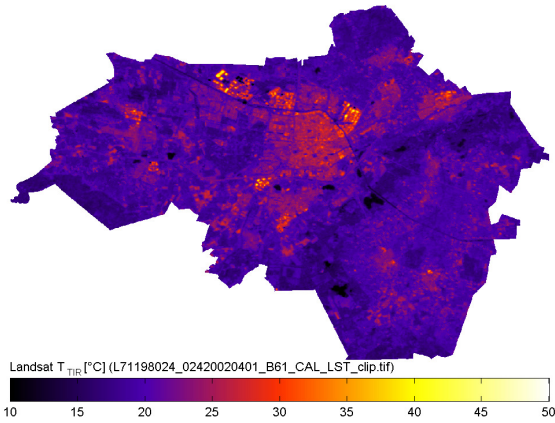
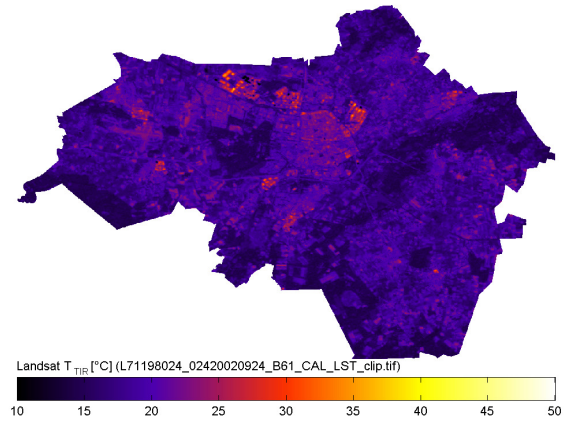
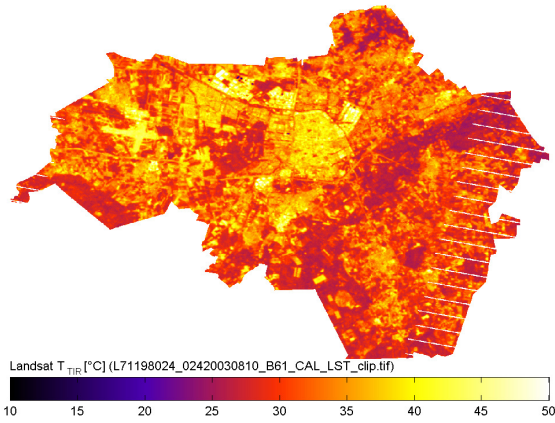
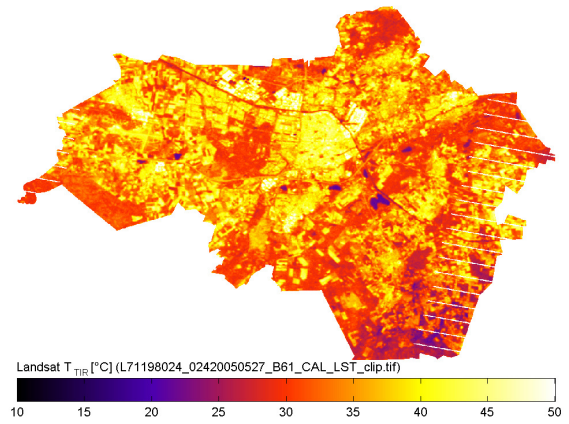
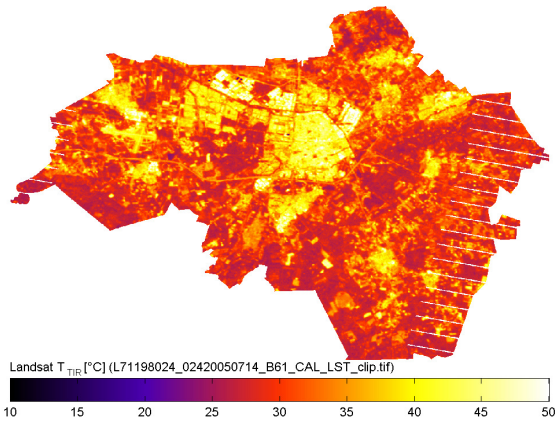
GROUP                = INVENTORY_SEARCH
MESSAGE_ID           = "0"
DATASET_ID           = (
"MODIS/Aqua Land Surface Temperature/Emissivity 5-Min L2 Swath 1km V005",
"MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 5-Min L2 Swath 1km V005"
)
GROUP                = POLYGON_LOC
TANGENT_LATITUDE     = 51.56
TANGENT_LONGITUDE    = 5.09
MAP_PROJECTION_TYPE  = "ORTHOGRAPHIC"
LATITUDE              = (
                    51.8746,
                    51.8747,
                    51.2452,
                    51.2451
                    )
LONGITUDE             = (
                    4.579,
                    5.5936,
                    5.5869,
                    4.5861
                    )
WG_ZOOM               = 125
END_GROUP            = POLYGON_LOC

START_DATE           = 2010-05-01T00:00:00Z
STOP_DATE            = 2010-09-30T23:59:00Z
GRANULE_LIMIT        = 2000
GUIDE_LIMIT          = 100
TIME_LIMIT           = 90
WG_MISSIONS          = (
                    "terra_modis_land"
                    )
WG_SRCHTYPE           = "INVENTORY_SEARCH"
WG_OPTSTYPE           = "All Options"
WG_GEOTYPE            = "Orthographic Map"
WG_TIMETYPE           = "Standard Date Range"
WG_DEPVALIDIDTYPE    = "Discipline"
END_GROUP            = INVENTORY_SEARCH

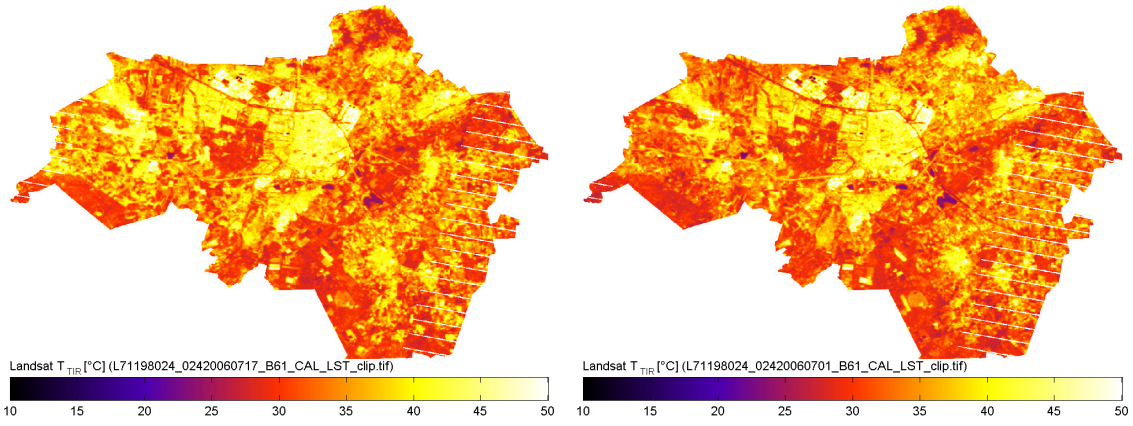
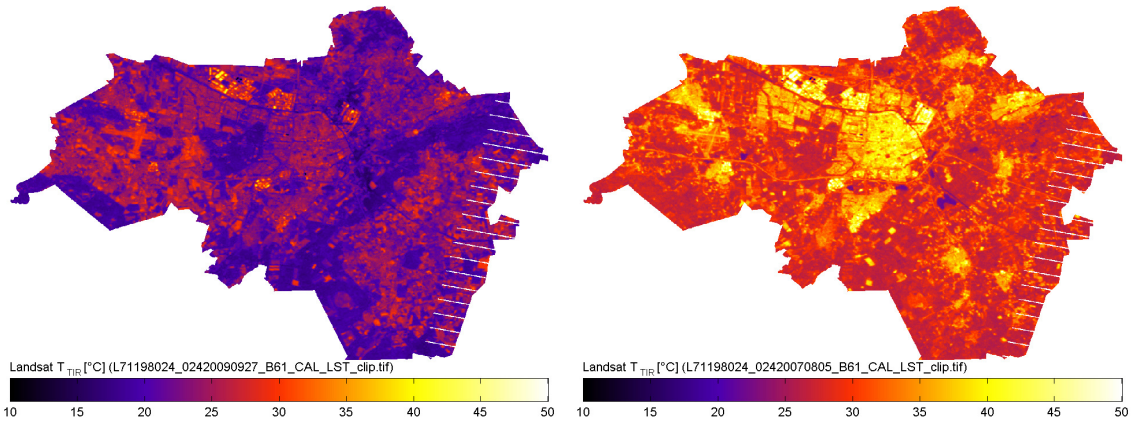
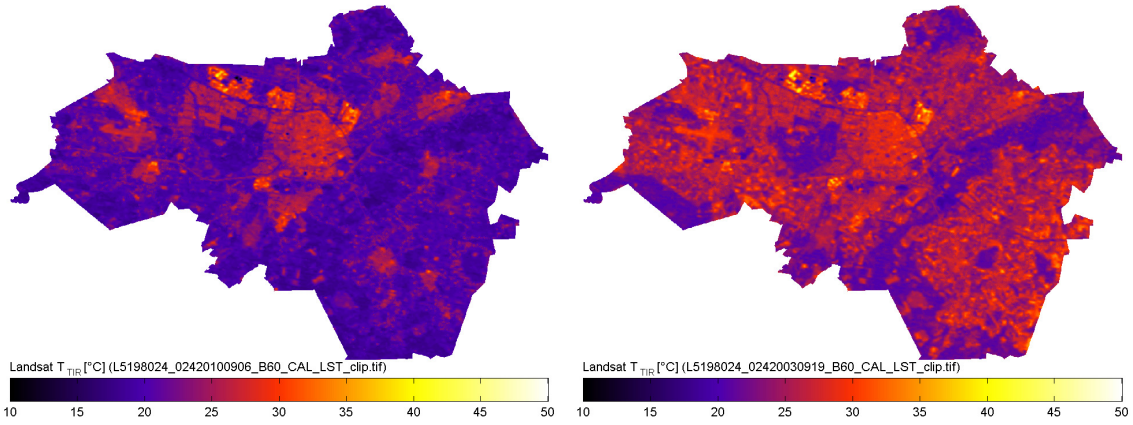
END

```


BIJLAGE C : GEPROCESSTE LANDSAT LST BEELDEN



Bijlage C : Geprocesste landsat LST beelden



BIJLAGE D : AFLEIDING LANDSAT OPPERVLAKTE TEMPERATUURSBELDEN

In deze bijlage beschrijven we in detail de afleiding van de stralingstemperaturen aan het oppervlak op basis van de LandsAT data.

D.1 Calibratie en atmosferische correctie van de ruwe infrarood opnames

De TM en ETM+ instrumenten hebben elk een spectraal kanaal in de thermisch infrarode (TIR) regio van het spectrum, wat gebruikt kan worden voor het afleiden van de oppervlakte temperatuur. Maar er zijn in het beste geval slechts enkele bruikbare opnames beschikbaar per jaar.

<i>Scene</i>	<i>Instr.</i>	<i>Datum</i>	<i>Tijd</i>	<i>Transmissie</i>	R_{up} [$W.m^{-2}.$ $s^{-1}.\mu m^{-1}$]	R_{dwn} [$W.m^{-2}.$ $s^{-1}.\mu m^{-1}$]
LE71980242002091EDC01	ETM+	01/04/02	10:22	0.82	1.18	1.95
LE71980242002267EDC00	ETM+	24/09/02	10:21	0.89	0.72	1.22
LE71980242003222EDC01	ETM+	10/08/03	10:22	0.73	2.23	3.51
LE71980242005147ASN00	ETM+	27/05/05	10:23	0.67	2.55	4.05
LE71980242005195ASN00	ETM+	14/07/05	10:23	0.69	2.38	3.78
LE71980242006182ASN00	ETM+	01/07/06	10:23	0.74	2.06	3.30
LE71980242006198ASN00	ETM+	17/07/06	10:23	0.78	1.79	2.90
LE71980242007217ASN00	ETM+	05/08/07	10:24	0.80	1.64	2.66
LE71980242009270ASN00	ETM+	27/09/09	10:24	0.80	1.43	2.32
LE71980242010113ASN00	ETM+	23/04/10	10:26	0.91	0.54	0.93
LE71980242011100ASN00	ETM+	10/04/11	10:27	0.87	1.91	1.52
LT51980242003262MTI01	TM	19/09/03	10:11	0.71	2.25	3.52
LT51980242010249MOR00	TM	06/09/10	10:24	0.83	1.22	2.00
LT51980242010265MOR00	TM	22/09/10	10:24	0.81	1.43	2.33

Tabel 8 : Overzicht van de gedownloade Landsat scenes met opname tijd (UTC) en atmosferische correctie parameters.

We merken dat de acquisitie tijd telkens rond 10:30 GMT ligt wat enigszins spijtig is daar het stedelijke warmte eiland effect eerder tijdens de late avond tot uiting komt.

Op basis van de calibratie coëfficiënten die bij de USGS data geleverd worden kunnen we de ruwe sensor counts omzetten in top-of-atmosphere radianties¹³. De procedure hiervoor gevolgd staat o.a. gedocumenteerd in (Coll, Galve, Sanchez, & Caselles, 2010). De gecalibreerde radianties zijn de waarden die de sensor observeert, deze dienen nog gecorrigeerd te worden voor atmosferische effecten om de radianties aan de grond te verkrijgen, tenslotte dienen de radianties via de Planck relatie omgezet te worden naar de overeenkomstige oppervlakte temperatuur. Er bestaan in de literatuur verschillende methodes om dit te doen van variabele complexiteit en nauwkeurigheid, zie o.a. (Jimenez-Munoz et al., 2009).

¹³ Invallend vermogen op de sensor per m^2 , per ster-radiaal (sr) per golflengte-eenheid (μm).

Hier gaan we echter de methode van (Coll et al., 2010) volgen waarbij de atmosferisch gecorrigeerde radiantie gegeven wordt door :

$$R_c = \frac{R_{TOA} - L \uparrow}{\varepsilon \tau} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} L \downarrow$$

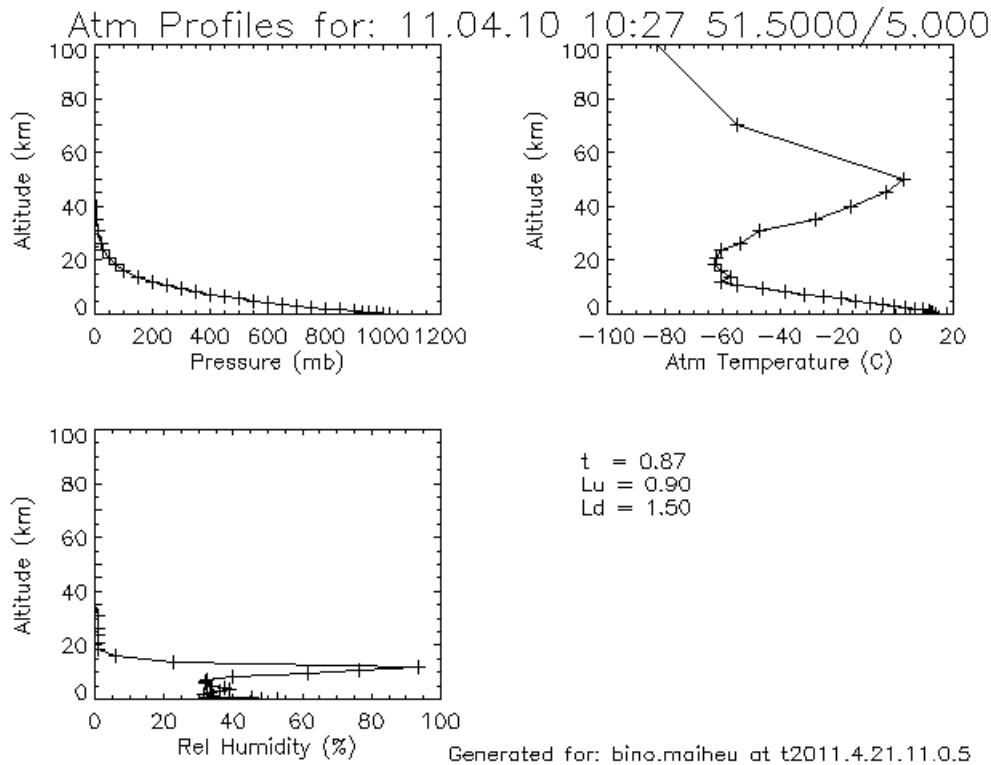
Waarin

- R_c de atmosferische gecorrigeerde radiantie aan het aardoppervlak
- R_{TOA} de “top-of-atmosphere” radiantie aan de satelliet sensor
- ε : de emissiviteit van het aardoppervlak, zijnde een factor die weergeeft in hoeverre de straling uitgezonden door een lichaam met een temperatuur > 0 K afwijkt van een ideale zgn. zwarte straler.
- τ : de transmissiviteit van de atmosfeer
- $L \downarrow, L \uparrow$: de neerwaardse en opwaardse radiantie van de atmosfeer zelf

Alle beschouwde grootheden zijn hier afhankelijk van de golflengte. De transmissiviteit en de op- en neerwaartse radianties zijn eigenschappen van de atmosfeer op het moment van de satelliet opname. Om deze parameters te berekenen bestaat een handig online-tool (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>) dat toelaat deze parameters te berekenen voor een gegeven tijdstip en lokatie op aarde. Dit tool gebruikt de NCEP¹⁴ gemodelleerde atmosfeer profielen samen met de MODTRAN code voor stralingstransfer (J.a. Barsi, Barker, & Schott, 2003; Julia a. Barsi, 2005). Wanneer we de parameters invoeren voor de ETM+ opname van 2011-04-10 vinden we de atmosferische profielen¹⁵ die afgebeeld zijn in Figuur 50.

¹⁴ National Centers for Environmental Prediction (<http://www.ncep.noaa.gov/>)

¹⁵ Merk op dat het NCEP model slechts atmosfeerprofielen tot 16 km geeft, MODTRAN heeft echter profielen nodig tot 100 km hoogte. Het online tool laat ons toe hoe we het atmosfeerprofiel boven 16 km wensen in te vullen, met name met een standaard zomer of winter profiel voor gematigde breedte graden. We selecteren telkens het zomer profiel.



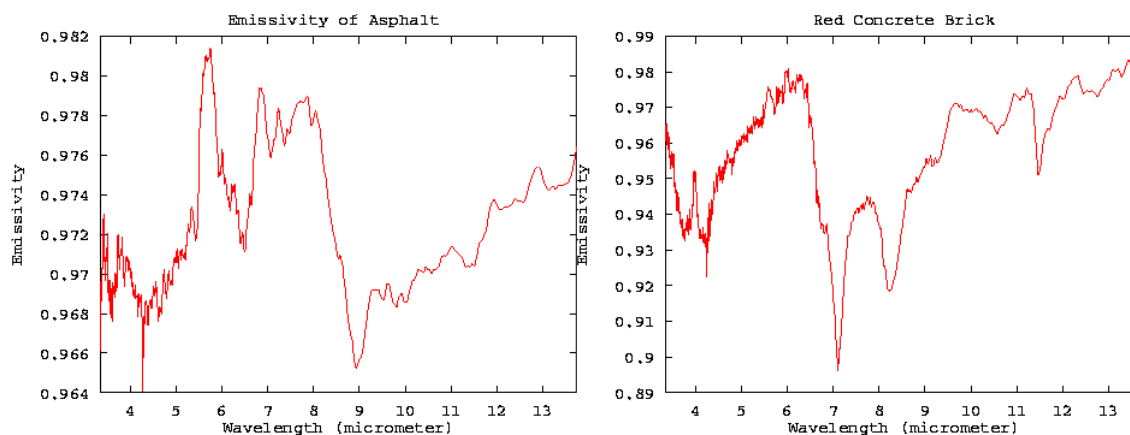
Figuur 50 : Atmosferische profiel voor de ETM+ opname van 2011-04-10 op locatie 51.5° NB, 5° OL.

We vinden voor dit beeld een transmissiviteit τ van 0.87, een neerwaartse resp. opwaartse atmosferische radiantie van 1.50 en 0.90 $W/m^2/sr/\mu m$. In de tabel hogerop hebben we de berekende waarden weergegeven voor de andere scenes.

D.2. Afleiding van de emissiviteit voor de berekening van de oppervlakte temperatuur

We merken dat we hogerop de emissiviteit nodig hebben om de gecalibreerde radianties te berekenen. Deze grootte geeft aan in welke mate een bepaald materiaal afwijkt van een ideale zwart lichaam (black body radiation) wat betreft de emissie van elektromagnetische straling. In traditionele LST algoritmes wordt emissiviteit geparametriseerd op basis van NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Door de heterogeniteit van constructiematerialen in stedelijk gebied is deze aanpak minder geschikt en dienen we op de een of andere manier de emissiviteit te bepalen. In de UCSB Emissivity Library¹⁶ vinden we een databank voor de spectrale emissiviteit voor een groot aantal materialen. Een voorbeeld voor asfalt en rode baksteen is hieronder opgenomen in Figuur 51. Merk op dat de centrale golflengte van het TIR kanaal van beide Landsat instrumenten 12.4 μm bedraagt.

¹⁶ <http://g.ices.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>



*Figuur 51 : Voorbeelden van spectrale emissiviteiten voor asfalt (links) en rode baksteen (rechts).
Bron: UCSB Emissivity Library.*

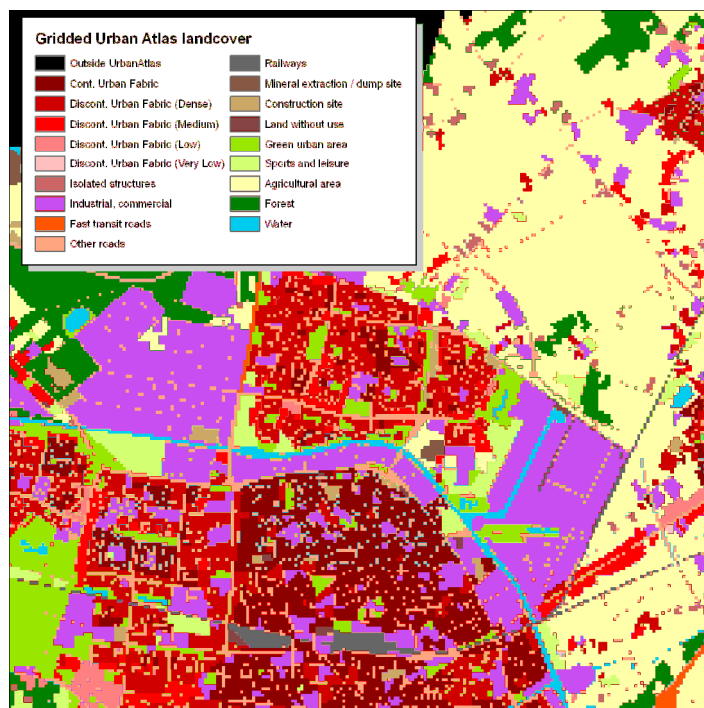
Uiteraard kunnen we niet voor elk materiaal dat gebruikt wordt in de stedelijke omgeving de exacte emissiviteit bij 12.4 μm gaan opnemen, daarvoor is het niveau van detail in beschikbare gegevens ontoereikend. We stellen daarom een parametrisatie voor waarbij we aan elke landgebruiksklasse in de EEA Urban Atlas dataset (zie terug Figuur 54) een karakteristieke emissiviteit toekennen. We houden hierbij vast aan de Urban Atlas dataset, en maken geen gebruik van de ons toegeleverde dataset met verhardingen omdat we toch een vertaalslag dienen te maken naar een meer volledige stedelijke landgebruiksdataset om naast de verhardingen ook nog andere landgebruiken mee te nemen (zoals bvb. waterweten, stedelijk groen etc...).

In een eerste stap gaan we dus de Urban Atlas dataset gaan vergriden naar het rasterformaat van de Landsat beelden (zie Figuur 52), en kennen we aan elke Urban Atlas pixel een karakteristieke emissiviteit toe (gegeven in de tabel hieronder).

Klasse	Beschrijving	Emissiviteit bij 12.4 μm	Commentaar / Aannames
0	Landsat beeld buiten Urban Atlas zone	0.960	Niet zo belangrijk, enkel geïnteresseerd in Tilburg
11100	Continuous Urban Fabric S.L. > 80 %	0.955	Neem aan 90 % beton, 10 % grond
11210	Discontinuous Dense Urban Fabric S.L. 50 - 80 %	0.960	Neem aan 65 % beton, 35 % grond
11220	Discontinuous Medium Urban Fabric S.L. 30 - 50 %	0.965	Neem aan 40 % beton, 60 % grond
11230	Discontinuous Low Density Urban Fabric S.L. 10 - 30 %	0.969	Neem aan 20 % beton, 80 % grond
11240	Discontinuous Very Low Density Urban Fabric SL < 10 %	0.972	Neem aan 5 % beton, 95 % grond
11300	Isolated Structures	0.955	We nemen gelijk waarde als Continuous Urban Fabric
12100	Industrial commercial public military and private units	0.962	50 % asfalt en 50% beton
12210	Fast transit roads and associated land	0.970	100 % asfalt
12220	Other roads and associated land	0.970	100 % asfalt
12230	Railways and associated land	0.953	
12300	Port areas	0.967	Neem aan 80 % asfalt, 20 % beton
12400	Airports	0.970	100 % asfalt
13100	Mineral extraction sites and dump sites	0.973	We nemen naakte grond (*)
13300	Construction sites	0.973	idem
13400	Land without current use	0.973	idem

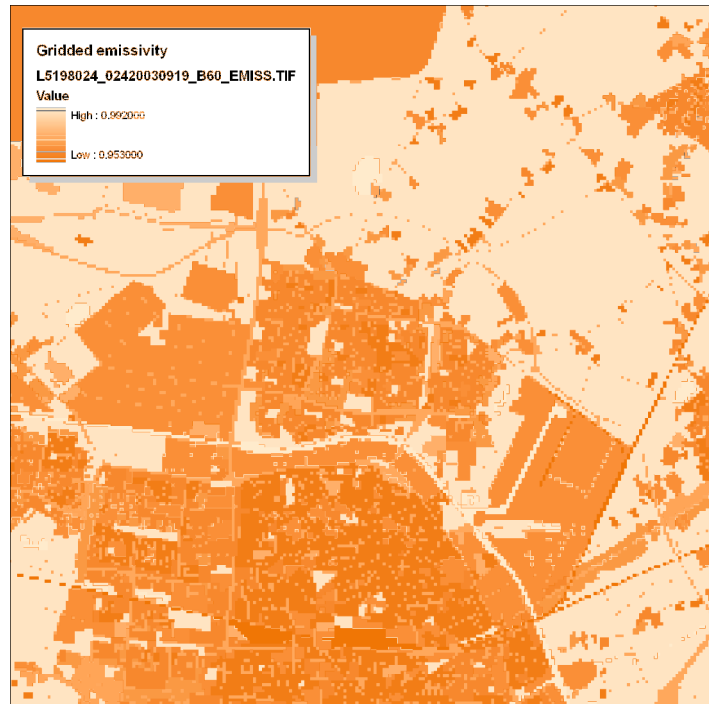
14100	Green urban area	0.990	Neem aan puur vegetatie (*)
14200	Sports and leisure facilities	0.990	idem
20000	Agricultural semi-natural and wetland areas	0.990	idem
30000	Forest	0.990	idem
50000	Water	0.992	Water

Tabel 9 : Gekozen emissiviteiten voor de gebruikte klassen in de Urban Atlas dataset. (*) We gebruiken voor naakte grond het gemiddelde van 49 bodem emissiviteiten in de ASTER spectrale bibliotheek, zie : J.A. Sobrino et al./ Remote Sensing of Env. 90 (2004) 434-440.



Figuur 52 : Vergridde Urban Atlas landgebruiksklassen, op het grid voor een van de geselecteerde landsat beelden.

De resulterende emissiviteitkaart voor het desbetreffende beeld is gegeven in de figuur hieronder.



Figuur 53 : Resulterende emissiviteiten kaart op basis van de klassificatie in Tabel 9.

Aan de hand van de op deze manier afgeleide emissiviteiten kunnen we de top-of-atmosphere radianties corrigeren voor atmosferische effecten en kunnen we de helderheidstemperatuur voor het thermisch infrarode kanaal afleiden. De procedure voor atmosferische correctie is hoger gegeven, voor het afleiden van de TIR helderheidstemperatuur passen we eenvoudigweg de wet van Planck toe, zie ook :

$$T_b = \frac{K_1}{\ln\left(\frac{K_2}{R_c} + 1\right)}$$

Waarbij K_2 en K_1 constanten zijn die verschillen voor het TM en het ETM+ instrument, zie (Coll et al., 2010). Alle geproceste, resulterende LandsAT beelden zijn hierboven in appendix C opgenomen.

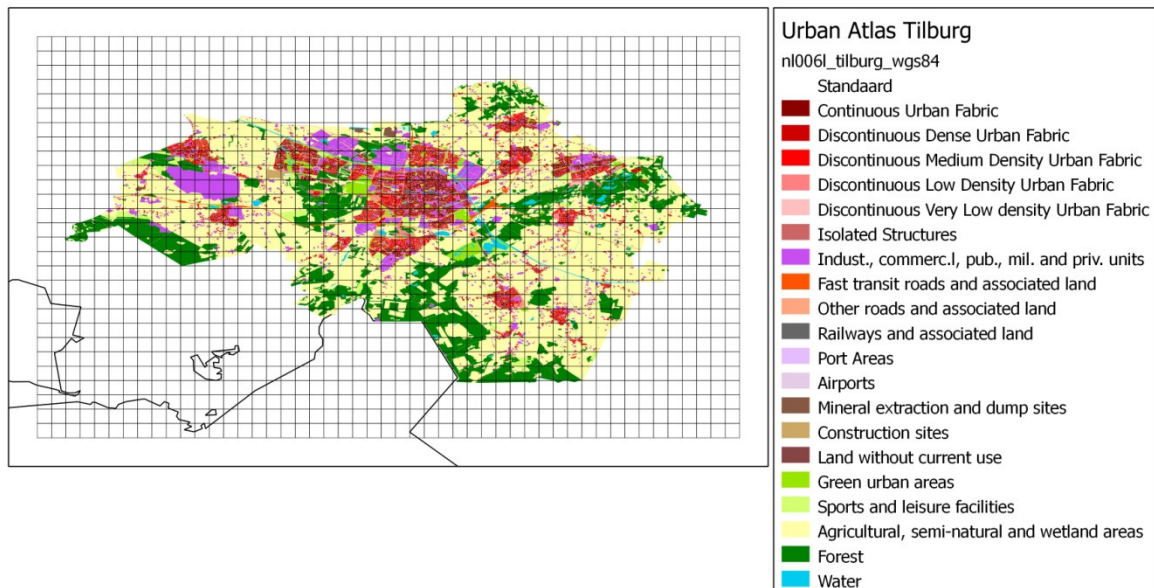
BIJLAGE E : BESPREKING VAN DE GEBRUIKTE DATABRONNEN VOOR HET VITO STEDELIJK KLIMAATMODEL.

In deze bijlage zullen we kort bespreken welke de individuele databronnen zijn die we gebruikt hebben voor het opstellen van de UCM run voor Tilburg. Hun rol in het model is hoger schematisch weergegeven en besproken.

E.1 MODEL GRID

Een eerste stap in de configuratie van het UCM is de definitie van het modelgrid, waarop we de modellering zullen uitvoeren. Zoals hoger reeds vermeld, werkt het UCM met 1 km TIR beelden en dienen we dus een grid resolutie van 1 km te handhaven. Een grafische voorstelling van het model grid is afgebeeld in Figuur 54 hieronder, waarbij we de Urban Atlas data op het grid hebben weergegeven om een idee te geven van de resolutie. Uiteraard is deze resolutie nogal grofmazig, i.e. het binnenstedelijk gebied van Tilburg beslaat slechts een 5x4 pixels, wat het moeilijk maakt om ruimtelijke detailinformatie af te leiden. We zullen dan ook na de modellering op 1 km aan de hand van hoge resolutie Landsat data de modelresultaten ruimtelijk verfijnen, dit zal besproken worden in 4.4.

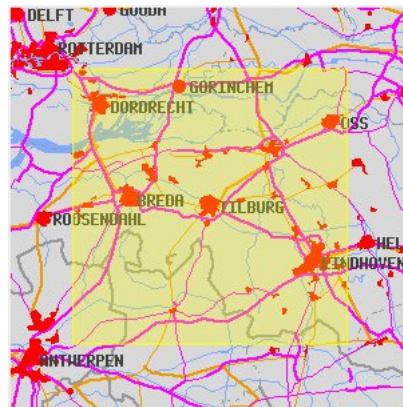
We kozen om het model grid regelmatig in lat/lon coördinaten (WGS84) te houden, met een resolutie van 0.01° in zowel zuid-noordelijke als west-oostelijke richting. Dit komt ongeveer overeen met 1 km. Als linker bovenhoek nemen we 51.67° NB, 4.81° OL, en voor de rechter benedenhoek 51.39° NB, 5.30° OL. Het grid telt bijgevolg 28x49 gridcellen, zie figuur hieronder.



Figuur 54 : Afbeelding van het regelmatig latitude / longitude grid dat we gebruiken voor de luchttemperatuur modellering. In het grid is de EEA Urban Atlas landgebruiksdataset voor Tilburg afgebeeld, bron: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas> .

E.2 LAGE RESOLUTIE OPPERVLAKTETEMPERatuur (LST – 1km)

Een cruciale input parameter voor het UCM is de oppervlakte temperatuur¹⁷ afgeleid van satelliet observaties. In dit project maken we gebruik van vrij beschikbare LST afkomstig van het MODIS instrument aan boord van de EOS-Terra en EOS-Aqua satellieten (NASA). Via de WIST¹⁸ interface kan een spatiale en temporele selectie gemaakt worden (zie bijlage A) van overlappende LST producten afkomstig van de MODIS instrumenten. We selecteren de producten die overlappen met de geografische bounding box afgebeeld in Figuur 55. Deze data bestanden geven de LST waarden in swaths van 5 minuten met het meest recente LST verwerkings algoritme (Collection V005). Alle LST retrievals tussen **1 mei 2010** en **30 september 2010** (zomerseizoen) hebben we afgehaald. Technische details omtrent de berekeningswijze van de oppervlakte temperatuur kunnen teruggevonden worden in (Wan, 1999, 2007).



Figuur 55 : Bounding box voor MODIS LST data bestanden.

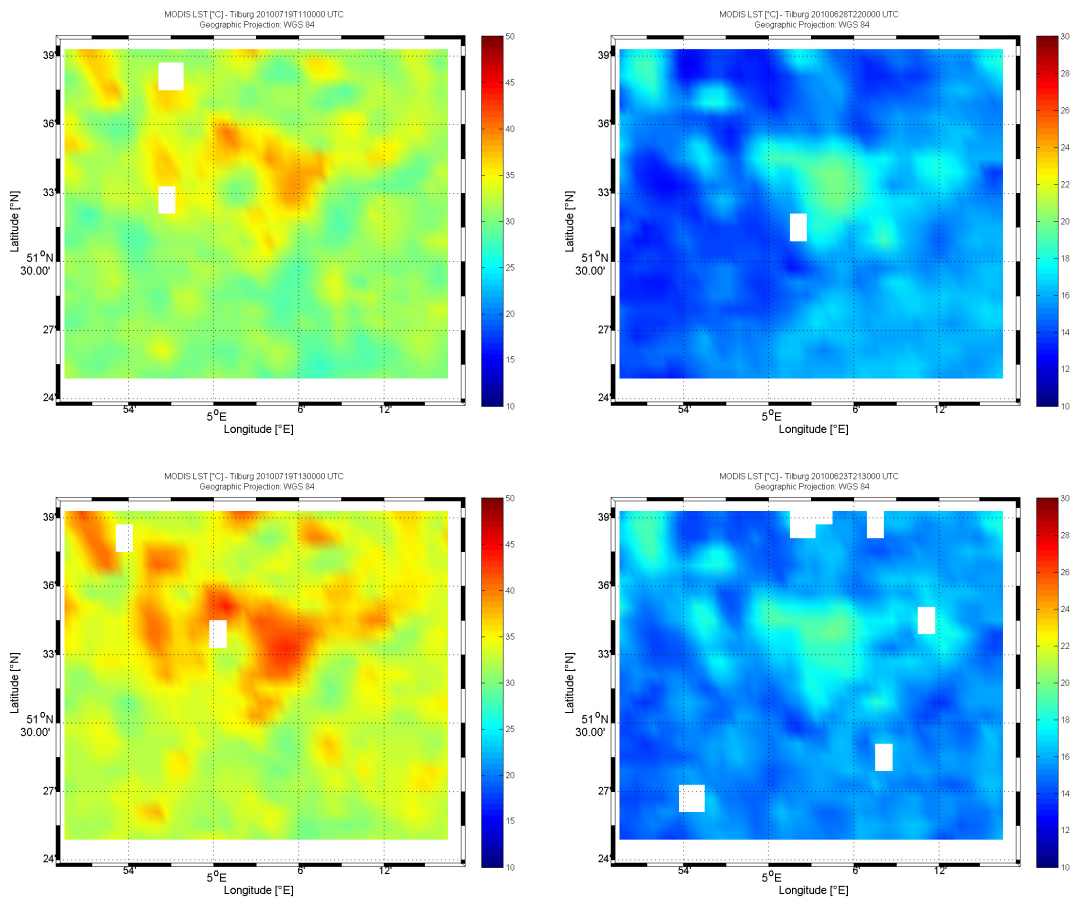
Daar het hier om swath data gaat, dienen we nog een herprojectie door te voeren op een gemeenschappelijk grid dat we ook voor de modellering zullen gebruiken (zie 0). Deze herprojectie doen we aan de hand van het MRTSwath¹⁹ tool, beschikbaar gesteld door LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center). Het feit dat dit tool geen ondersteuning biedt voor oblique stereographic projectiesystemen (zoals het Nederlands projectie systeem Amersfoort RD) was een van de redenen om het modelgrid in geografische coördinaten uit te drukken.

In Figuur 56 hieronder hebben we enkele quicklooks van de MODIS 1 km LST data op het model grid weergegeven. Voor enkele heldere dagen merken we duidelijk het stedelijk warmte eiland van Tilburg op. Ook het verschil tussen de situatie in de voormiddag (Figuur 56 links), met hele grote verschillen tussen ruraal en stedelijk gebied inzake oppervlakte temperatuur ($\sim 10^\circ\text{C}$) en in de late avond (Figuur 56 rechts), waar nog altijd duidelijk een warmer verstedelijkt gebied zichtbaar is, maar met iets minder uitgesproken verschillen in oppervlakte temperatuur ($\sim 5^\circ\text{C}$).

¹⁷ Land Surface Temperature of LST

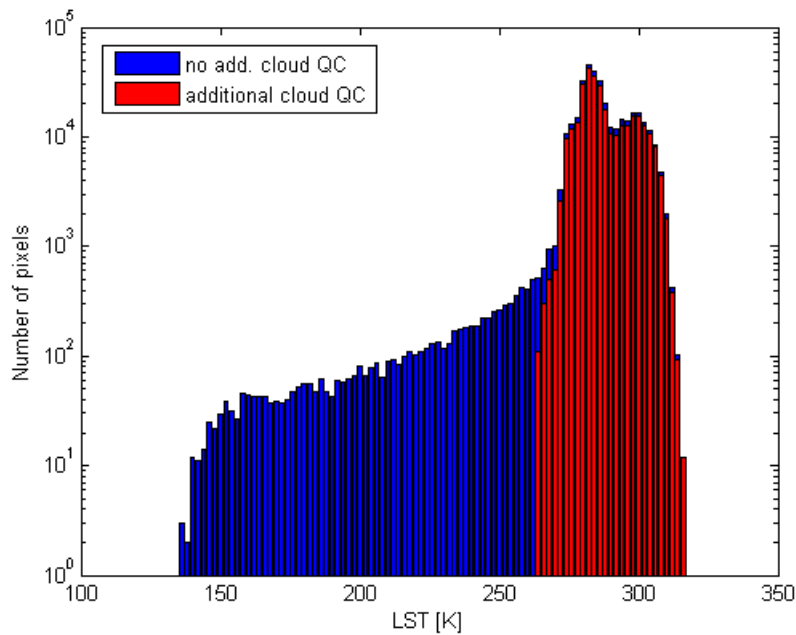
¹⁸ Warehouse Inventory Search Tool, zie : <https://wist.echo.nasa.gov/~wist/api/imswelcome/>. These data are distributed by the Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), located at the U.S. Geological Survey (USGS) Earth Resources Observation and Science (EROS) Center (lpdaac.usgs.gov).

¹⁹ https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/modis_reprojection_tool_swath



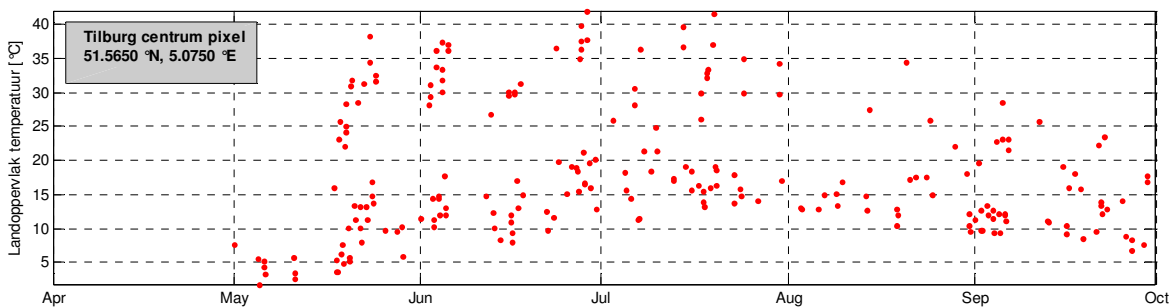
Figuur 56 : Enkele voorbeelden van 1 km MODIS LST data voor Tilburg. We zien telkens in de links een beeld overdag en rechts een beeld 's nachts. Bovenaan zien we de opname voor 19/7/2010 - ~11:00 UTC links en rechts 28/6/2010 - ~22:00 UTC, onderaan links 19/7/2010 - ~13:00, rechts 23/6/2010 ~21:30 UTC. Dit lege pixels zijn ontbrekende waarden in de data.

De routines van het UCM voor het pre-processen van de LST beelden werden aangepast zodat ze het MODIS product kunnen verwerken in plaats van het ESA Urban Heat Islands project LST product. We dienen verder nog op te merken dat we een kwaliteitscontrole hebben doorgevoerd in de LST data, waarbij we pixels die gecontamineerd zijn door wolken hebben weggelaten uit de modellering. Het effect van deze kwaliteitscontrole wordt geïllustreerd in Figuur 57 hieronder.



Figuur 57 : Effect van de kwaliteitscontrole bits in de MODIS L2 LST data. Het rode histogram toont de LST waarden die we overhouden wanneer we de pixels die door wolken gecontamineerd zijn weglaten.

We merken duidelijk dat de pixels gecontamineerd zijn door wolken veel lagere “oppervlakte temperaturen” vertonen, immers wolken gaan de IR straling absorberen en zelfs terugkaatsen naar het aardoppervlak. Hierdoor bereikt een deel van de uitgestraalde energie de TIR sensor aan boord van de satelliet niet en lijkt het aardoppervlak dus koeler. Het meenemen van dergelijke pixels in de modellering zou dus een nefaste invloed hebben op de beoogde resultaten.

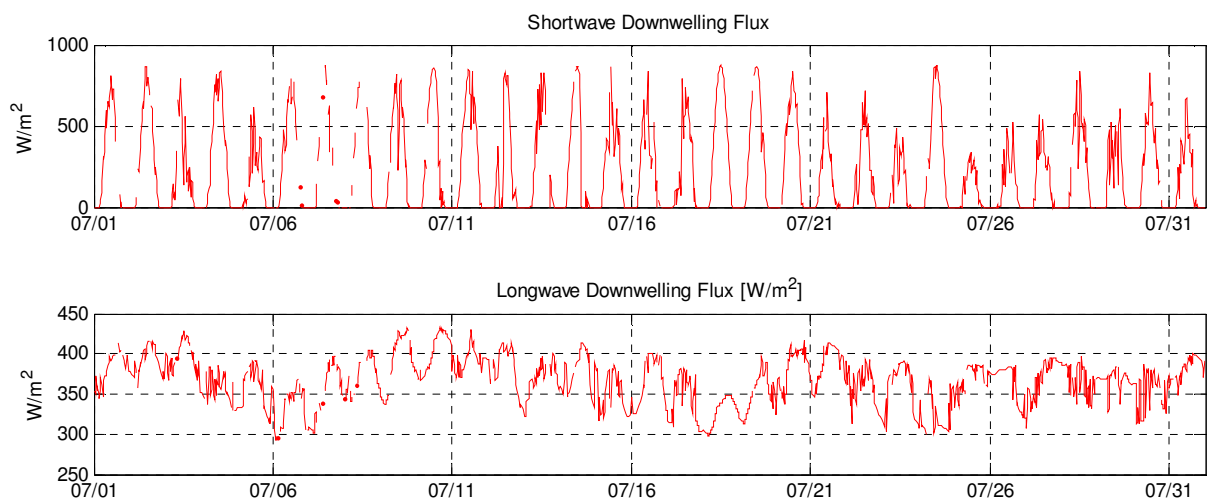


Figuur 58 : Tijdsreeks van MODIS LST voor een 1 km pixel over het centrum van Tilburg (51.565 °N, 5.0750°E)

In de Figuur 58 hierboven is een voorbeeld van de LST tijdsreeks voor een 1 km pixel in het centrum van Tilburg weergegeven. We merken duidelijk dat er nogal wat gaten in de observaties aanwezig zijn ten gevolge van bewolking. Desalniettemin lijkt de LST data de dagelijkse amplitude van LST variatie toch tot op zekere hoogte te capteren, iets wat een voorwaarde is voor succesvolle data assimilatie in de sensible heat flux module.

E.3 NEERWAARDSE LANGE GOLF EN KORTE GOLFSTRALING

Het UCM heeft naast oppervlakte temperatuur, zoals aangegeven in Figuur 23, verder nog informatie nodig over de korte en lange golf neerwaardse fluxen aan de grond om de energie balans op het oppervlak te bepalen. Deze informatie werd opgevraagd bij het LandSAF archief²⁰, welke afgeleide producten aanbied van het SEVIRI instrument aan boord de geostationaire Meteosat Second Generation satelliet. Het is zo dat de LandSAF data, ondanks de hoge temporele resolutie van 15 minuten, echter op een relatief grofmazige ruimtelijke resolutie gegeven wordt (~4-5 km), we interpoleren dan ook deze data bilineair naar het vooropgestelde 0.01° grid van Figuur 54. Hier dient geen meer complexe downscaling te gebeuren daar we een resolutie van 4 km voldoende achten om de effecten van bewolking en in het model in rekening te brengen. In Figuur 59 hieronder wordt opnieuw een tijdsreeks gegeven van de neerwaartse stralingsflux van korte en lange golfstraling aan het aardoppervlak.



Figuur 59 : Tijdsreeks van neerwaartse korte- (boven) en langegolf (onder) stralingsfluxen aan het aardoppervlak voor een pixel boven het centrum van Tilburg (zie Figuur 58) voor de maand Juli 2010.

Op basis van deze stralingsfluxen wordt in elke 1 km pixel de energie balans aan het oppervlak berekend (zie hoger).

E.4. KARAKTERISTIEKEN VAN HET OPPERVLAK

→ Fractional vegetation cover

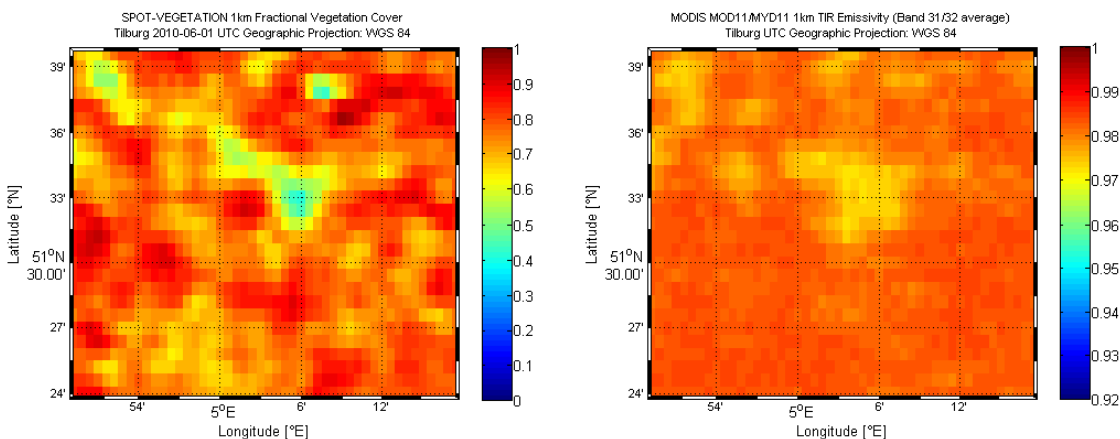
De fractie vegetatie in elke pixel wordt afgeleid op basis van 10-daagse NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) composietbeelden afkomstig van het SPOT-VEGETATION instrument. Deze data is vrij beschikbaar en kan worden opgevraagd op <http://free.vgt.vito.be/>. Deze index wordt gedefinieerd als

²⁰ <http://landsaf.meteo.pt/>

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

waarbij R_{VIS} en R_{NIR} de reflectantie (hoeveelheid weerkaatste straling) in resp. het visuele (0.4 – 0.7 μm golflengte) en nabij-infrarode (0.7 – 1.1 μm golflengte) deel van het spectrum. De achterliggende idee is het feit dat planten zonnestraling absorberen in het fotosynthetisch actieve stralings gedeelte van het spectrum (0.4 - 0.7 μm) om aan fotosynthese te kunnen doen. De bladcellen echter zijn zodanig geëvolueerd dat ze de zonnestraling in het nabije-infrarode deel van het spectrum (~50 % van de invallende energie) weerkaatsen. De energie van deze straling is te laag om aan fotosynthese te kunnen doen en een te sterke absorptie in dit deel van het spectrum zou tot overhitting en dus vernietiging van de planten leiden. Planten zien er dus m.a.w. relatief donker uit in het visuele deel van het spectrum, maar relatief helder in het nabij-infrarode deel van het spectrum. Hoe meer bladeren, hoe sterker dit effect. De hoger gedefinieerde index geeft hieraan een kwantificatie, en kan dus handig gebruikt worden om de fractie vegetatie in een pixel af te leiden.

Voor het hoger beschreven grid werd dus de fractional vegetation cover, die we uit de NDVI herschalen tussen 0 en 1. Daar het UCM model dagelijkse waarden voor de vegetatie bedekking verwacht hebben we de 10-daagse composieten in de tijd geïnterpoleerd.



Figuur 60 : Links : SPOT-VEGETATION fractionele vegetatie index voor Tilburg op 1 juni 2010, Rechts : Emissiviteit afgeleid van de MODIS MOD11/MYD11 data. We nemen eenvoudigweg het gemiddelde van de TIR banden 31 en 32.

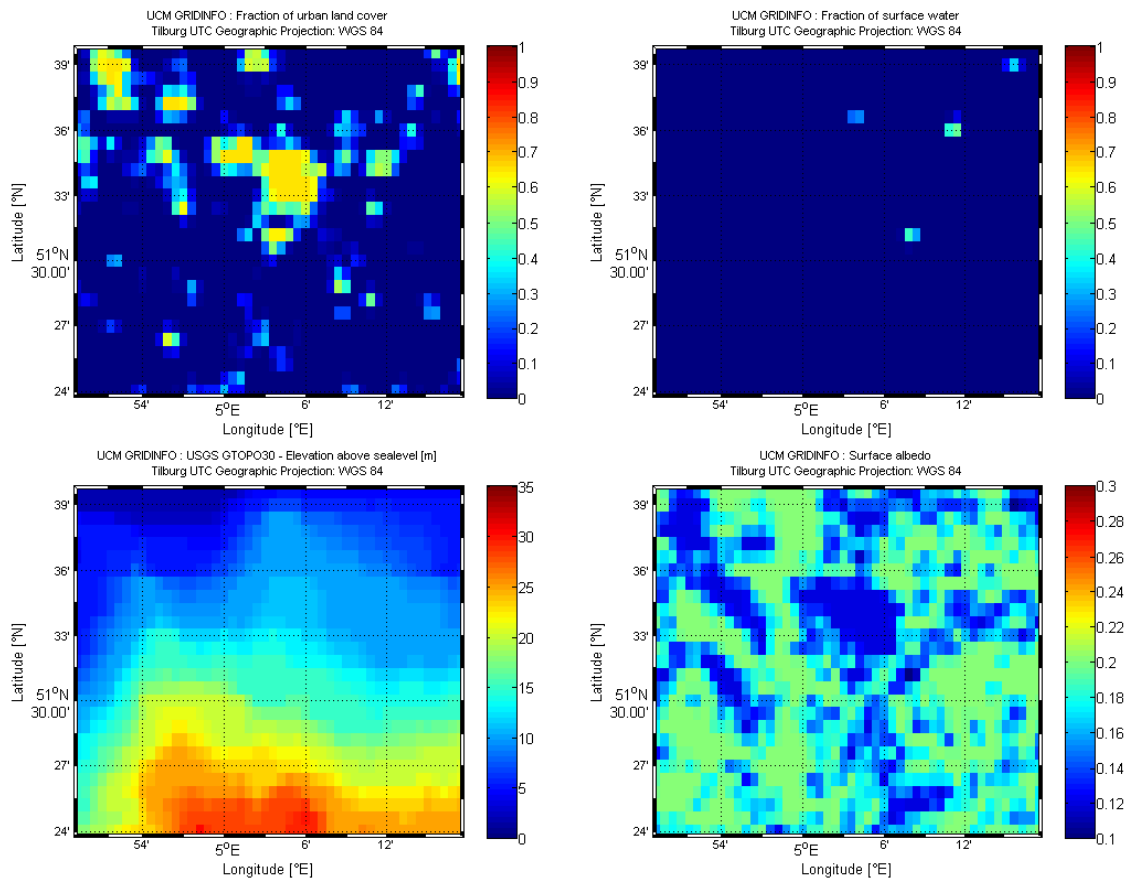
→ **Emissiviteit**

Daar we in het UCM de energie balans van het oppervlak reconstrueren dienen we ook de emissiviteit van het oppervlak in rekening te brengen om de uitgestraalde energie voor een bepaalde LST waarde te kunnen berekenen. Op zich is de waarde van emissiviteit niet zo heel kritisch in het UCM model en zullen we eenvoudigweg de emissiviteiten, die in de MODIS L2 LST data aanwezig zijn uitmiddelen over de 2 thermische kanalen (band 31 en 32). Dit is afgebeeld in Figuur 60 rechts.

Merk op dat voor het downscalen aan de hand van hoge resolutie LST data de emissiviteit echter wel enorm belangrijk gaat zijn. De grootheid speelt namelijk een cruciale rol in het berekenen van de LST waarden voor data afkomstig van Landsat.

→ **Statische gridparameters**

Hier geven we tenslotte nog de andere statische modelparameters weer die we afleidden uit de preprocessing op het grid dat voor Tilburg werd gedefinieerd. Allereerst werd de fractie verstedelijkt gebied voor elke pixel afgeleid uit de CORINE land cover dataset²¹, deze fractie dient geïnterpreteerd te worden als een fractie bebouwd oppervlak binnen de 1 km pixel. Daarnaast berekenden we voor elke pixel op basis van dezelfde CORINE dataset ook de fractie aan water en de hoogte boven de zeespiegel. Deze laatste parameter werd bepaald op basis van de GTOPO30 dataset²².



Figuur 61 : Vaste grid parameters gebruikt in de Urban Climate model run voor Tilburg. We zien bovenaan links de fractie stedelijk gebied (sealed surface) in elke pixel, rechts de fractie oppervlakte water. Onderaan links zien we de terreinhoogte en rechts de albedo.

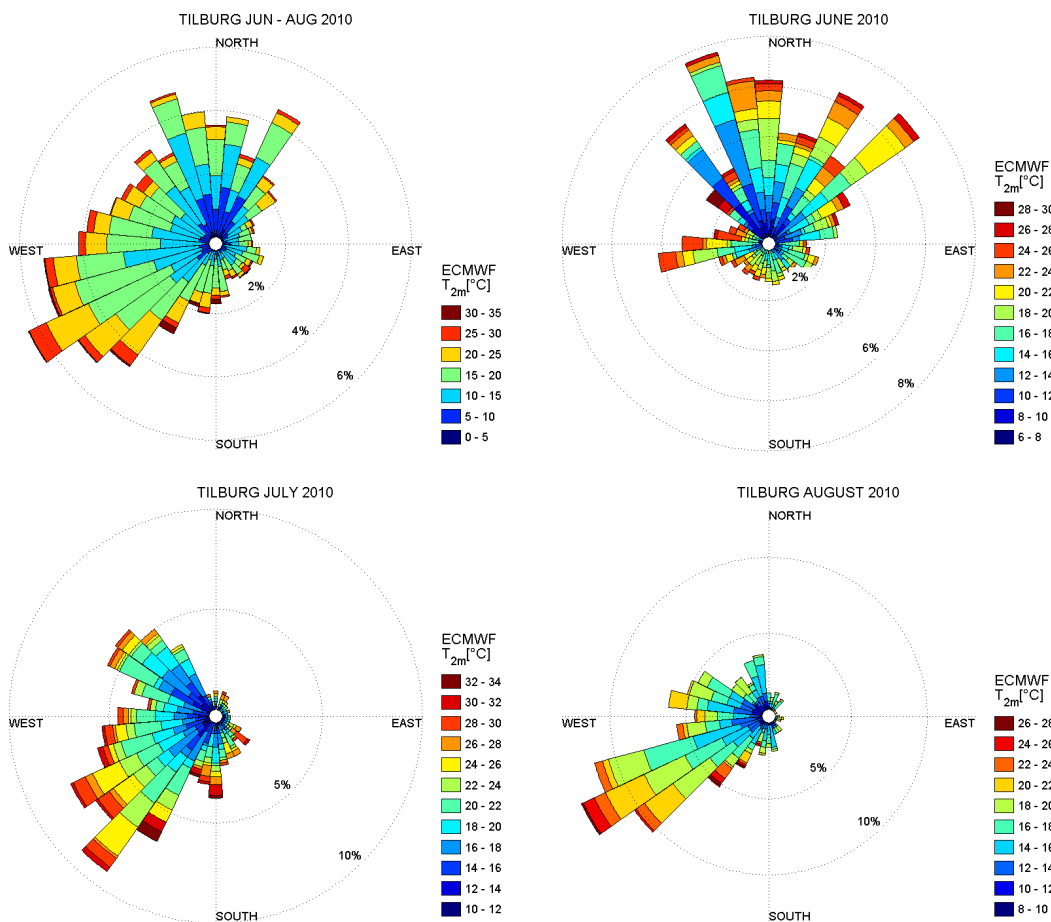
²¹ <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster>. Deze Europese landgebruiksdataset bevat 44 land stedelijke, rurale en agrarische landgebruiksklassen. De dataset wordt uitgegeven door de European Environmental Agency (EEA) en is vrij beschikbaar voor onderzoeksdoeleinden.

²² http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30_info. De GTOPO30 dataset is een digitaal terrein model (DEM) met een horizontale resolutie van 30 boogseconden en is samengesteld op basis van verschillende datasets (zie website). De GTOPO30 dataset is ontwikkeld in internationale collaboratie door de het Earth Resources Observation and Science (EROS) centrum van de US Geological Survey (USGS).

De albedo²³ waarden werden bepaald aan de hand van een parametrisatie die typisch in mesoschaal meteorologische modellen gebruikt wordt. Dergelijke parametrisaties drukken albedo uit als functie van landgebruiksinformatie.

→ **ECMWF randvoorwaarden**

Naast de hierboven besproken randvoorwaarden heeft het atmosferisch dispersie model ook nog nood aan randvoorwaarden die de grootschalige meteorologische effecten in rekening brengen. Deze randvoorwaarden halen we uit ECMWF ERA-Interim gegevens. Het European Centre for Medium Range Weather²⁴ forecasts stelt een re-analyse dataset ter beschikking gebaseerd op het ECMWF globaal meteorologisch model en een data assimilatie stap om zodoende tot een archief te komen wat de meest accurate grootschalige (1.5° gridresolutie) toestand van de atmosfeer weergeeft. Op basis van deze gegevens worden in het atmosferische gedeelte van het UCM de randvoorwaarden afgeleid.



Figuur 62 : Windrozen met de meest frequente windrichting en de overeenkomstige waarden voor de grootschalige temperatuur op basis van ECMWF ERA-Interim data, geïnterpoleerd op de locatie van Tilburg. Linksboven: gemiddeld voor Juni – Augustus, de andere plots resp. juni t.e.m. augustus apart.

²³ Zijnde de fractie van het zonlicht (korte golf straling) die weerkaatst wordt door het oppervlak.

²⁴ <http://www.ecmwf.int>

Figuur 62 hierboven geeft enkele windrozen weer op basis van de grootschalige ECMWF velden voor de zomer periode in 2010. We merken dat tijdens de maand Juni de wind voornamelijk uit het noorden afkomstig was om in tijdens de zomermaanden van Juli en Augustus naar het Zuid-Westen te keren, wat overeenkomt met de dominante windrichting voor deze contreien. We merken ook dat de hoogste temperaturen zich tijdens de maand July laten optekenen.

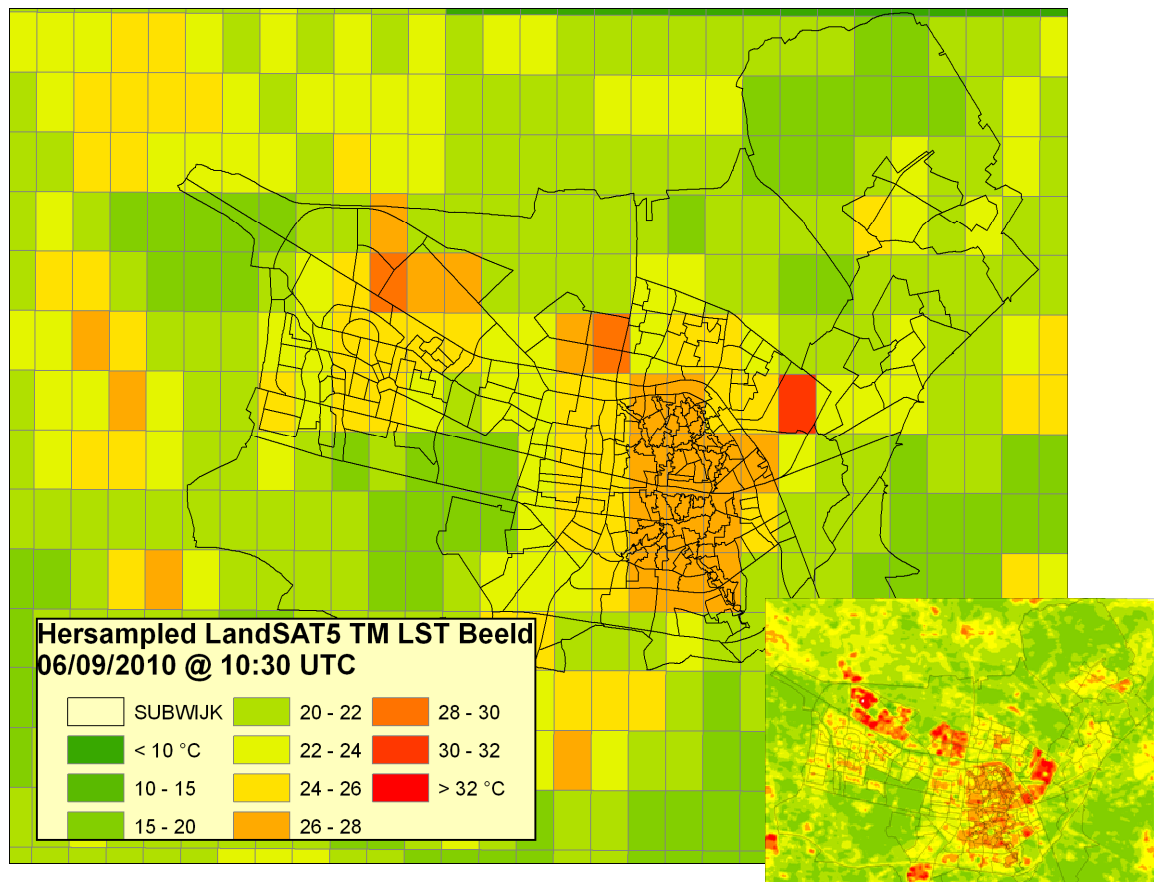
BIJLAGE F : DOWNSCALING VAN DE VITO URBAN CLIMATE MODEL OUTPUT OP LAGE RESOLUTIE

F.1. Hersampling van de hoge resolutie Landsat LST naar het UCM grid en regressie

Gezien we deze kaart gaan gebruiken om de 1 km luchttemperatuur te downscalen naar hogere resolutie, dienen we deze hoge resolutie kaart te hersamplen naar het 1 km grid dat we voor de luchttemperatuursmodellering gebruikt hebben. Het is belangrijk hier ook op te merken dat we niet zomaar de hoge resolutie luchttemperatuur kunnen uitmiddelen over de 1 km gridcellen. Het gaat hier immers om stralingstemperatuur, en bijgevolg is het belangrijk de oppervlakte temperatuur om te zetten naar het uitgestraalde totale vermogen bij 12.4 μm (centrale golflengte van het Landsat TIR kanaal) via de wet van Planck :

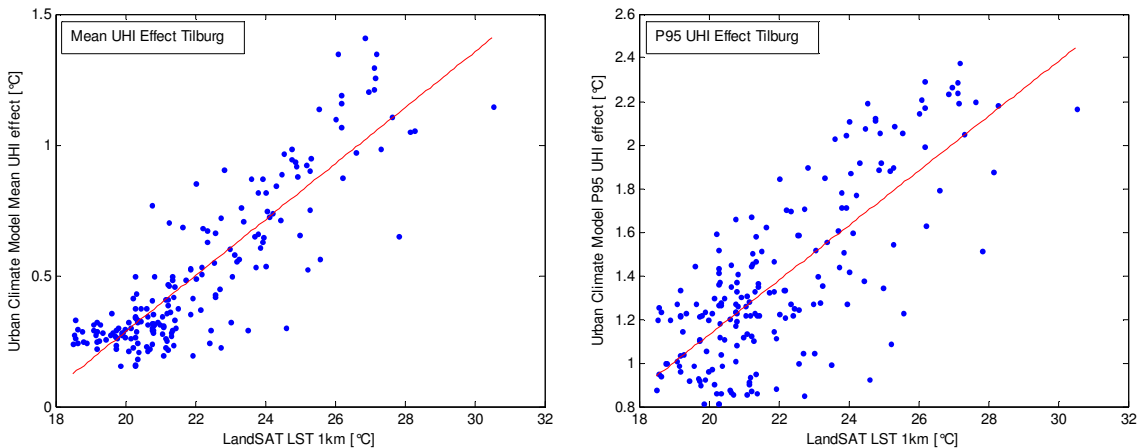
$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Waarin c de lichtsnelheid, h de constante van Planck, k de constante van Boltzmann, λ de golflengte en T de stralingstemperatuur. Eens we de spectrale intensiteiten op het 1 km grid berekend hebben, kunnen we die weer omrekenen naar stralingstemperatuur. We dienen hier op te merken dat we in deze omrekening de emissiviteit hebben verwaarloosd (= 1) en dus uitgaan van de Planck functie van een zwarte straler.



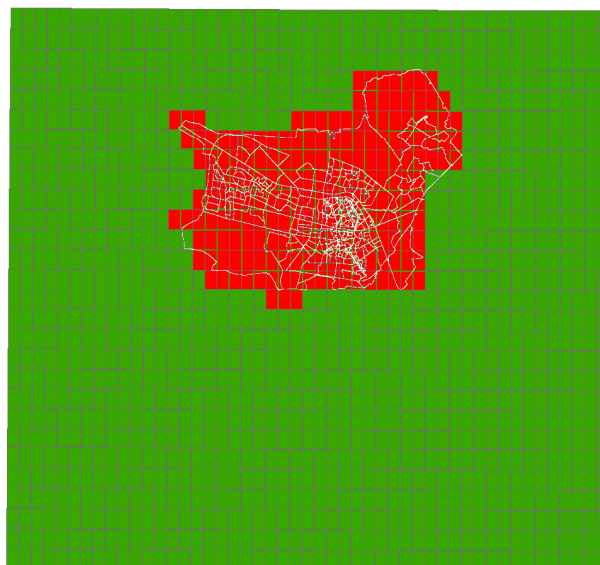
Figuur 63 : Hersampled LST beeld naar het UCM grid op 1x1 km. Het Originele LST beeld werd rechtsonder nogmaals weergegeven.

Aan de hand van dit hersampled LST beeld gaan we een regressie analyse uitvoeren welke de pixels van het 1 km LST beeld correleren met de bekomen resultaten van de modelberekeningen uit .



Figuur 64 : Regressie analyse tussen de geresamplede 1 km LST waarden en de UCM modelresultaten voor het gemiddelde UHI effect in Tilburg (links) en het P95 effect rechts.

De regressie analyse werd enkel uitgevoerd voor die pixels welke overlappen met de administratieve grensen van Tilburg. Dit masker is afgebeeld in Figuur 65 hieronder.



Figuur 65 : Downscaling masker. Enkel de rode gridcellen werden voor de regressie analyse in rekening gebracht.

We vinden dat de berekende UCM street canyon luchttemperaturen relatief goed correleren met de LandSAT LST waarden. Voor het gemiddelde UHI effect vinden we een correlatie coëfficiënt R^2 van 0.76 en voor het 95^{ste} percentiel een R^2 van 0.59. De vergelijkingen van de afgebeelde regressie rechten zijn :

$$UHI_{\text{mean}} = 0.1071 \cdot LST - 1.8560$$

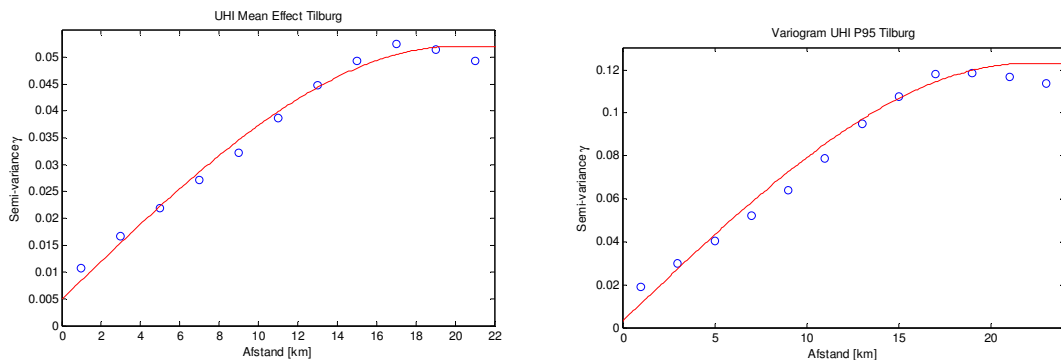
$$UHI_{P95} = 0.1255 \cdot LST - 1.3814$$

F.2. Downscaling aan de hand van Ordinary Kriging

Vervolgens kunnen wij deze regressie vergelijking aftrekken van de gemiddelde luchttemperatuur op het 1 km. Dit betekent concreet dat we het deel van de luchttemperatuur dat verklaard wordt door het geresampled LST beeld gaan wegnemen. Dit residu of overschot gaan we vervolgens interpoleren naar het hoge resolutie landsat grid aan de hand van de Ordinary Kriging²⁵ techniek. Dit is een wijd verspreide geostatistische interpolatie techniek die onder bepaalde voorwaarden de best mogelijke inschatting geeft van een ruimtelijke variabele op een onbekende locatie, gegeven een aantal metingen. Een van de eigenschappen van deze interpolatie techniek is dat er een ruimtelijk continuïteitsmodel moet opgesteld worden, een zogeheten variogram. Dit variogram is gedefinieerd als zijnde de verwachtingswaarde (gemiddelde) van de kwadratische verschillen tussen observaties van een veld geospatiaal veld Z die een afstand h van elkaar verwijderd zijn, i.e.:

$$2\gamma(h) = \mathbf{E} [(Z(x) - Z(x+h))^2]$$

Het gebruikte variogram voor het luchttemperatuursresidu veld is gegeven in Figuur 66 hieronder.



Figuur 66 : Variogram voor de interpolatie van het ruimtelijk residu. De blauwe datapunten geven het experimentele variogram weer, de rode lijn het gebruikte model. Links is het variogram voor de residues voor het gemiddelde UHI effect te zien, rechts voor het 95^{ste} percentiel.

We modelleren dit variogram met een sferisch model van de volgende vorm

$$2\gamma(h) = a \left(\frac{3h}{2r} - \frac{h^3}{2r^3} \right), \quad h < r$$

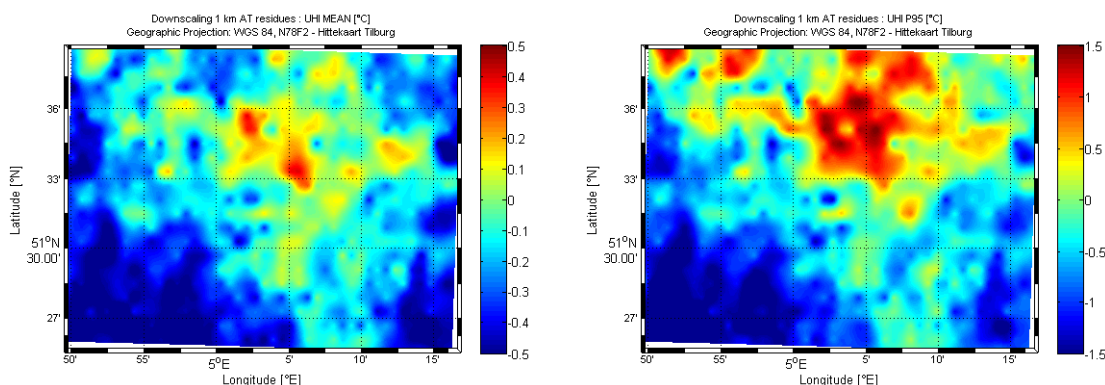
$$2\gamma(h) = a, \quad h \geq r$$

Waarbij $a = 0.047$, de zogeheten *sill* van het variogram en $r = 20$ km de *range* voor het gemiddelde en $a = 0.120$ en $r = 22$ km voor het P95 effect. We houden het variogram model constant voorbij de range r van het sferisch model. De reden hiervoor is dat we geen lange afstandscorrelaties wensen

²⁵ Zie ondermeer N. Cressie, Statistics for spatial data, 1993 en vele andere bronnen.

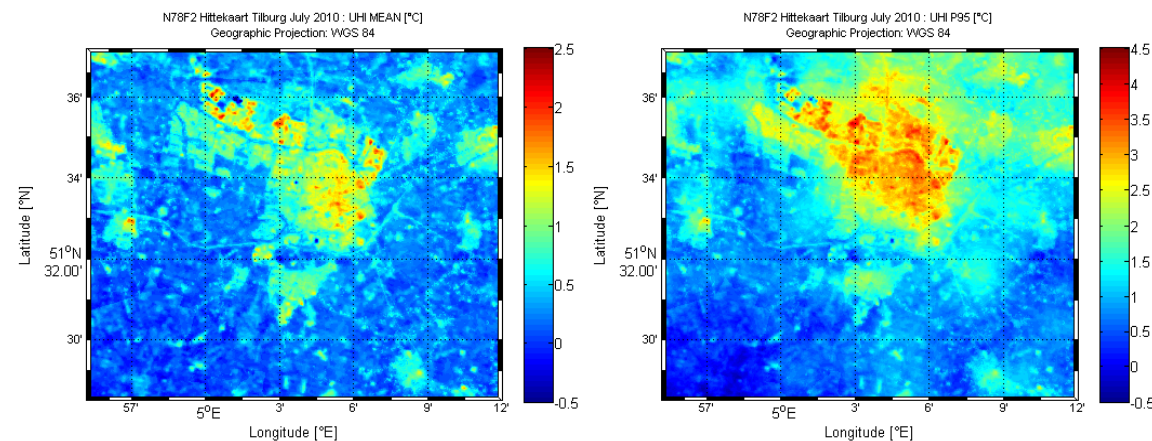
mee te nemen in de interpolatie. Pixels die verder van 20 km van elkaar liggen zullen aan beide kanten van Tilburg liggen en zijn dus minder belangrijk voor de luchttemperatuur in het binnenstedelijk gebied.

Aan de hand van dit semi-variogram kunnen we de Ordinary Kriging methodiek toepassen en interpoleren we de luchttemperatuurs residues t.o.v. de LST regressie lijn naar het 30 m Landsat grid. Daar de cut-out uit het Landsat grid boven Tilburg die we gebruiken 1034 x 788 = 814792 pixels telt is de interpolatie via Ordinary Kriging in MATLAB relatief tijdrovend. De berekening werd dan ook geparalleliseerd en er werd gebruik gemaakt van de linux computing cluster van de atmosfeer groep op VITO om de residus te interpoleren. Het resultaat van deze bewerking kan men zien in Figuur 67 hieronder.



Figuur 67 : Luchttemperatuur residus via Ordinary Kriging geïnterpoleerd naar het 30 m landsat grid. Links voor het gemiddelde UHI effect, rechts voor het 95^{ste} percentiel.

Wanneer we de geïnterpoleerde residus optellen bij de regressie rechte toegepast op de hoge resolutie LST data, vinden we finaal de hoge resolutie gemiddelde UHI intensiteit en de P95 kaart voor Tilburg.



Figuur 68 : Gedownscalede UHI kaarten (gemiddeld effect links, rechts zien we het maximale : P95 effect) voor Juli 2010 boven Tilburg.