

Eindrapport

***CARTOGRAFIE VAN DE KOELTE-EILANDEN IN HET
BRUSSELS HOOFDSTEDELIJK GEWEST***

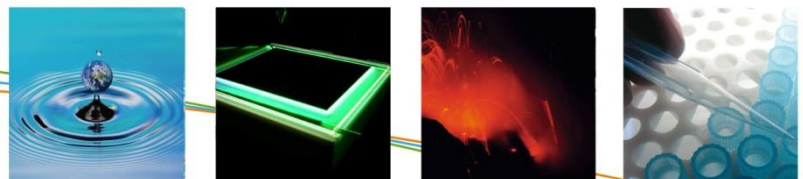
-

***CARTOGRAPHIE DES ILOTS DE FRAICHEUR DANS
LA REGION DE BRUXELLES-CAPITALE***

Dirk Lauwaet en Koen De Ridder

Studie uitgevoerd in opdracht van: IBGE-BIM

November 2018



INHOUD

Inhoud	I
Lijst van tabellen	II
Lijst van figuren	III
HOOFDSTUK 1. Inleiding	1
HOOFDSTUK 2. Beschrijving modellering	4
2.1. <i>UrbClim 100m resolutie simulaties</i>	4
2.2. <i>Hoge resolutie WBGT simulatie</i>	7
HOOFDSTUK 3. Model validatie	10
3.1. <i>IBGE-BIM vs VITO metingen</i>	10
3.2. <i>2016</i>	14
3.3. <i>2003</i>	19
3.4. <i>2012-2015</i>	23
3.5. <i>WBGT validatie</i>	28
3.6. <i>Discussie en conclusie</i>	30
HOOFDSTUK 4. Basiskaarten Brussel	32
HOOFDSTUK 5. Conclusie	44
Literatuurlijst	45

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: Heat stress category limits of the U.S. Army (2003). _____	7
Tabel 2: Overzicht van de gemeten en gemodelleerde dagelijkse minimale en maximale 2m luchttemperaturen (°C) en het aantal hittegolfgraaddagen (°C.d.) in alle meetstations, gemiddeld over alle zomerperioden. _____	30

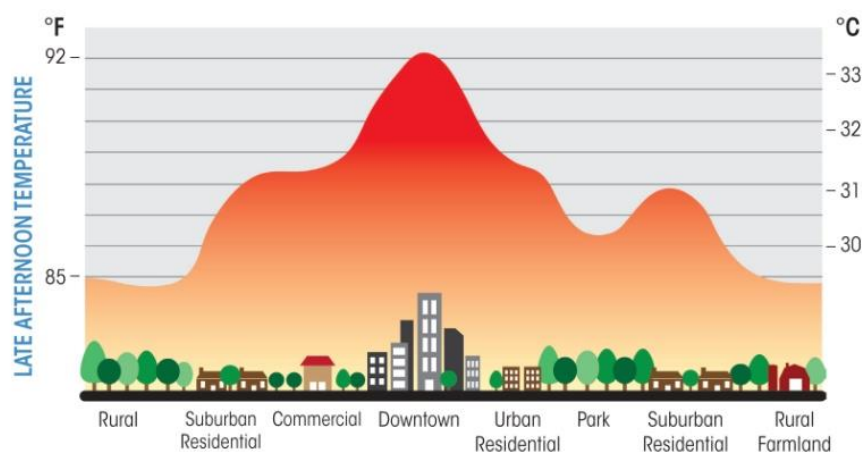
LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1. Verdeling van luchttemperaturen tijdens de late namiddag. Bron: http://www.cleanairpartnership.org/files/urbanheatiland.jpg	1
Figuur 2. Verwachte temperatuurstijging de komende eeuw volgens de modellen van het IPCC. Bron: IPCC, 2013.	3
Figuur 3. Schematische voorstelling van het UrbClim model.	4
Figuur 4. Visualisatie van het landgebruik in het modeldomein.	5
Figuur 5. Visualisatie van de hoeveelheid vegetatie in het modeldomein.	6
Figuur 6. Visualisatie van de gedetailleerde schaduwberekening op basis van de gebouwhoogtes in Brussel.	8
Figuur 7. Visualisatie van de 2m luchttemperaturen om 14u op de geselecteerde warme zomerdag.	9
Figuur 8. Meetopstelling in Molenbeek (Brussel). De bovenste witte behuizing (met geforceerde ventilatie) herbergt een tijdelijk geïnstalleerde temperatuursensor van VITO. De behuizing met lamellen net linksonder ervan bevat de IBGE/BIM temperatuursensor.	11
Figuur 9. Temperatuur op 3 m hoogte in Molenbeek, zoals gemeten door IBGE-BIM (rood) en VITO (blauw).	12
Figuur 10. Tijdsreeks van Tmin (blauw) en Tmax (rood) voor de site Molenbeek, gemeten door IBGE-BIM (boven) en VITO (onder), en met de HGD waarde telkens onderaan in het midden.	13
Figuur 11. Het gemiddeld stedelijk hitte-eiland van Brussel om 23u tijdens de zomer (juli-augustus) van 2016. De bolletjes tonen de locaties van de meetstations.	14
Figuur 12. Het uurlijkse verloop van de gemeten (zwart) en gesimuleerde (rood) 2m luchttemperaturen op de locatie van de metingen.	15
Figuur 13. Het daggemiddelde profiel van de gemeten (zwart) en gesimuleerde (rood) temperatuurverschillen tussen stad en platteland. De foutenmarges geven de standaard afwijkingen op het gemiddelde weer.	16
Figuur 14. Vergelijking tussen de geobserveerde en gemodelleerde dagelijkse maximale (links) en minimale (rechts) 2m luchttemperatuur voor de verschillende locaties. Bovenaan staan de resulterende hittegolfgraaddagen.	18
Figuur 15. Het gemiddeld stedelijk hitte-eiland van Brussel om 23u tijdens de zomer (juli-augustus) van 2003. De bolletjes tonen de locaties van de meetstations.	19
Figuur 16. Het uurlijkse verloop van de gemeten (zwart) en gesimuleerde (rood) 2m luchttemperaturen op de locatie van de metingen.	20
Figuur 17. Het daggemiddelde profiel van de gemeten (zwart) en gesimuleerde (rood) temperatuurverschillen tussen stad en platteland. De foutenmarges geven de standaard afwijkingen op het gemiddelde weer.	21
Figuur 18. Vergelijking tussen de geobserveerde en gemodelleerde dagelijkse maximale (links) en minimale (rechts) 2m luchttemperatuur voor de verschillende locaties. Bovenaan staan de resulterende hittegolfgraaddagen.	22
Figuur 19. Vergelijking tussen de geobserveerde en gemodelleerde dagelijkse maximale (links) en minimale (rechts) 2m luchttemperatuur in Steenokkerzeel voor respectievelijk de zomers van 2012, 2013, 2014 en 2015.	24
Figuur 20. Vergelijking tussen de geobserveerde en gemodelleerde dagelijkse maximale (links) en minimale (rechts) 2m luchttemperatuur in Ukkel voor respectievelijk de zomers van 2012, 2013, 2014 en 2015.	25
Figuur 21. Vergelijking tussen de geobserveerde en gemodelleerde dagelijkse maximale (links) en minimale (rechts) 2m luchttemperatuur in Molenbeek voor respectievelijk de zomers van 2012, 2013, 2014 en 2015.	27

Figuur 22. Vergelijking tussen de gemeten (zwart) en gesimuleerde (rood) luchttemperatuur in Ukkel op 24/08/2016.	28
Figuur 23. Vergelijking tussen de gemeten (zwart) en gesimuleerde (rood) Wet Bulb Globe Temperature in Ukkel op 24/08/2016.	29
Figuur 24. De gemiddelde 2m lucht temperatuur tijdens alle zomermaanden (juni-augustus) van de periode 1987-2016.	32
Figuur 25. Het gemiddelde stedelijke warmte-eiland van Brussel om 23u tijdens alle zomermaanden (juni-augustus) van de periode 1987-2016.	33
Figuur 26. Het gemiddeld aantal hittegolfdagen per jaar voor de periode 1987-2016.	34
Figuur 27. Het gemiddeld aantal hittegolfgaaddagen per jaar voor de periode 1987-2016.	35
Figuur 28. Het gemiddeld aantal hittegolven per jaar volgens de definitie van het KMI voor de periode 1987-2016.	36
Figuur 29. Het gemiddeld aantal dagen per jaar met een maximumtemperatuur $\geq 30^{\circ}\text{C}$ voor de periode 1987-2016.	37
Figuur 30. Het gemiddeld aantal dagen per jaar met een minimumtemperatuur $\geq 18^{\circ}\text{C}$ voor de periode 1987-2016.	38
Figuur 31. De gemiddelde Wet Bulb Globe Temperature over alle uren van de dag op 24 augustus 2016.	39
Figuur 32. De gemiddelde Wet Bulb Globe Temperature over alle uren van de dag op 24 augustus 2016 in het centrum van Brussel.	40
Figuur 33. De Wet Bulb Globe Temperature om 15u (het warmste moment van de dag) op 24 augustus 2016.	41
Figuur 34. De Wet Bulb Globe Temperature om 15u (het warmste moment van de dag) op 24 augustus 2016 in het centrum van Brussel.	42
Figuur 35. De geïdentificeerde koeltezones (WBGT altijd lager dan 25°C) in het centrum van Brussel.	43

HOOFDSTUK 1. INLEIDING

In de stad is het gemiddeld een stuk warmer dan op het platteland. We spreken hierbij van een stedelijk hitte-eiland (SHE) effect. Dit fenomeen doet zich voornamelijk 's avonds en 's nachts voor tijdens de zomermaanden. De figuur hieronder toont de typische temperatuurovergang tussen stad en platteland tijdens de late namiddag op een warme zomerdag. De temperatuurverschillen kunnen makkelijk oplopen tot meer dan 5°C.



Figuur 1. Verdeling van luchttemperaturen tijdens de late namiddag. Bron: <http://www.cleanairpartnership.org/files/urbanheatland.jpg>

Er zijn verschillende oorzaken voor de ontwikkeling van een stedelijk hitte-eiland:

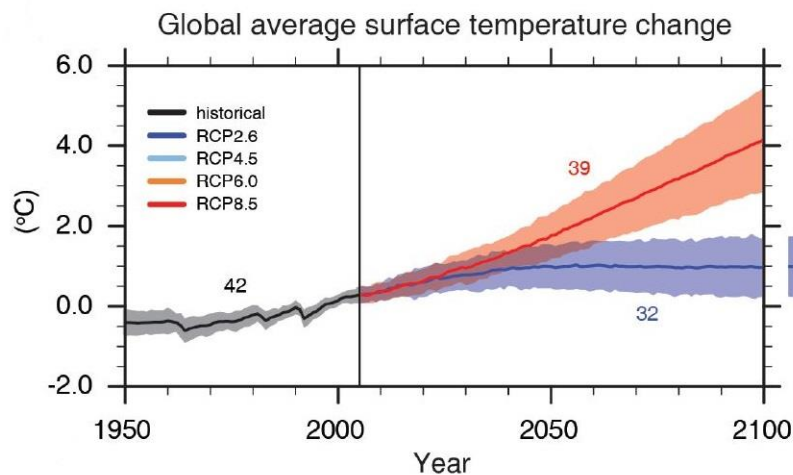
- Steden worden gekenmerkt door een zeer groot aandeel aan beton, asfalt, natuursteen, De zon warmt deze materialen overdag sterk op en die warmte wordt 's avonds en 's nachts terug afgegeven aan de lucht.
- In de stedelijke omgeving is er een verlaagde aanwezigheid van vegetatie en een grote hoeveelheid aan verharde oppervlakken. Hierdoor kan er maar weinig water verdampen. De energie van de zonnestraling die normaal gebruikt wordt voor het verdampen van water (waardoor de luchttemperatuur niet verhoogt), komt dus vrij voor het opwarmen van het oppervlak en de lucht erboven.
- Ook de stedelijke geometrie speelt een belangrijke rol. Doordat in een stedelijke omgeving de gebouwen het vrije zicht naar de hemel vanaf de grond blokkeren (men spreekt van een lage sky view factor), kan het oppervlak ook minder efficiënt energie verliezen door het uitzenden van warmtestraling.
- De stedelijke geometrie zorgt er ook voor dat minder zonnestraling gereflecteerd wordt. Het zonlicht verdwijnt als het ware in de diepe straatkloven tussen hoge gebouwen.
- Verder remmen of blokkeren de gebouwen in de stad ook de wind, waardoor er minder ventilatie plaats vindt in stedelijk gebied en de warme lucht in de stad blijft hangen.
- Tenslotte dragen wij met z'n allen bij tot het stedelijk hitte-eiland door onze activiteiten waarbij veel warmte vrijkomt: verkeer (hete uitlaatgassen), airco, industrie,...

De eigenschappen van een stad zorgen er niet enkel voor dat de temperatuur er 's avonds en 's nachts hoger oploopt, ook overdag ondervinden mensen buitenshuis een hogere warmtebelasting in steden. De zon warmt immers de straten, gebouwen en objecten in steden sterk op (makkelijk tot 40°C en meer, zelfs op niet zo warme dagen). Door de hoge oppervlaktetemperaturen van deze materialen zal de warmtestraling in de stad sterk toenemen, een extra stralingsbelasting die duidelijk voelbaar is in een stad. Ook als de zon niet schijnt, zoals 's nachts, voelen stadsbewoners de warmtestraling van gebouwen.

Je kan je nu de vraag stellen of die hogere temperaturen in steden een probleem zijn. Een beetje warmer mag toch wel in een kil land als België? En 's avonds wat langer op een terrasje kunnen blijven zitten is toch best aangenaam? Jammer genoeg zijn er ook heel wat nadelen verbonden aan het stedelijk hitte-eiland:

- De omgevingstemperatuur is één van de belangrijkste factoren die de nachtrust beïnvloeden. Hitte verstoort het slaappatroon en aangezien alle mensen nood hebben aan slaap, kan de totale negatieve impact hiervan groot zijn. Studies wijzen uit dat een opbouw van slaapttekort (bv. tijdens een hittegolf) nefast is voor de gezondheid.
- Uit cijfers blijkt dat er duidelijk meer ziekenhuisopnames zijn gedurende hittegolven. Het opwarmen van het menselijk lichaam bij hitte wordt aangeduid als hyperthermie. Vooral wanneer deze opwarming langdurig is, kan dit leiden tot hitte gerelateerde ziekten zoals krampen, flauwtes en beroertes.
- In extreme gevallen leidt dit zelfs tot een verhoging van de sterfte. Vooral de leeftijdsgroepen boven de 65 jaar en beneden 4 jaar zijn kwetsbaar, omdat ouderen en jonge kinderen minder hitte-regulerende mechanismen hebben. Ook in Belgische steden vallen jaarlijks gemiddeld tientallen doden door hittestress (Martinez et al., 2018).
- Op warme dagen wordt vaak een airco-installatie gebruikt om een aangename temperatuur te bereiken, en die verbruikt veel energie (en warmt de buitenlucht nog eens extra op). Typisch leidt het stedelijk hitte-eiland tot ongeveer een verdubbeling van het aantal uren waarop mensen geneigd zijn om hun airco op te zetten.
- Overmatige hitte kan ook leiden tot het (tijdelijk) falen van bepaalde infrastructuren, zoals (spoor)wegen en elektriciteitscentrales. Hogere temperaturen zullen leiden tot snellere achteruitgang van bepaalde basismaterialen (bv. asfalt, betonklinkers, ...) van (spoor)weginfrastructuren en bruggen. In het voorbije decennium waren er in Europa regelmatig periodes met tekorten aan "koelwater" voor nucleaire energiecentrales. In de warme zomer van 2003 moesten 30 energiecentrales daardoor hun productie verlagen.

Naar alle verwachting zal het probleem van hitte in steden de komende decennia enkel maar toenemen omwille van de gestaag verder gaande klimaatverandering. De stijgende concentratie broeikasgassen in de atmosfeer zal leiden tot een geschatte temperatuurstijging van 1 tot 4°C tegen het einde van de eeuw volgens het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) van de Verenigde Naties (Figuur 2). Klimaatonderzoekers verwachten dan ook dat het aantal hittegolven en zeer warme dagen nog verder toeneemt. Onderzoek toont daarbij ook aan dat de intensiteit van het stedelijk hitte-eiland effect zeker niet zal afnemen in de toekomst, m.a.w. steden krijgen nog een extra surplus aan warmte te verwerken.



Figuur 2. Verwachte temperatuurstijging de komende eeuw volgens de modellen van het IPCC. Bron: IPCC, 2013.

In het kader van dit IBGE-BIM project worden er met het door VITO ontwikkelde stedelijke klimaatmodel UrbClim 100m resolutie temperatuurkaarten doorgerekend voor het Brussels hoofdstedelijk gewest voor iedere warme periode (april-september) van de jaren 1987-2016. Daarnaast worden er zeer hoge resolutie thermische comfort kaarten aangemaakt voor een typische hete zomerdag (24 augustus 2016). Het doel van dit kaartmateriaal is om de hitte situatie in Brussel in kaart te brengen en om koelteplekken en koeltezones te identificeren waar mensen verkoeling kunnen zoeken op hete zomerdagen. De volgende temperatuur indicatoren worden berekend:

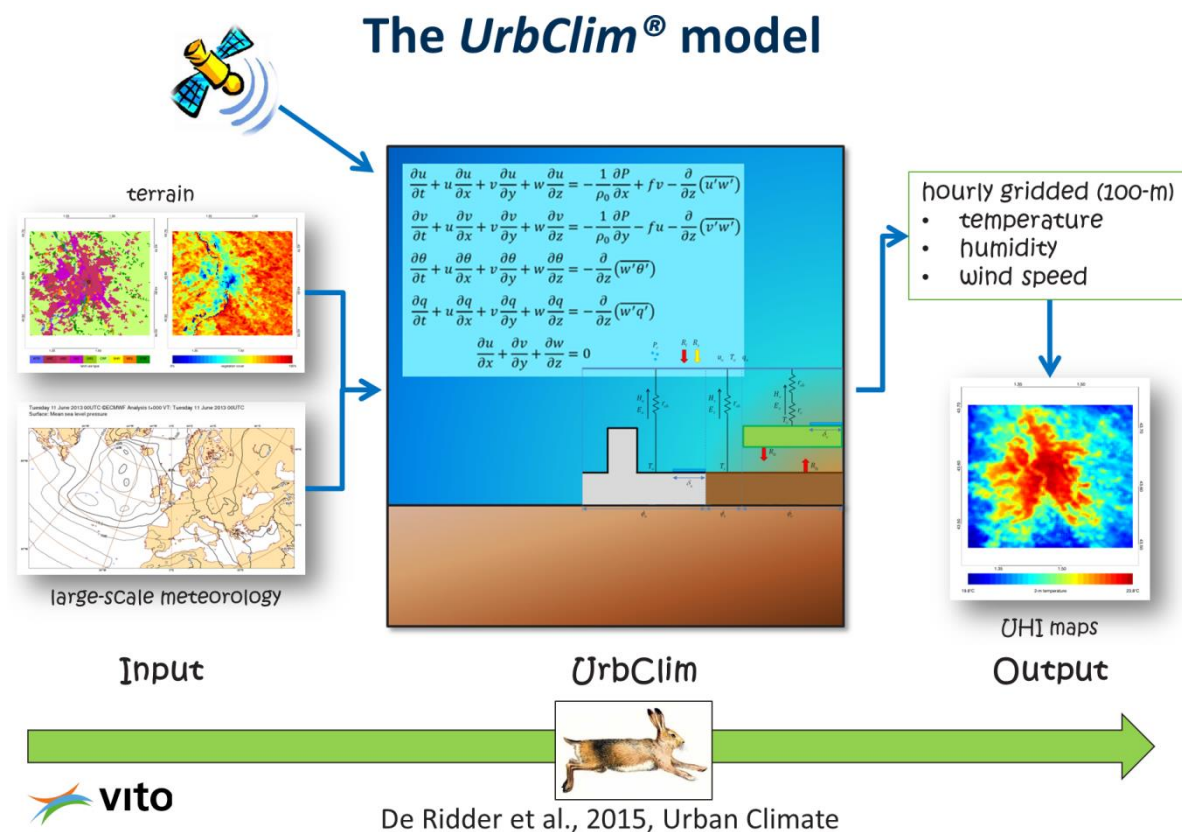
- het aantal hittegolfdagen in een (half kalender) jaar volgens de definitie van de FOD Volksgezondheid (= het aantal dagen waarbij de 3-daagse gemiddelde maximum temperatuur groter of gelijk is aan 30.0°C en de minimum temperatuur groter of gelijk is aan 18.0°C)
- het aantal hittegolfgraaddagen in een (half kalender)jaar (= de som van de overschrijdingen van de drempelwaarden van de maximum en de minimum temperaturen tijdens hittegolfdagen, een goede maat om de hittestress ruimtelijk in kaart te brengen)
- het aantal hittegolven in een (half kalender) jaar zoals gedefinieerd door het KMI (= een periode van 5 opeenvolgende dagen met $T_{max} \geq 25^{\circ}C$ waarvan minstens 3 dagen met $T_{max} \geq 30^{\circ}C$)
- maandgemiddelde temperaturen
- gemiddelde zomertemperatuur (zomer = juni + juli + augustus)
- aantal dagen in een (half kalender)jaar met een minimumtemperatuur $\geq 18^{\circ}C$
- aantal dagen in een (half kalender)jaar met een maximumtemperatuur $\geq 25^{\circ}C$
- aantal dagen in een (half kalender)jaar met een maximumtemperatuur $\geq 30^{\circ}C$
- de Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) (= de ISO-standaard voor humaan thermisch comfort) tijdens een hete zomerdag

In Hoofdstuk 2 worden de opzet van de modellering en de gebruikte input datasets besproken. In Hoofdstuk 3 volgen dan de resultaten van een validatie-oefening, waarbij modelresultaten worden vergeleken met meetresultaten van drie verschillende meetstations. In Hoofdstuk 4 wordt een selectie van het geproduceerde kaartmateriaal voorgesteld, en in Hoofdstuk 5 volgen de conclusies van deze studie.

HOOFDSTUK 2. BESCHRIJVING MODELLERING

2.1. URBClim 100M RESOLUTIE SIMULATIES

Om het stedelijk hitte-eiland voor Brussel in voldoende detail in kaart te brengen, wordt in deze studie gebruik gemaakt van het door VITO ontwikkelde stedelijke klimaatmodel UrbClim (Figuur 3). Dit model simuleert het lokale klimaat expliciet, om op die manier temperatuurverschillen tussen stedelijke en landelijke omgevingen te kwantificeren. Alle inhoudelijke details van het model zijn terug te vinden in de publicatie van De Ridder et al. (2015b). Het model is intussen al ingezet en gevalideerd voor een tiental steden wereldwijd (De Ridder et al., 2015b; Lauwaet et al., 2015; Lauwaet et al., 2016).



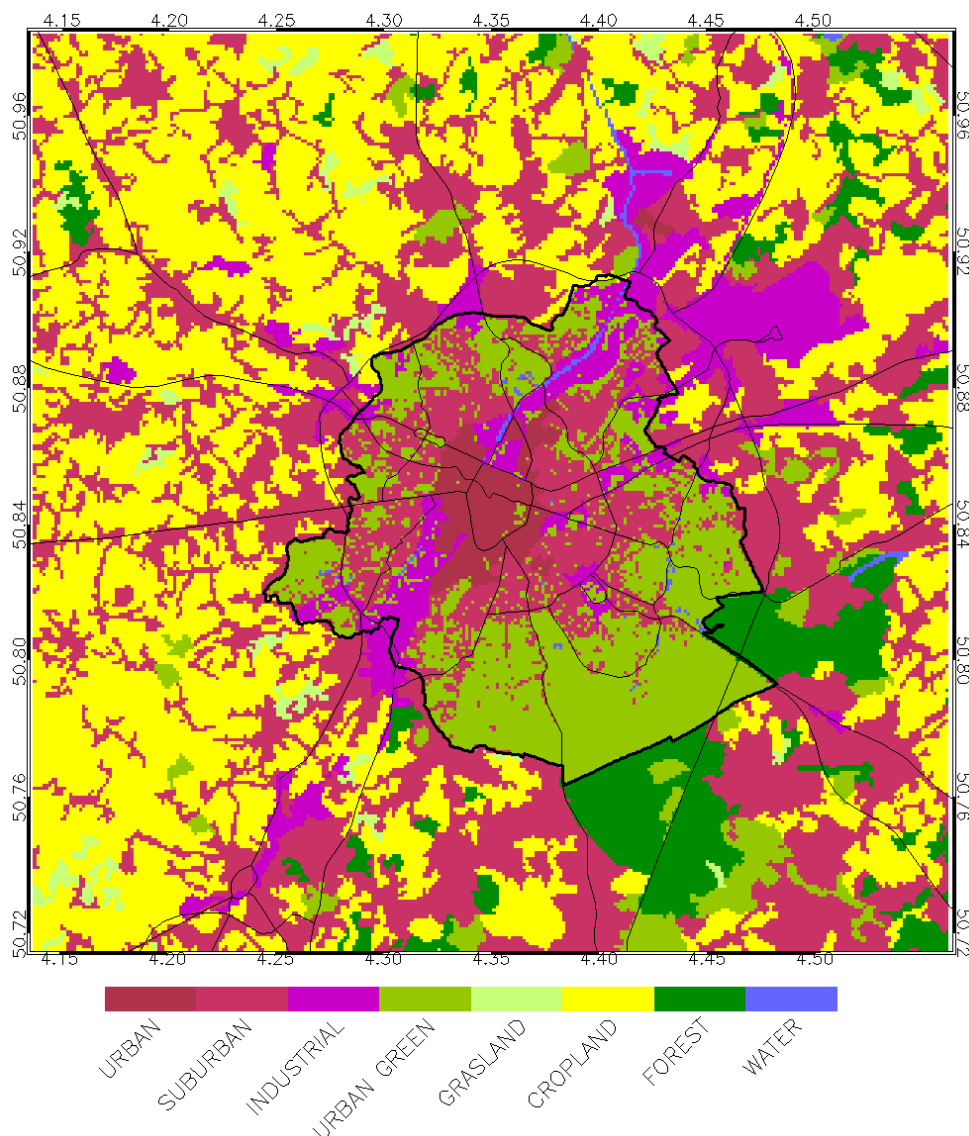
Figuur 3. Schematische voorstelling van het UrbClim model.

Voor de berekening van het lokale klimaat heeft UrbClim twee type invoer bestanden nodig: tijdreeksen van de grootschalige meteorologie en detailkaarten van het lokale terrein. In dit project maken we gebruik van de meest accurate grootschalige klimaatdata die beschikbaar zijn, met name de ERA-Interim heranalyse van het ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). UrbClim brengt vervolgens de lokale hittestress op 100m resolutie in kaart, gebaseerd op gedetailleerde landgebruik-, vegetatie- en verhardingskaarten. Concreet telt het modeldomein 301 x 301 grid punten met een resolutie van 100m in Lambert '72 coördinaten, en bevat het Brussel en een ruime omgeving errond.

Bij het definiëren van de input landgebruikskaart voor het model, is maximaal gebruik gemaakt van de beschikbare GIS data van IBGE-BIM voor het grondgebied van Brussel. De `wsl_bruenvi_water_polygon` is gebruikt om de wateroppervlakken te definiëren, en een combinatie van de `wsl_bruenvi_public_green_area`, `wsl_bruenvi_vegetation_dense_2008` en `wsl_bruenvi_vegetation_open_2008` om de gridcellen met 'urban green' te definiëren. Hierbij is als volgt te werk gegaan :

- 1) Omzetten van de shape files naar 1m resolutie raster files (0 of 1)
- 2) Resample van 1m resolutie kaarten naar het 100m resolutie UrbClim grid (area mean)
- 3) Aanpassen van het landgebruik indien de waarde >0.5

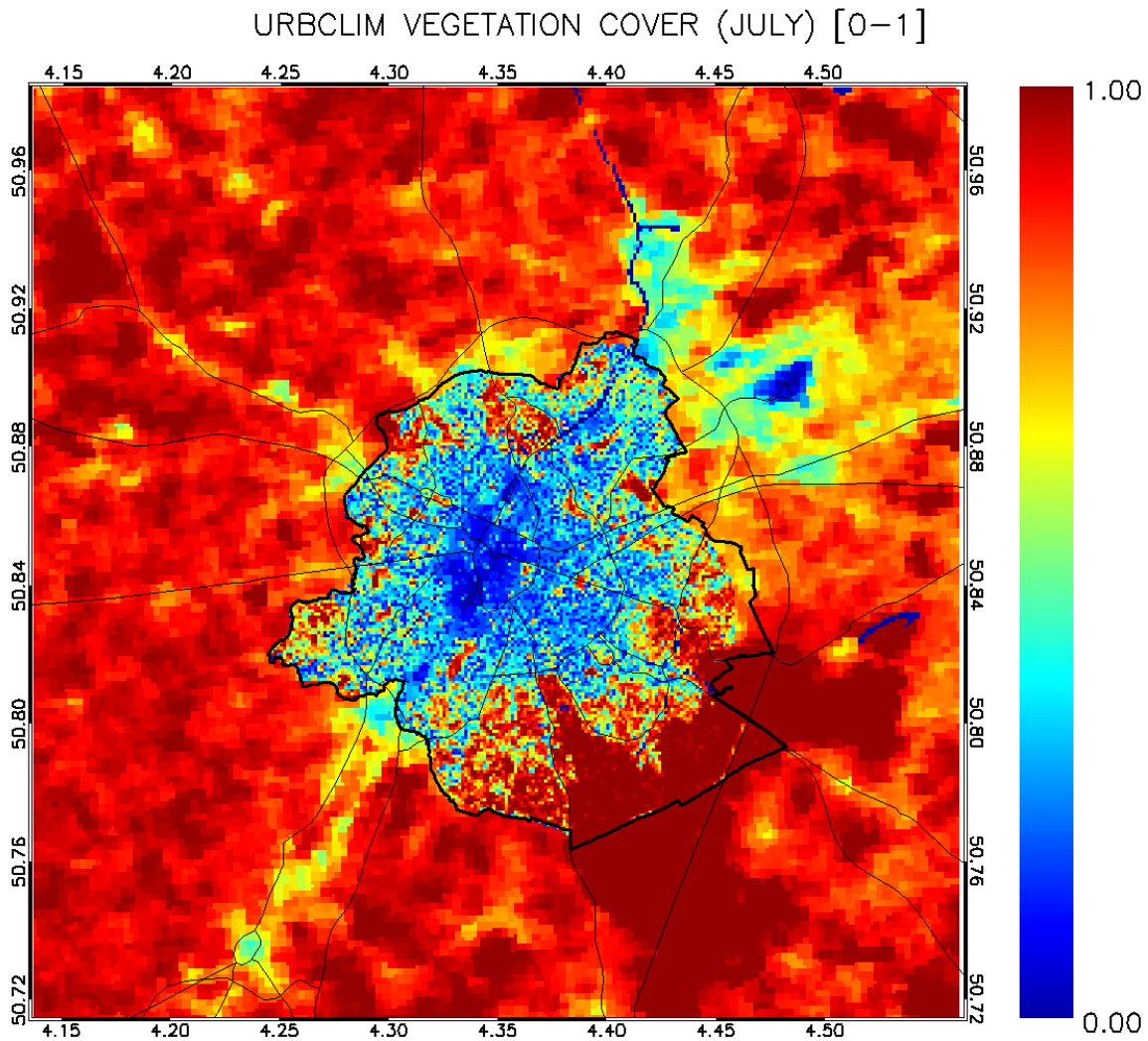
Voor de resterende stedelijke gridcellen is de indeling van CORINE 2012 (in urban, suburban en industrial) behouden omdat hiervoor geen extra informatie is. Buiten het grondgebied Brussel is ook de op CORINE gebaseerde indeling behouden. Het resultaat is te zien in Figuur 4.



Figuur 4. Visualisatie van het landgebruik in het modeldomein.

Daarnaast zijn de `wsl_bruenvi_public_green_area`, `wsl_bruenvi_vegetation_dense_2008` en `wsl_bruenvi_vegetation_open_2008` kaarten gebruikt om de hoeveelheid vegetatie (vegetation

cover) te bepalen voor het grondgebied Brussel. In dit gebied is voor iedere gridcel de maximale waarde van de 3 geresampelde kaarten genomen. Het resultaat is dus consistent met het landgebruik. Er zit op deze manier wel geen variatie in de tijd in de vegetatie hoeveelheden, maar aangezien we enkel modelleren in de zomer periode lijkt dat geen groot probleem. Buiten Brussel zijn tien jaar gemiddelde vegetatie beelden van de MODIS satelliet gebruikt om de hoeveelheid vegetatie te definiëren. Het eindresultaat is te zien in Figuur 5.



Figuur 5. Visualisatie van de hoeveelheid vegetatie in het modeldomein.

De hoeveelheid verharding is in rekening gebracht met behulp van de publiek beschikbare verharding data van het European Environment Agency (EEA) uit 2012, de standaard dataset voor UrbClim simulaties. Tenslotte is ook de roughness length for momentum (een belangrijke parameter in het UrbClim model) voor de 'urban green' gebieden aangepast door gebruik te maken van de wsl_bruenvi_vegetation_dense_2008 en wsl_bruenvi_vegetation_open_2008 kaarten. De 'dense' gebieden hebben een roughness van 1.2m gekregen (=broadleaf trees) en de 'open' gebieden een roughness van 0.1m (=grass and shrubs).

2.2. HOGE RESOLUTIE WBGT SIMULATIE

Luchttemperaturen vertellen echter niet het volledige verhaal over de hittestress die mensen in een stad ervaren. Zoals gezegd in de inleiding is ook de stralingsbelasting (zowel kortgolvig als langgolvig) een belangrijke factor in het bepalen van hittestress. Daarnaast spelen ook de luchtvochtigheid en de wind een rol in het bepalen van het humaan thermisch comfort.

Een indicator die al deze effecten in rekening brengt is de zogenaamde 'Wet Bulb Globe Temperature' (WBGT), de ISO-standaard voor het kwantificeren van thermisch comfort (ISO 1989). Deze indicator wordt gebruikt door de Belgische overheid (FOD Volksgezondheid en FOD Werk) om te bepalen wanneer werknemers worden blootgesteld aan overmatige hittestress (<http://www.werk.belgie.be/defaultTab.aspx?id=39434#WBGT>). Ook internationaal heeft de WBGT een lange traditie als thermische comfort index, en wordt ze gebruikt door tal van instanties (Willett and Sherwood, 2012). Het is de enige index die ingedeeld is in categoriën op basis van een groot aantal observaties, uitgevoerd door het U.S. Army (2003).

Tabel 1: Heat stress category limits of the U.S. Army (2003).

Category	WBGT °F	WBGT °C
1	≤ 78-81.9	≤ 25.6-27.7
2	82-84.9	27.8-29.4
3	85-87.9	29.4-31.0
4	88-89.9	31.1-32.1
5	≥ 90	≥ 32.2

De standaard WBGT formule is:

$$WBGT = 0.7 \times Tw + 0.2 \times Tg + 0.1 \times Ta$$

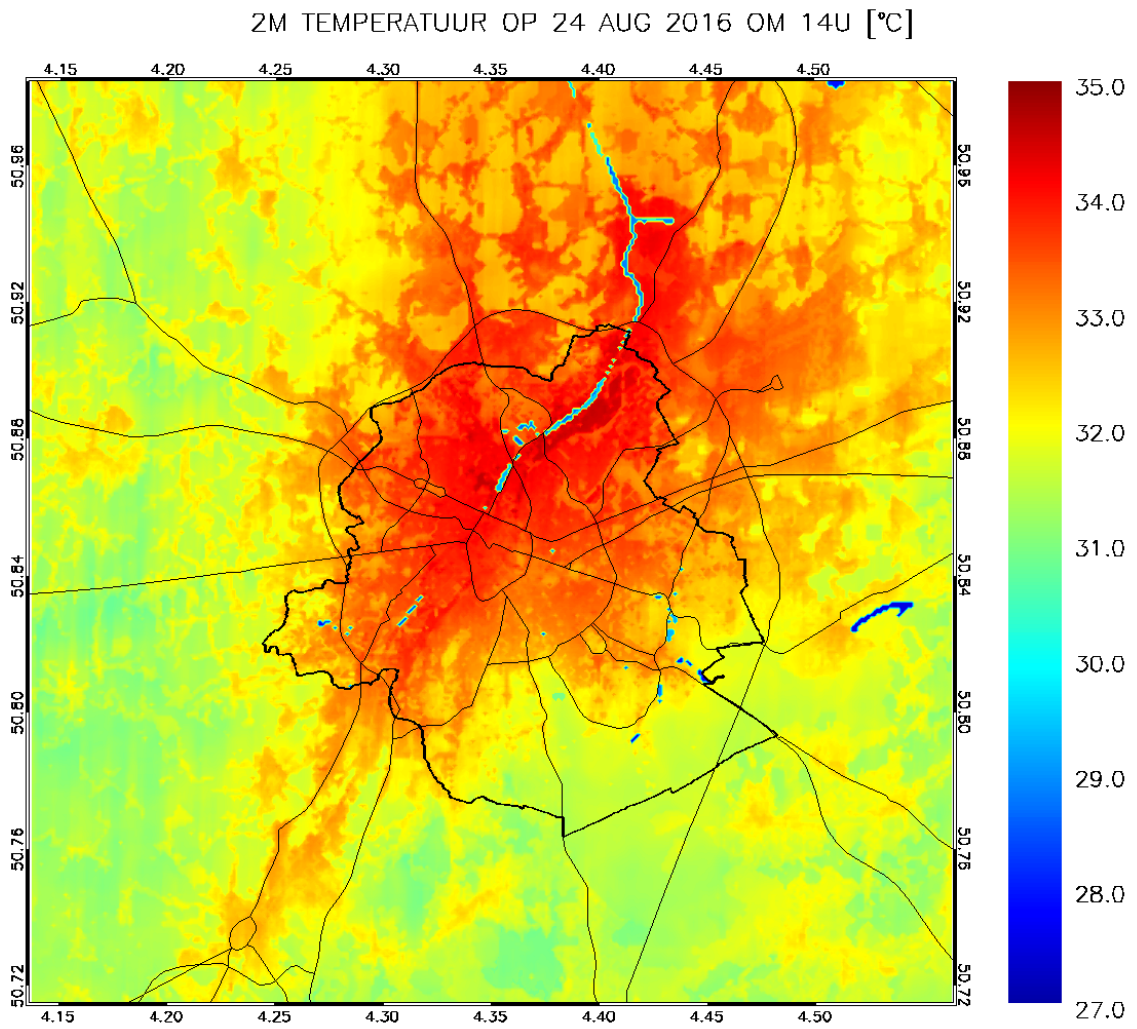
met T_w = de natte bol temperatuur, T_g = de zwarte bol temperatuur en T_a = de lucht temperatuur.

De berekening van de WBGT uit de UrbClim model resultaten gebeurt op basis van de methodologie die is beschreven in de paper van Liljegren et al. (2008), de aanbevolen manier om de buitenshuise WBGT te bepalen (Lemke and Kjellstrom 2012). Als basis voor de berekeningen gebruiken we de uurlijkse temperaturen, luchtvochtigheid en windsnelheden van het UrbClim model. Voor het berekenen van de schaduwvorming door gebouwen en bomen doen we beroep op de shapefile met de gebouwhoogtes van Brussel en de 'dense' vegetatie kaart waarbij we aannemen dat de bomen gemiddeld 20m hoog zijn. Deze shapefiles worden geconverteerd naar 2m resolutie raster kaarten, en vervolgens wordt voor ieder uur van de geselecteerde hete zomerdag (zie onder) de inkomende kortgolvlige zonnestraling berekend met de Potential Incoming Solar Radiation module van het System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA), een open-source Geografisch Informatie Systeem (Conrad et al., 2015). Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 6. De stralingstransfer door vegetatie wordt gedetailleerd in rekening gebracht op basis van een parameterisatie schema dat is beschreven in De Ridder (1997). Verder worden in de berekeningen de voorgestelde waarden voor alle input parameters uit de paper van Liljegren et al. (2008) overgenomen. Het eindresultaat zijn uurlijkse 2m resolutie WBGT kaarten voor het grondgebied van Brussel.



Figuur 6. Visualisatie van de gedetailleerde schaduwberekening op basis van de gebouwhoogtes in Brussel.

Aangezien de gedetailleerde schaduwberekeningen erg lang duren en de output kaarten erg groot zijn, is het niet mogelijk om de WBGT te berekenen voor lange tijdperiodes. Daarom hebben we er voor gekozen om de WBGT te berekenen voor een recente typische hete zomerdag (24 augustus 2016) waarop er zich hittestress voor doet in Brussel. Op deze manier kunnen we goed in kaart brengen in welke zones er op zo'n dag sprake is van hittestress, en waar de eventuele koeltezones zich bevinden. Op de geselecteerde dag stond er een lichte zuidenwind, en stegen de temperaturen in het Brusselse tot ruim boven de 30°C (Figuur 7).



Figuur 7. Visualisatie van de 2m luchttemperaturen om 14u op de geselecteerde warme zomerdag.

HOOFDSTUK 3. MODEL VALIDATIE

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de validatie van het UrbClim model getoond. Hierbij wordt gefocust op de 2m luchttemperaturen, de temperatuurverschillen tussen stad en platteland (het zogenaamde stedelijke hitte-eiland effect), en het aantal hittegolfgaaddagen (HGD), de indicator die een goed ruimtelijk beeld geeft van de hittestress situatie. Voor de validatie zijn er data van drie stations beschikbaar: Molenbeek (stedelijk), Ukkel (semi-urbaan) en Steenokkerzeel (ruraal). Voor de zomers van 2003 en 2016 zijn uurlijkse data beschikbaar, voor de zomers van 2012-2015 enkel dagelijkse data.

Daarnaast worden ook de WBGT-resultaten op 24 augustus 2016 gevalideerd, maar hiervoor zijn enkel metingen in Ukkel beschikbaar. De WBGT wordt er niet rechtstreeks gemeten, maar kan gereconstrueerd worden uit de metingen van andere variabelen (temperatuur, natte bol temperatuur, straling en windsnelheid).

Concreet worden er figuren getoond met het uurlijkse verloop en de validatiestatistieken van de 2m luchttemperatuur, de gemiddelde dagcyclus van het stedelijk hitte-eiland, een scatterplot van de dagelijkse minimum- en maximumtemperaturen en het resulterende aantal hittegolfgaaddagen (zoals gedefinieerd in Hoofdstuk 1). Voor een aantal jaren (2012-2015) zijn enkel de dagelijkse maxima en minima beschikbaar, en kunnen dus enkel de scatterplots gemaakt worden.

De validatiestatistieken die zijn gebruikt:

- 1) De bias, het gemiddelde verschil tussen de metingen en de modelresultaten.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)$$

- 2) De root mean square error (RMSE), de standaard deviatie van de verschillen tussen gemodelleerde en geobserveerde waarden.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}$$

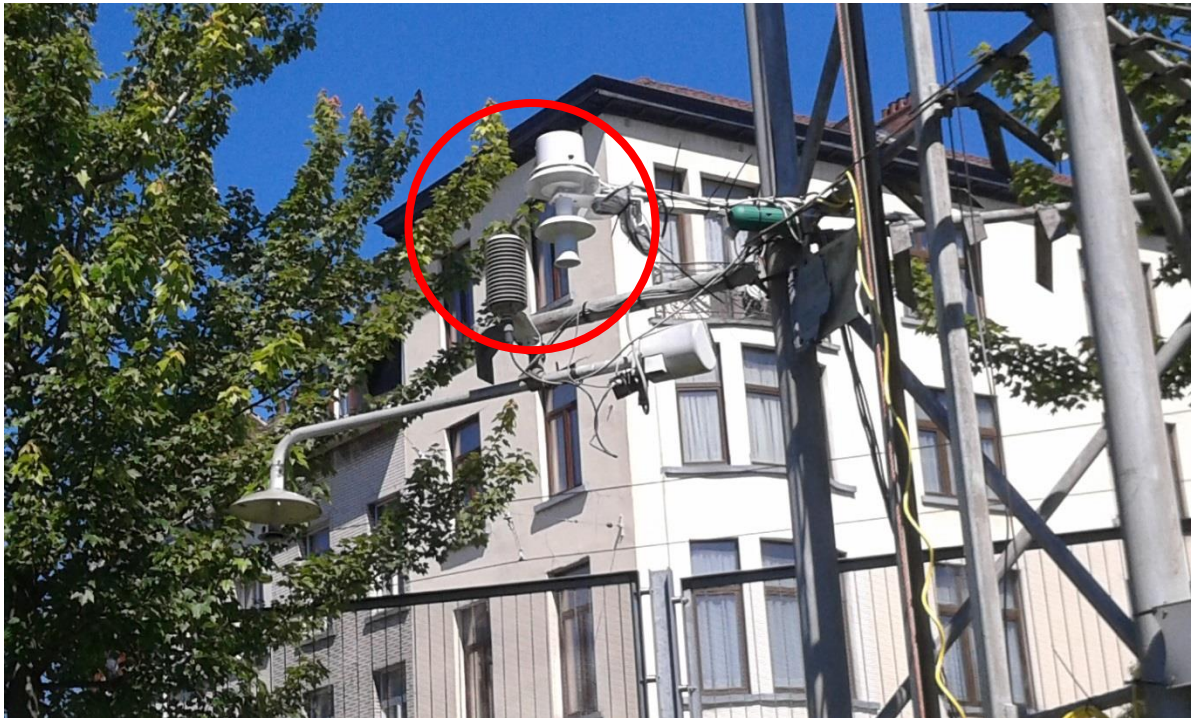
- 3) De correlatie coëfficiënt (CORR), de proportie van de variatie in de geobserveerde waarden die verklaard wordt door de modelresultaten.

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$$

3.1. IBGE-BIM vs VITO METINGEN

Deze analyse is uitgevoerd in het kader van het VMM-MIRA project over hittestress in Vlaanderen en Brussel (Lauwaet et al., 2017). Voor Brussel werd er daar gekeken naar temperatuurmetingen van IBGE-BIM van het station in Molenbeek (T1M001). Omdat er eerder al bezorgdheid was gerezen met

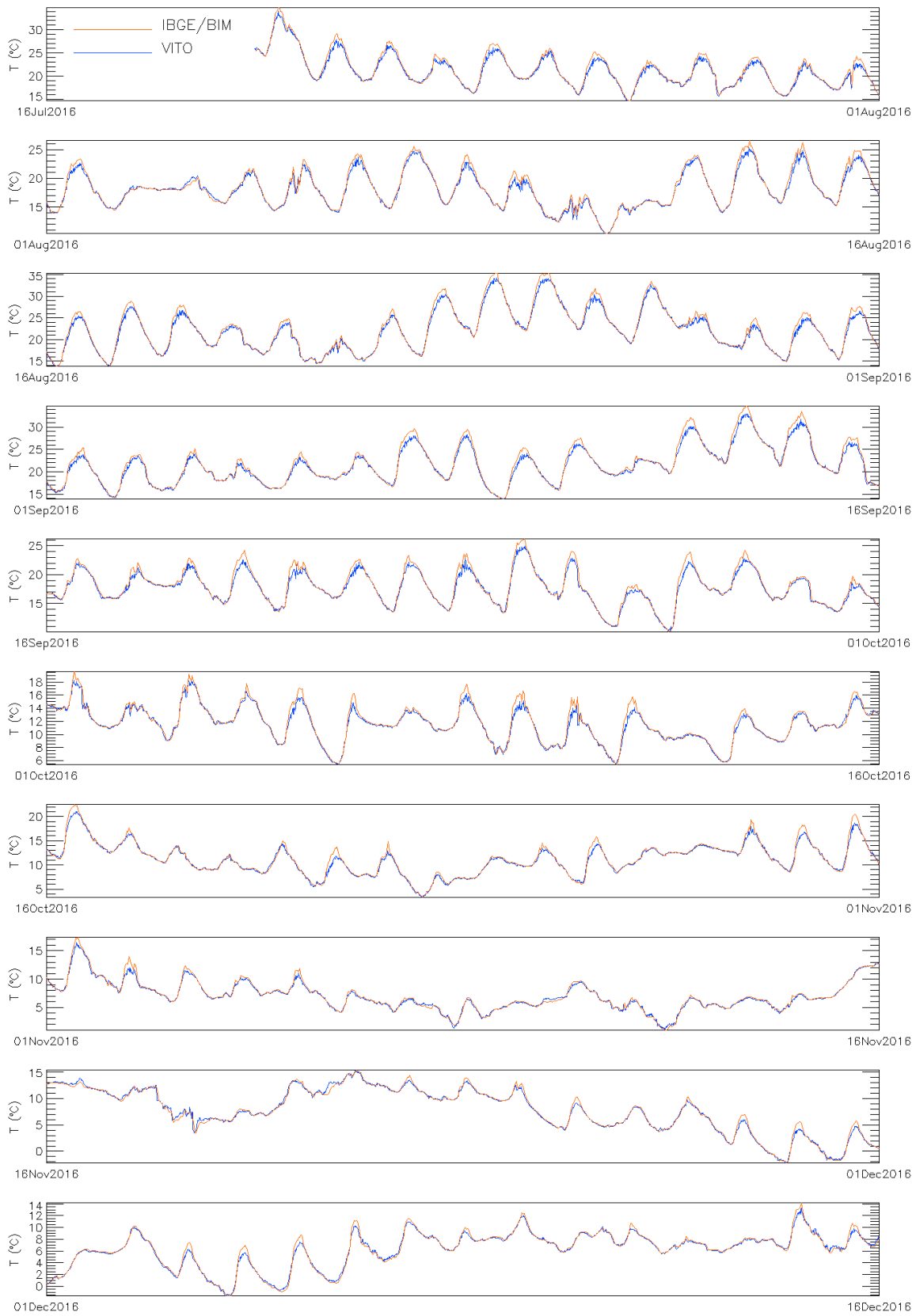
betrekking tot de nauwkeurigheid van deze data (De Ridder et al., 2015a) installeerde VITO in de zomer van 2016 twee extra meetsensoren vlak naast de meetopzet van BIM (Figuur 8), om te kunnen vergelijken. De VITO meting gebeurde met HOBO temperatuursensoren met interne data logging, in een actief geventileerd stralingsschild van het merk Young.



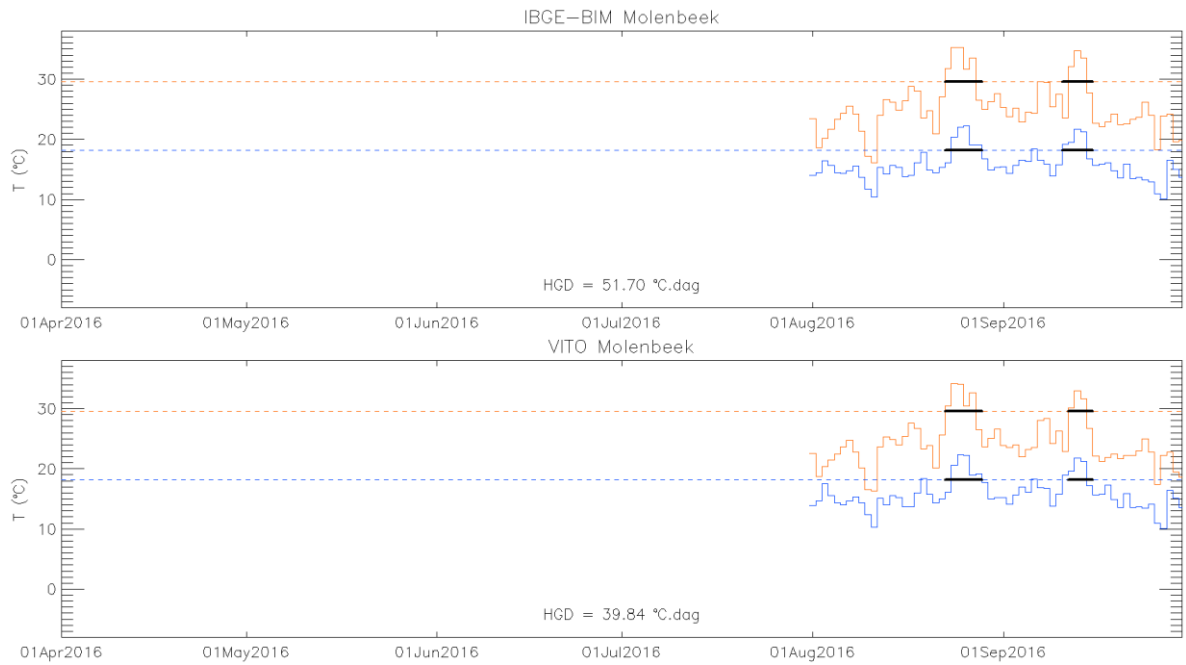
Figuur 8. Meetopstelling in Molenbeek (Brussel). De bovenste witte behuizing (met geforceerde ventilatie) herbergt een tijdelijk geïnstalleerde temperatuursensor van VITO. De behuizing met lamellen net linksonder ervan bevat de IBGE/BIM temperatuursensor.

Gedurende de periode 20 juli tot 16 december 2016 liepen de IBGE-BIM en de VITO metingen in parallel. Omdat beide VITO metingen onderling een verwaarloosbare bias (0.055°C) en RMSE (0.062°C) vertoonden, werd één van beide VITO meetreeksen gebruikt om te vergelijken met de BIM metingen. Het resultaat van deze oefening is weergegeven in Figuur 9. Daaruit blijkt duidelijk dat, hoewel de nachtelijke temperatuurmetingen sterk overeenkomen tussen de beide meetopstellingen, de waarden overdag rond de piekmomenten (T_{max}) vaak sterk verschillen, tot ongeveer 2°C . Dit is problematisch, gezien de gevoeligheid van de berekening van het aantal hittgolven en het aantal hittegolfgraaddagen ten opzichte van de dagelijkse T_{max} (Figuur 10). In de validatie-oefening voor deze studie is toch gebruik gemaakt van deze data, maar het is dus goed om in het achterhoofd te houden dat er een grote onzekerheid op de meetresultaten zit.

Intussen is er eind 2017 een nieuw meetstation geplaatst door IBGE-BIM, en tijdens de zomer van 2018 zal VITO ook opnieuw metingen uitvoeren en een nieuwe vergelijking maken in het kader van het VMM-MIRA project.



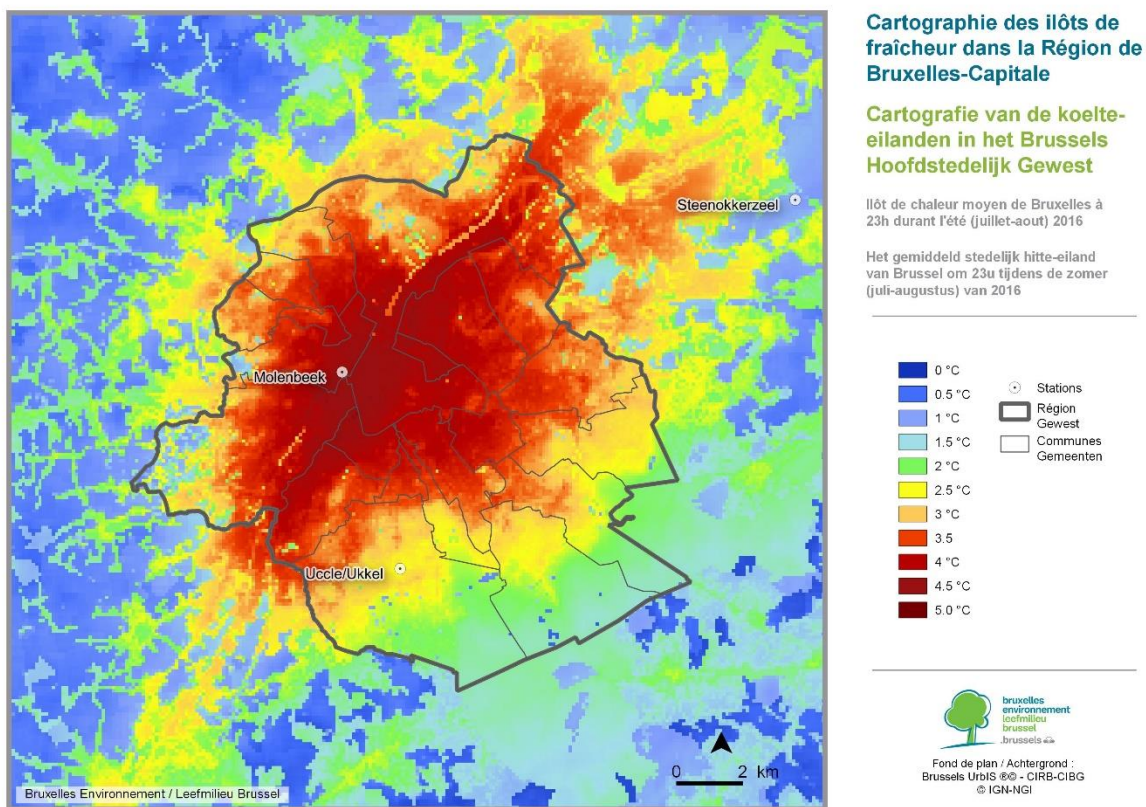
Figuur 9. Temperatuur op 3 m hoogte in Molenbeek, zoals gemeten door IBGE-BIM (rood) en VITO (blauw).



Figuur 10. Tijdsreeks van Tmin (blauw) en Tmax (rood) voor de site Molenbeek, gemeten door IBGE-BIM (boven) en VITO (onder), en met de HGD waarde telkens onderaan in het midden.

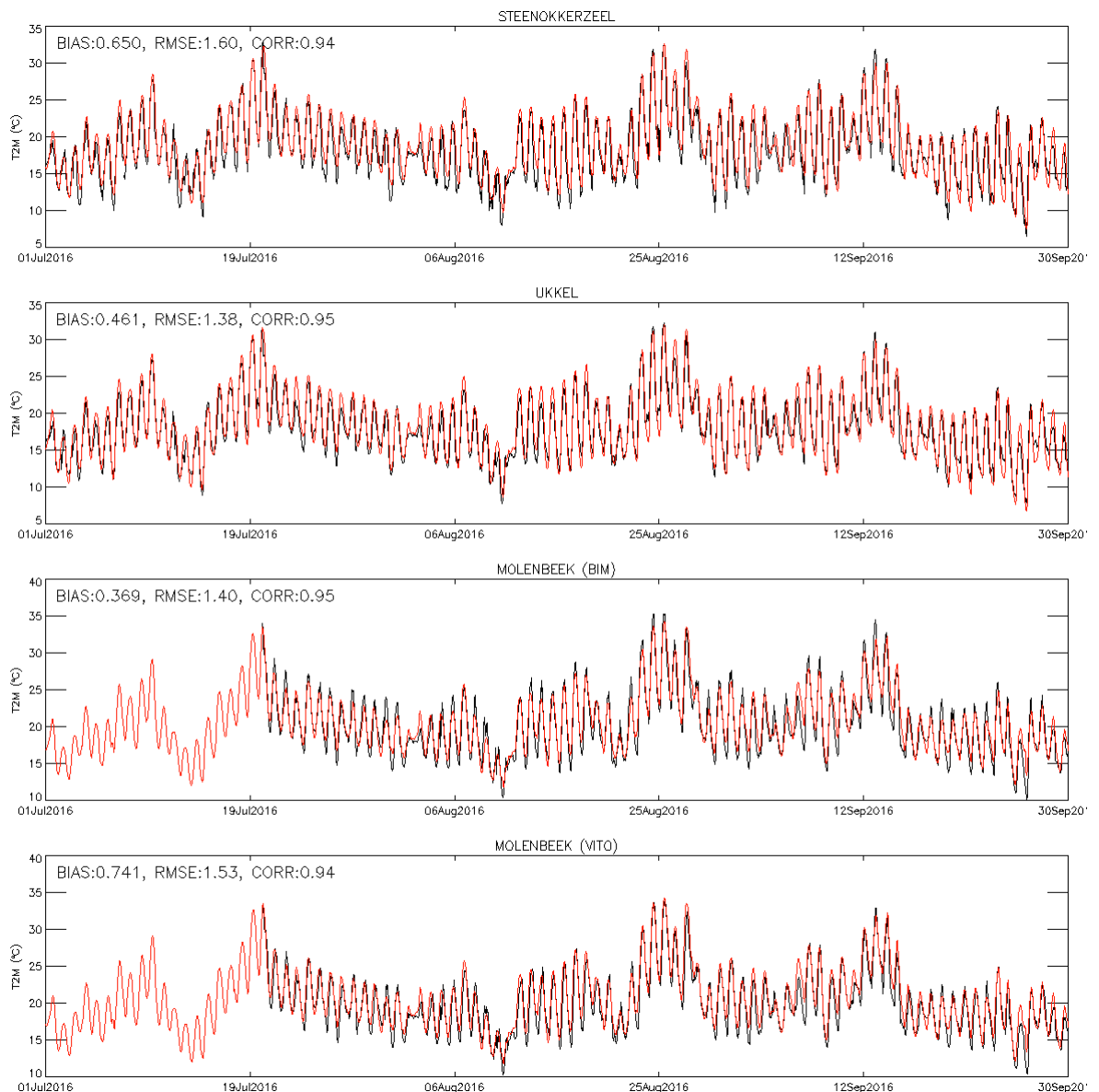
3.2. 2016

Voor het jaar 2016 zijn er data beschikbaar van de VITO meetsensor in Molenbeek vanaf 20 juli. Om goed te kunnen vergelijken hebben we ook de data van de IBGE-BIM sensor pas vanaf 20 juli meegenomen. Daarnaast zijn er uurlijkse data beschikbaar voor de meetstations in Ukkel en Steenokkerzeel voor de maanden juli-september. Figuur 11 toont de locatie van de meetstations en het gemiddelde stedelijk hitte-eiland van Brussel tijdens de zomer (juli en augustus) van 2016 om 23u, het moment dat de temperatuurverschillen tussen stad en platteland maximaal zijn. Tussen het centrum van de stad en de grasvelden en akkers op het platteland bedraagt het stedelijk hitte-eiland effect een kleine 5°C gemiddeld. Dit is de hoogste waarde in België, en beduidend meer dan gemeten en gemodelleerd wordt voor de stad Antwerpen (gemiddeld 3.5°C) in de VMM-MIRA hittestudie (Lauwaet et al., 2017).



Figuur 11. Het gemiddeld stedelijk hitte-eiland van Brussel om 23u tijdens de zomer (juli-augustus) van 2016. De bolletjes tonen de locaties van de meetstations.

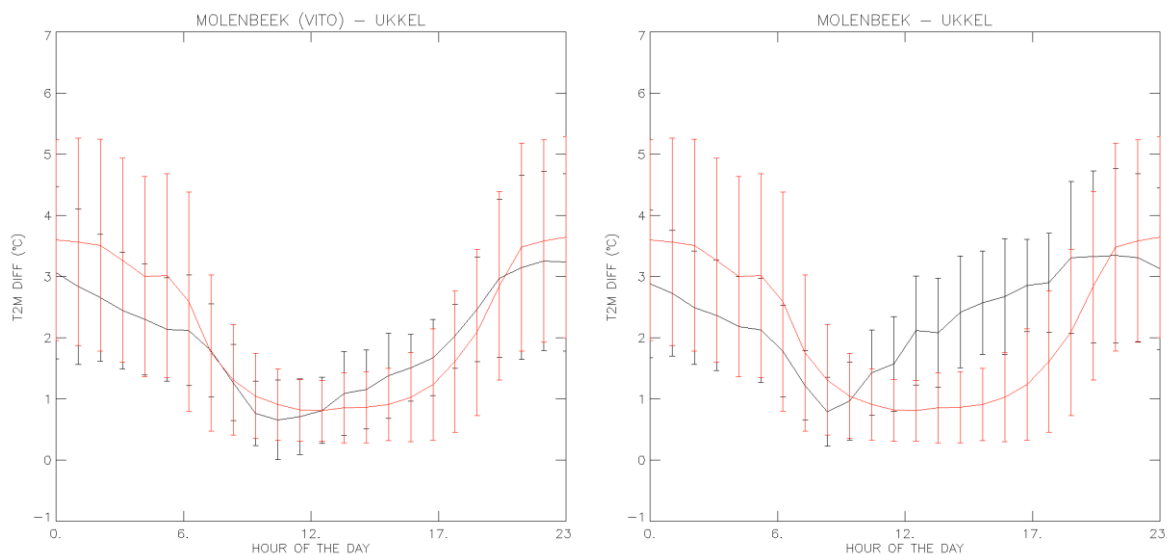
Het uurlijkse verloop van de metingen en de modelresultaten tijdens de validatieperiode laat een goede overeenkomst zien op alle locaties (Figuur 12). De validatiestatistieken zijn prima en erg gelijklopend voor de verschillende locaties, met een positieve bias van ongeveer 0.5°C, een root mean square error onder de 2°C en een correlatie boven 0.9. Dit resultaat is grotendeels het werk van de ERA-Interim input data, waar het UrbClim model dicht bij aanleunt. Verder valt op dat de statistieken voor de twee meetopstellingen in Molenbeek erg gelijkaardig zijn, alleen is de bias voor de IBGE-BIM metingen iets kleiner, omdat de waarden er overdag meestal wat hoger zijn, zoals uitgelegd in de vorige Sectie.



Figuur 12. Het uurlijkse verloop van de gemeten (zwart) en gesimuleerde (rood) 2m luchttemperaturen op de locatie van de metingen.

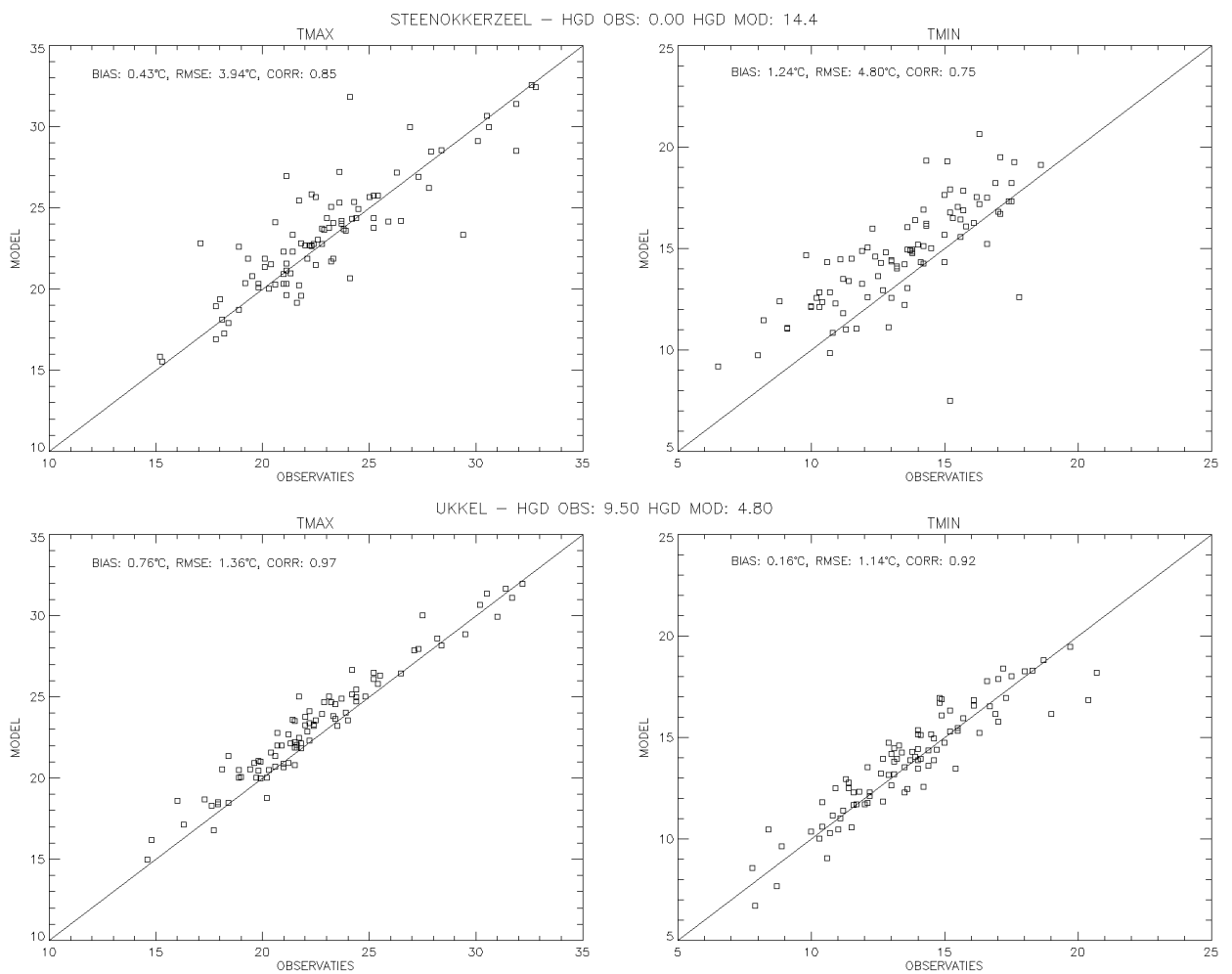
Het wordt al wat moeilijker voor het model wanneer we gaan kijken naar de temperatuurverschillen tussen stad en platteland. Idealiter gebruiken we als ruraal referentiestation de metingen van Belgocontrol in Steenokkerzeel, maar het nadeel van dit station is dat de temperatuurmeting er gebeurt in een passief geventileerde behuizing. Zoals in De Ridder et al. (2015a) uitgelegd kan dit met name overdag afwijkende temperatuurwaarden geven. Om de soms subtiele temperatuurverschillen tussen stad en platteland weer te geven lijkt dit dan ook geen goed meetstation. Daarom hebben we het station van Ukkel hier als referentie gebruikt, hoewel dit geen echt ruraal station is.

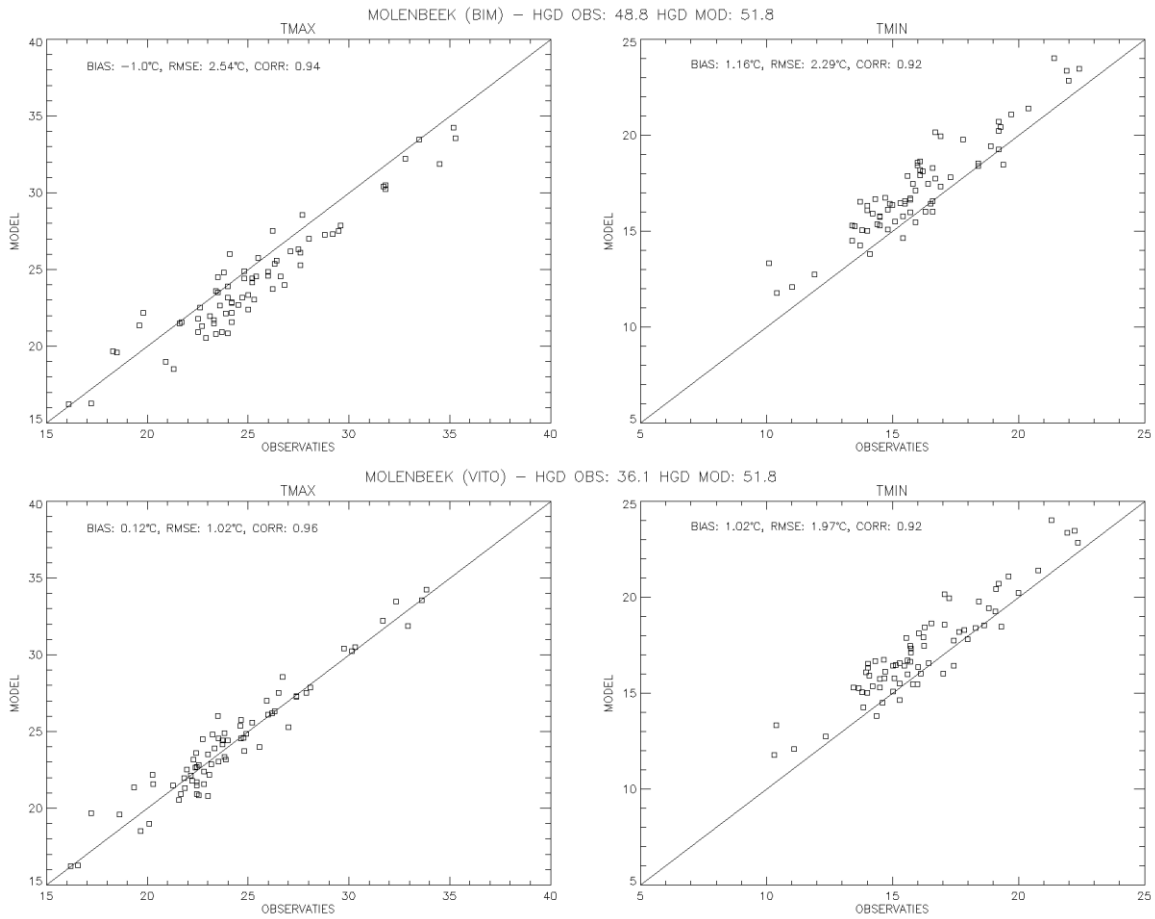
Figuur 13 toont het daggemiddelde verloop van het stedelijk hitte-eiland voor Molenbeek, en de standaard afwijking op dit verloop. We zien dat de dagcyclus goed wordt weergegeven door het model in vergelijking met de VITO-metingen, al wordt de sterkte van het nachtelijke hitte-eiland licht overschat met 0.5°C. Voor de IBGE-BIM metingen is de situatie iets anders, en zien we overdag hogere waarden, hetgeen overeenkomt met de eerdere bevindingen uit Sectie 3.1. De maximaal en minimaal gemeten waarden komen wel goed overeen met de modelresultaten.



Figuur 13. Het daggemiddelde profiel van de gemeten (zwart) en gesimuleerde (rood) temperatuurverschillen tussen stad en platteland. De foutenmarges geven de standaard afwijkingen op het gemiddelde weer.

Tenslotte worden de dagelijkse minimale en maximale 2m luchttemperaturen vergeleken in Figuur 14. Deze zijn uiteraard erg belangrijk omdat ze gebruikt worden bij de berekening van de meeste hittestress indicatoren in dit project. Voor zowel Steenokkerzeel als de beide meetsensoren in Molenbeek zien we dat het model de minimale temperaturen gemiddeld wat overschat. Het is een gekend probleem in de modelleerwereld dat de minimale temperaturen lastig te simuleren zijn (Brisson et al., 2016; Jacob et al., 2007). Vermoedelijk ligt dit aan de algemene overschatting van de verticale turbulente menging onder stabiele stratificatie die zich voordoet in verschillende grenslaagmodellen, en dus ook in UrbClim (Dimitrova et al., 2016). Voor de maxima presteert het model beter, enkel voor de metingen van IBGE-BIM zien we een negatieve bias, zoals we kunnen verwachten van een passief geventileerde sensor in een stedelijke omgeving. In Steenokkerzeel zien we deze bias niet, maar op het platteland is er meer wind en minder straling, waardoor de afwijkingen er veel kleiner zijn.

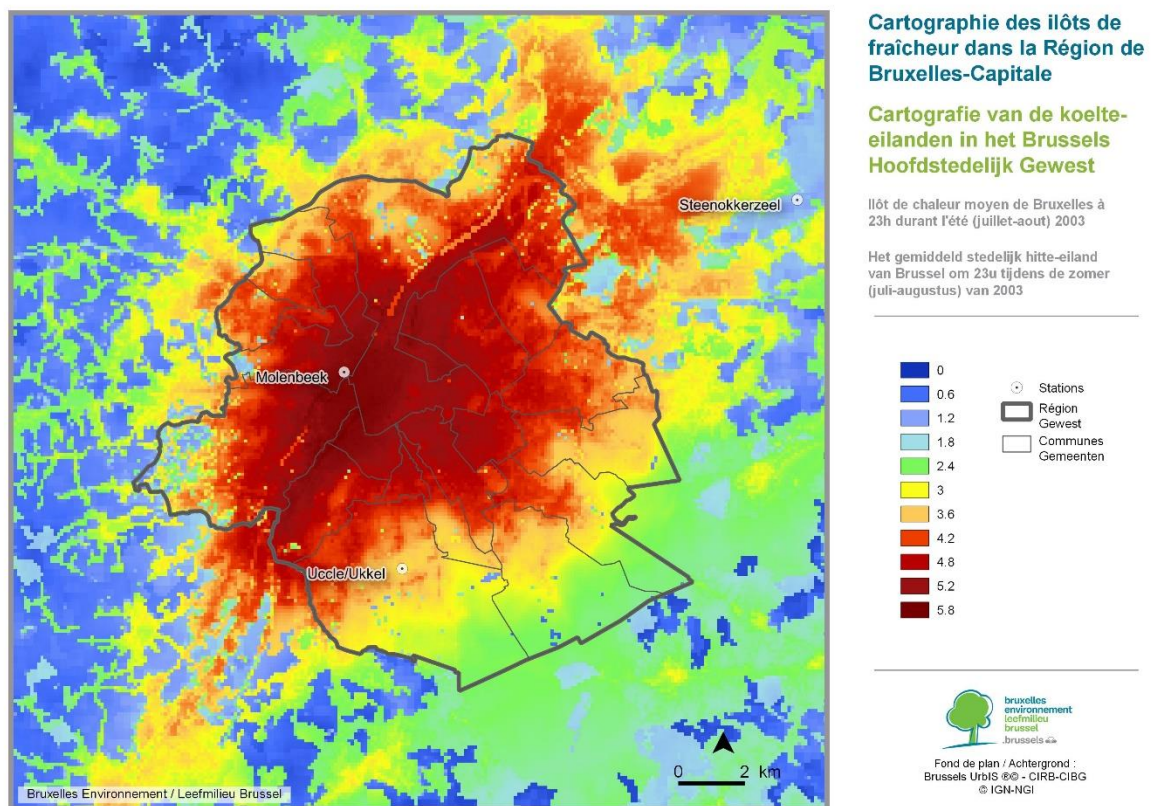




Figuur 14. Vergelijking tussen de geobserveerde en gemodelleerde dagelijkse maximale (links) en minimale (rechts) 2m luchttemperatuur voor de verschillende locaties. Bovenaan staan de resulterende hittegolfgraaddagen.

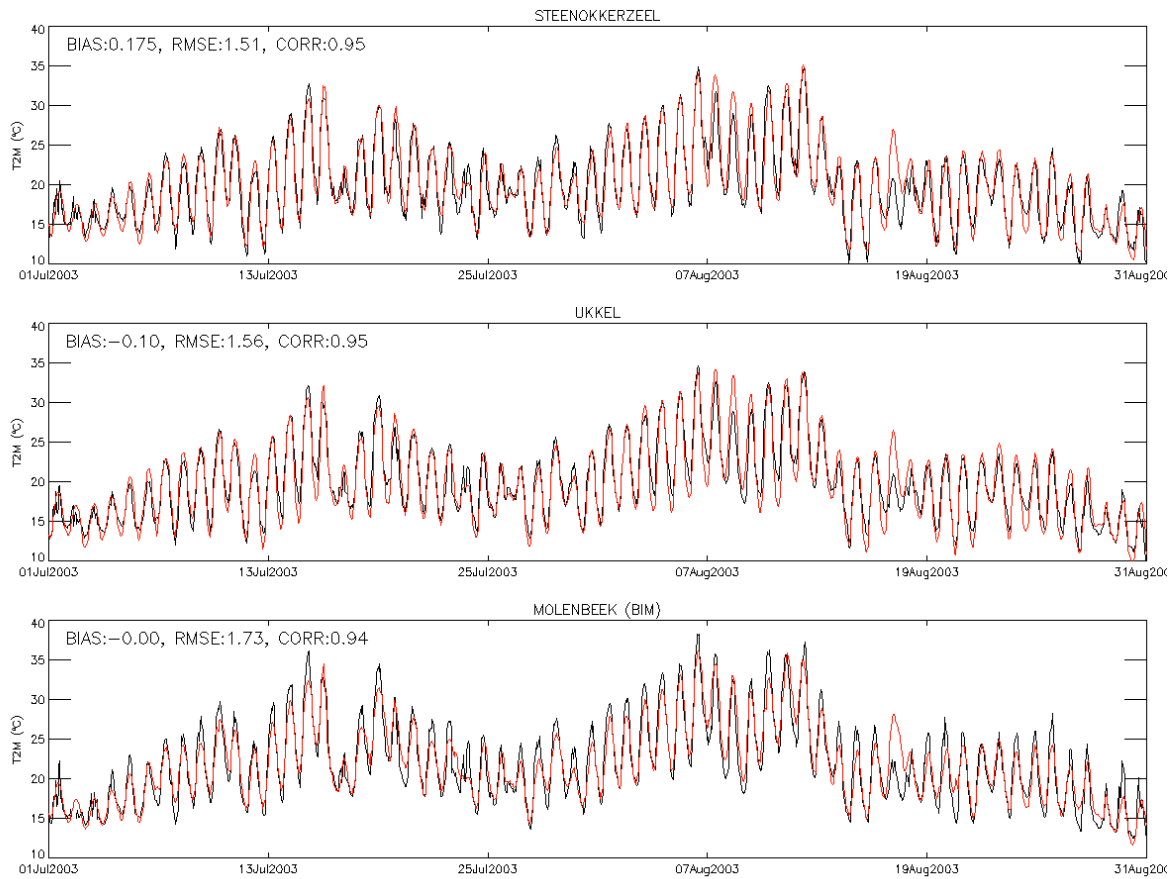
3.3. 2003

Figuur 15 toont de opnieuw de locatie van de meetstations en het gemiddelde stedelijk hitte-eiland van Brussel (ten opzichte van Steenokkerzeel), dit keer tijdens de zomer van 2003, de heetste zomer uit de recente geschiedenis. Het hitte-eiland is gemiddeld nog een beetje sterker tijdens deze zomer dan tijdens de zomer van 2016, en bedraagt ongeveer 5.5°C. Voor de verschillende meetlocaties zijn er uurlijkse data beschikbaar voor de maanden juli en augustus.



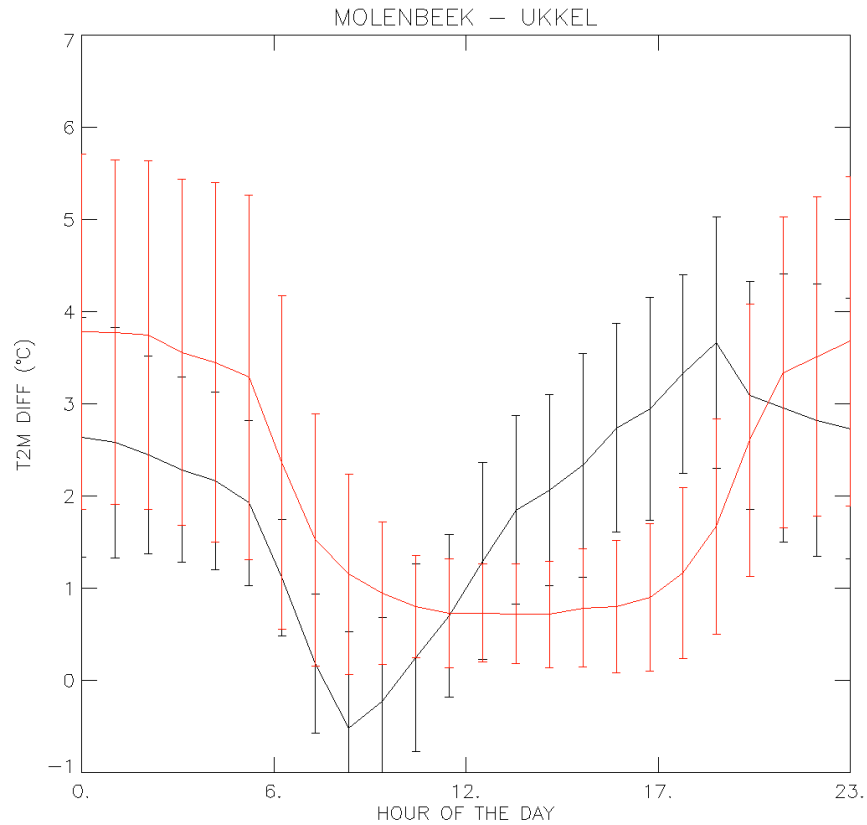
Figuur 15. Het gemiddeld stedelijk hitte-eiland van Brussel om 23u tijdens de zomer (juli-augustus) van 2003. De bolletjes tonen de locaties van de meetstations.

De validatiestatistieken van het uurlijkse verloop van de metingen en de modelresultaten tijdens de validatieperiode zijn opnieuw prima en komen sterk overeen met de waarden van 2016 (Figuur 16), alleen is dit keer de model bias zo goed als 0. Aangezien de modellering op identieke wijze is gebeurd als in 2016, toont dit aan dat de ERA-Interim basis data voor 2003 iets accurater zijn dan voor 2016. Kleine schommelingen in de performantie van ERA-Interim van jaar tot jaar komen wel vaker voor, zoals ook in de volgende Sectie te zien zal zijn.



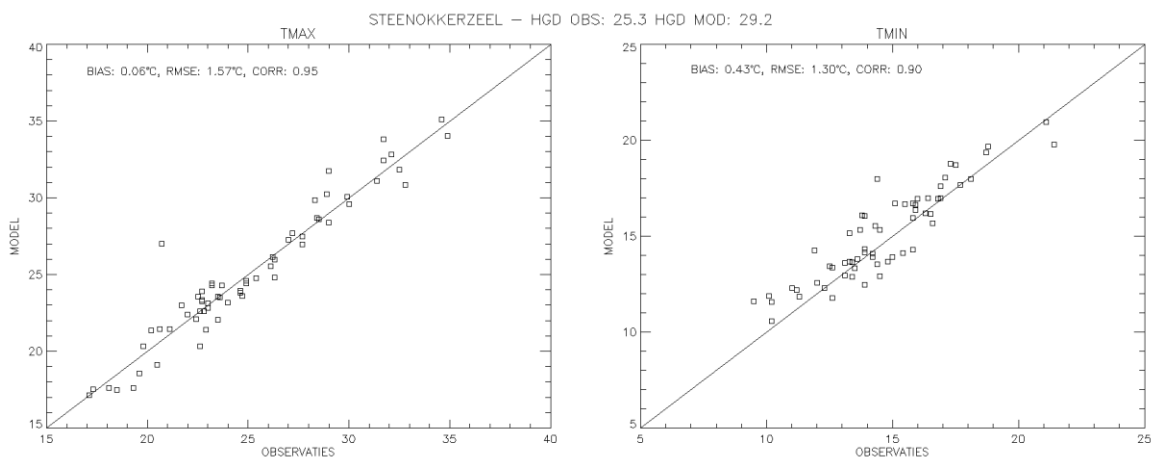
Figuur 16. Het uurlijkse verloop van de gemeten (zwart) en gesimuleerde (rood) 2m luchttemperaturen op de locatie van de metingen.

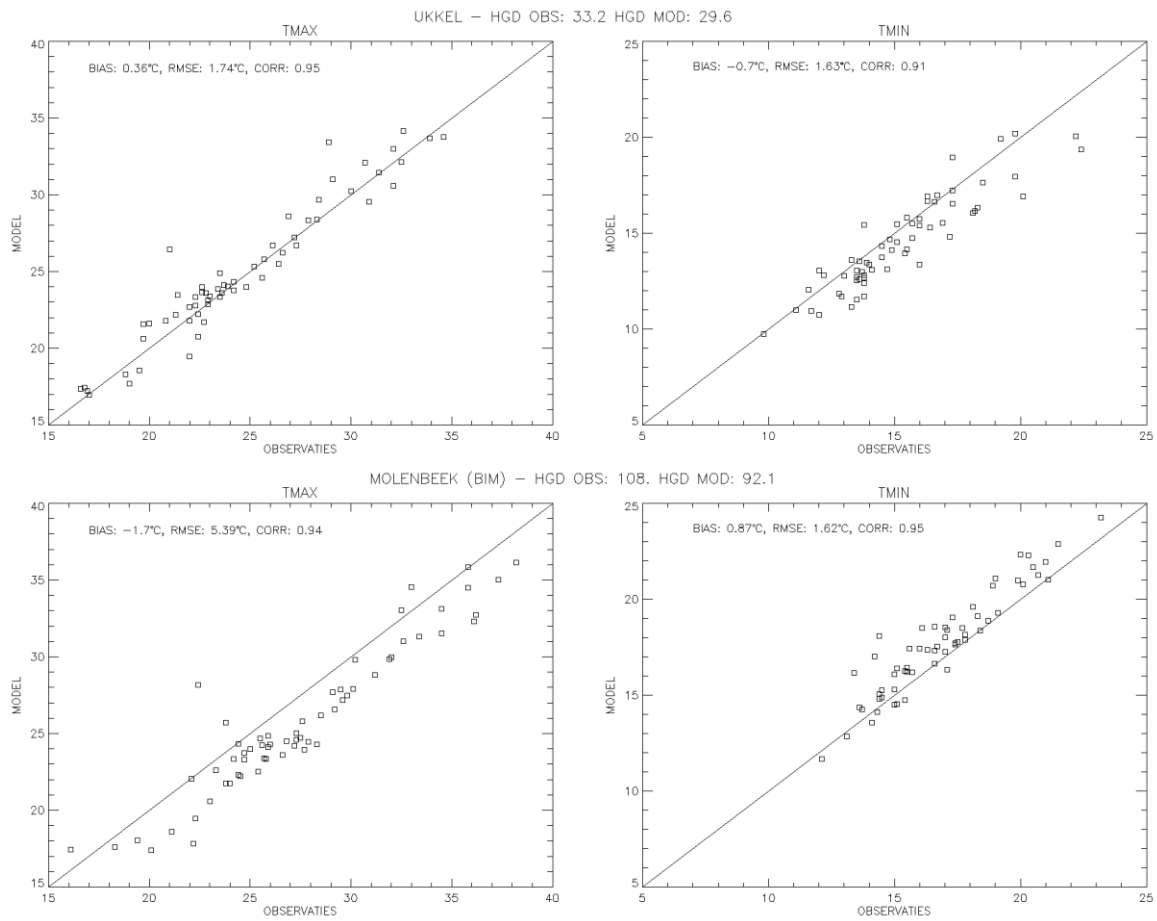
Wat betreft het stedelijk hitte-eiland tussen Ukkel en IBGE-BIM Molenbeek (Figuur 17) zien we weer een gelijkaardig patroon als in 2016, alleen is het nu nog iets meer uitgesproken met zelfs negatieve waarden in de voormiddag. Voor dit jaar zijn er geen VITO-metingen beschikbaar, dus het is op basis van deze metingen moeilijk in te schatten hoe goed het hitte-eiland wordt gereproduceerd door het model.



Figuur 17. Het daggemiddelde profiel van de gemeten (zwart) en gesimuleerde (rood) temperatuurverschillen tussen stad en platteland. De foutenmarges geven de standaard afwijkingen op het gemiddelde weer.

Figuur 18 toont opnieuw een vergelijking van de dagelijkse minima en maxima en het resulterende aantal hittegolfgraaddagen. De overeenkomst tussen model en metingen is erg goed voor deze zomerperiode. In Molenbeek wordt de onderschatting van de maxima wat gecompenseerd door een overschatting van de minima, waardoor het totaal aantal hittegolfgraaddagen vrij goed overeenkomt tussen model en metingen.

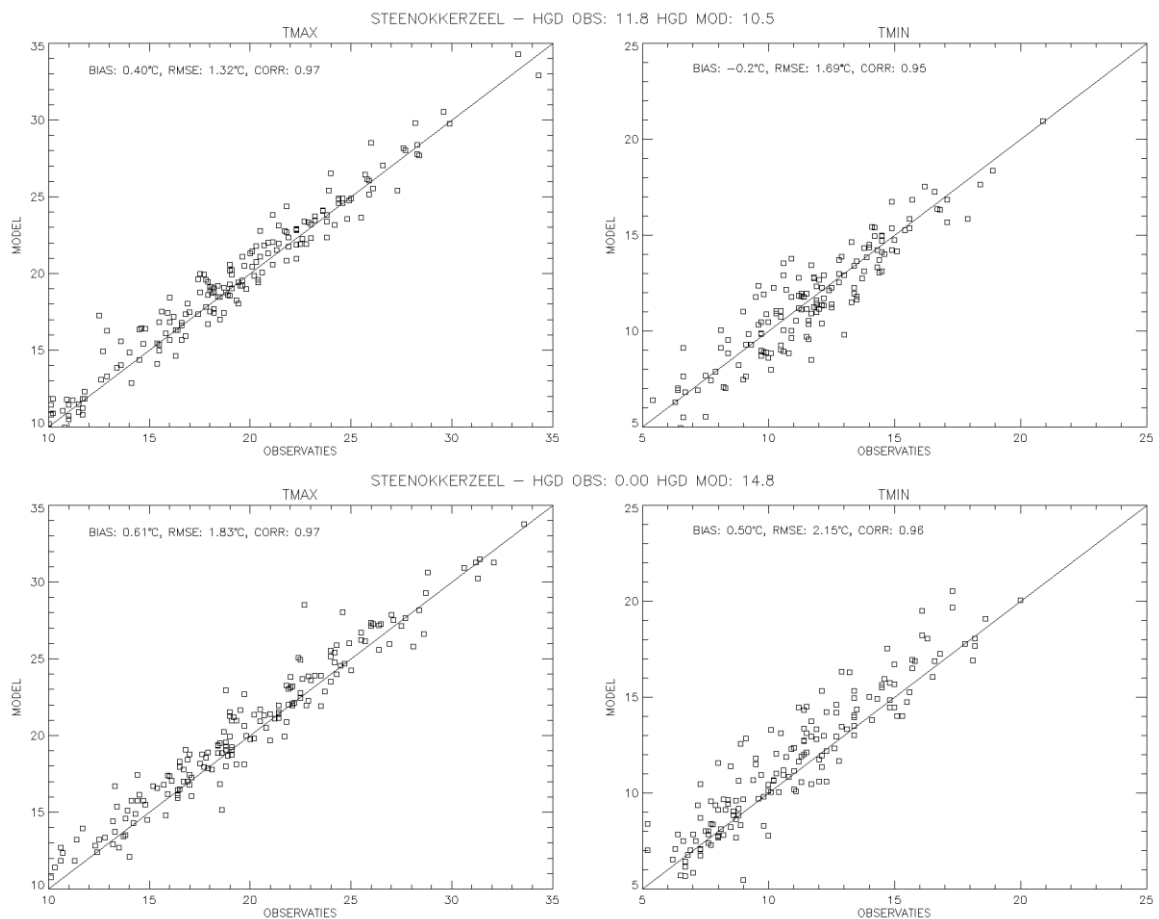


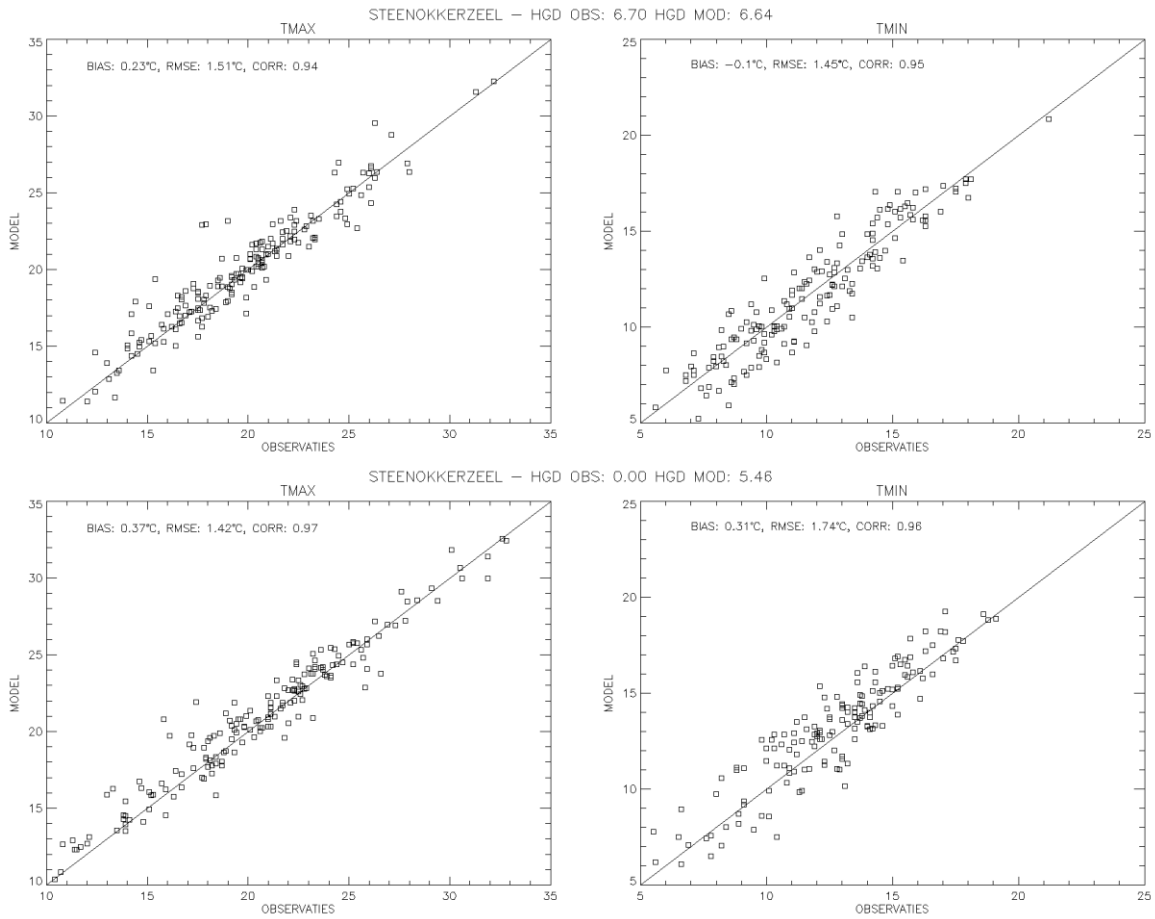


Figuur 18. Vergelijking tussen de geobserveerde en gemodelleerde dagelijkse maximale (links) en minimale (rechts) 2m luchttemperatuur voor de verschillende locaties. Bovenaan staan de resulterende hittegolfgraaddagen.

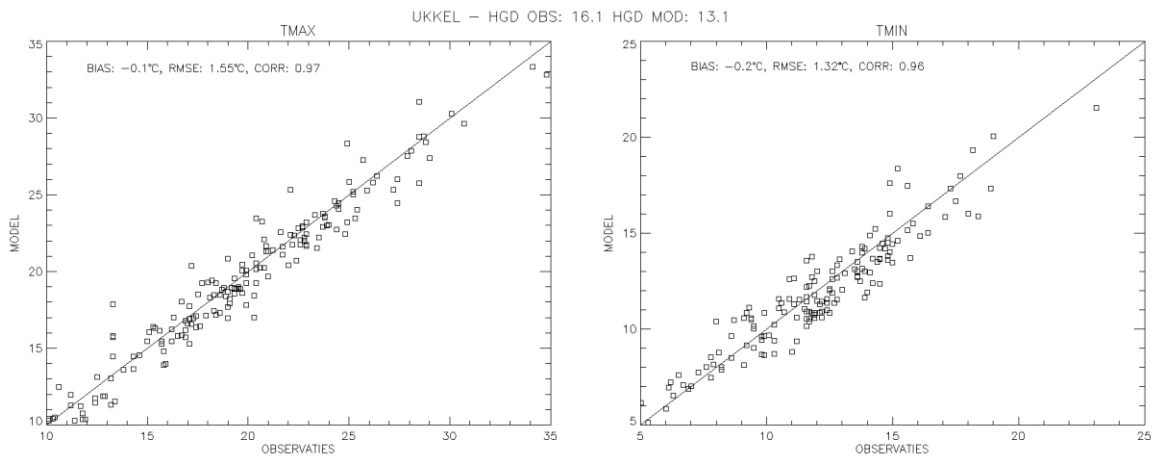
3.4. 2012-2015

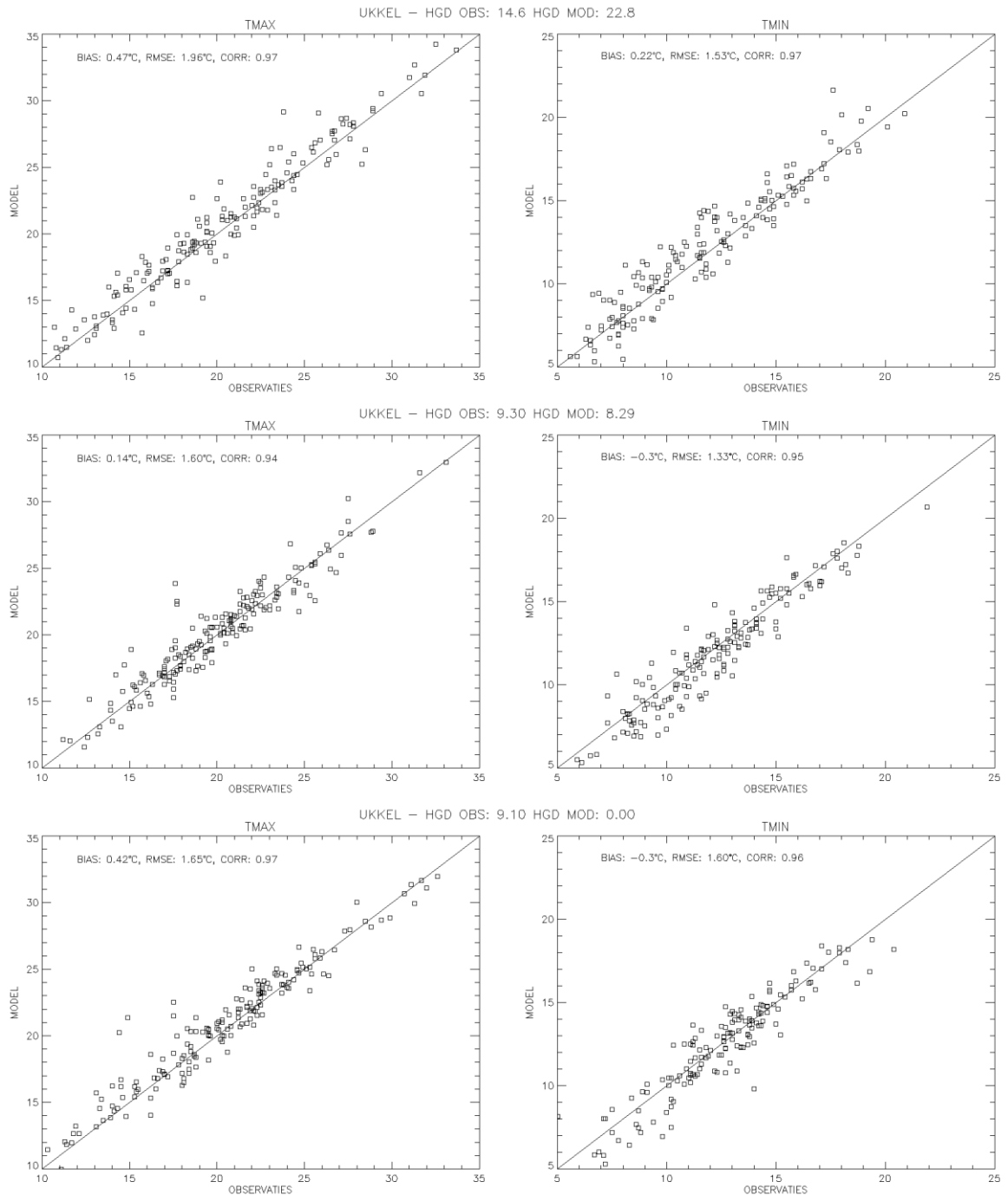
Tenslotte zijn er dagelijkse data van de drie meetstations beschikbaar voor de zomers (april-september) van 2012 tot en met 2015. Figuur 19 toont de resultaten voor Steenokkerzeel, die erg in lijn zijn met de voorgaande figuren. De statistieken zijn over het algemeen uitstekend, met enkel in 2013 een iets grotere positieve bias, waardoor het gemodelleerde aantal hittegolfgraaddagen in dat jaar een stuk hoger liggen. Ook voor Ukkel (Figuur 20) zijn de resultaten voor al deze zomerperioden uitstekend, met altijd een bias kleiner dan 0.5°C , een RMSE kleiner dan 2°C en correlaties boven 0.95. Voor de metingen van IBGE-BIM in Molenbeek (Figuur 21) zien we dezelfde tendensen als hiervoor, met een negatieve bias op de maxima van ongeveer 1°C en een iets kleinere positieve bias op de minima. Hierdoor komt het aantal hittegolfgraaddagen wel goed overeen tussen de metingen en het model. Ook in Molenbeek zien we voor de zomer van 2013 een minder goede overeenkomst met de metingen, allicht zijn de ERA-Interim data tijdens die zomer minder accuraat als in andere jaren.



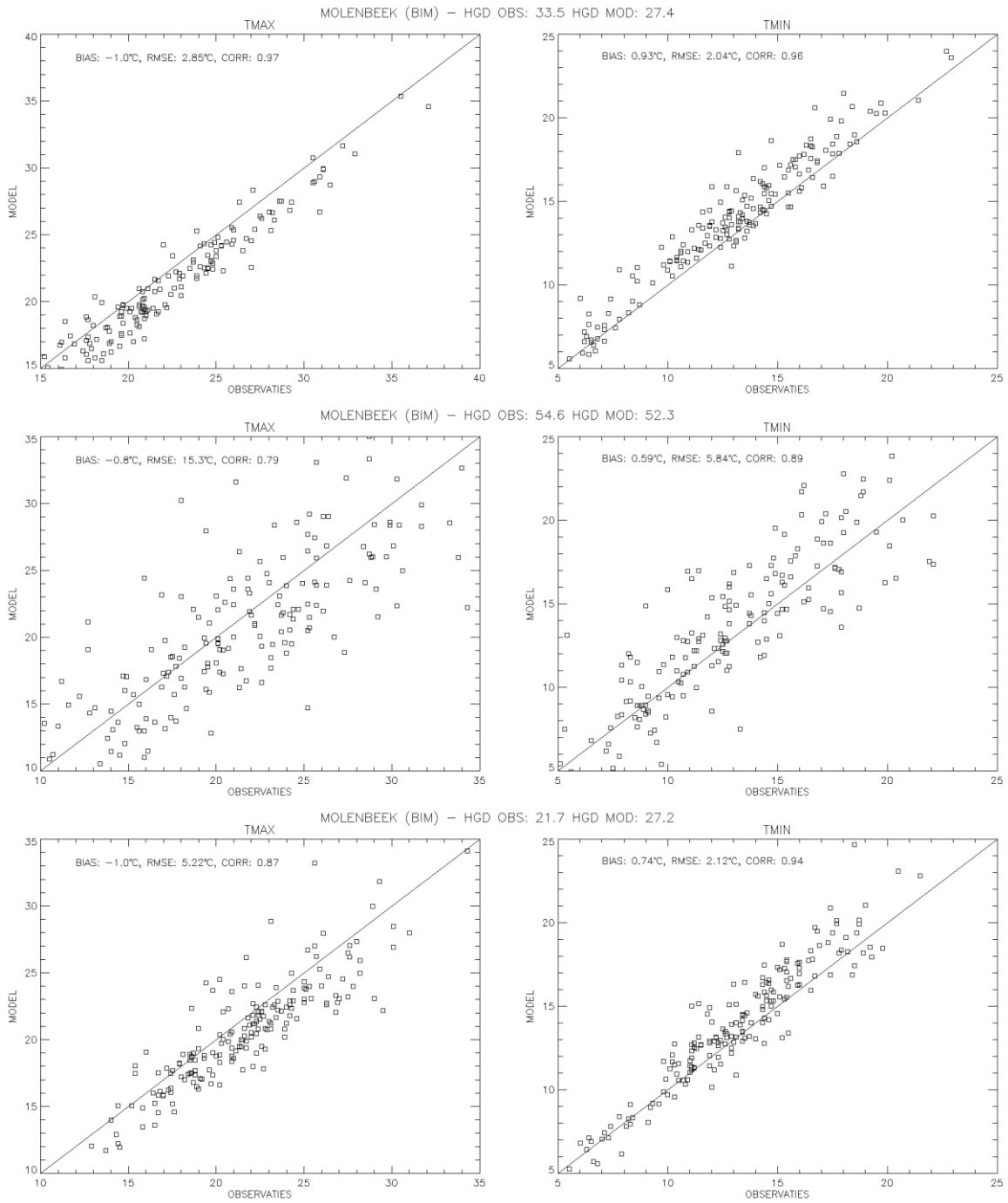


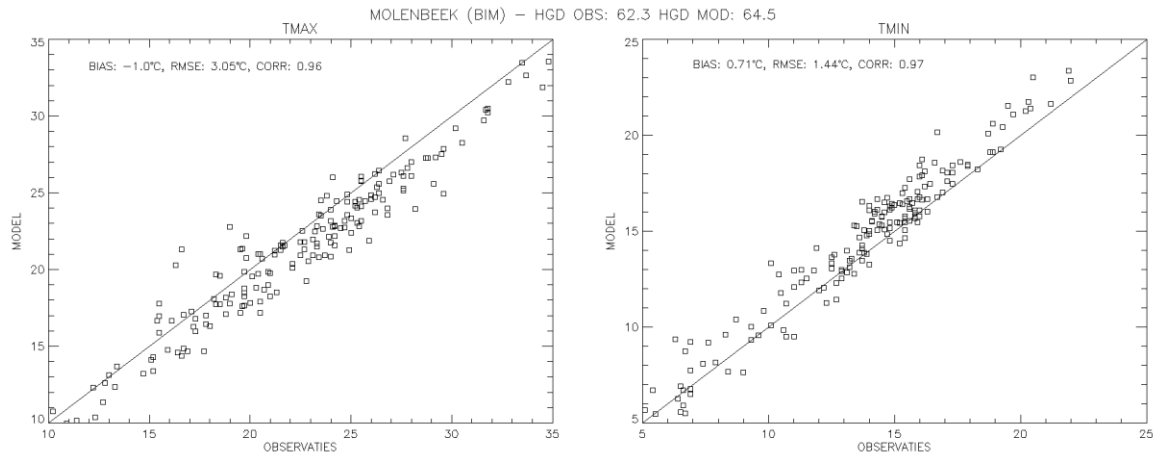
Figuur 19. Vergelijking tussen de geobserveerde en gemodelleerde dagelijkse maximale (links) en minimale (rechts) 2m luchttemperatuur in Steenokkerzeel voor respectievelijk de zomers van 2012, 2013, 2014 en 2015.





Figuur 20. Vergelijking tussen de geobserveerde en gemodelleerde dagelijkse maximale (links) en minimale (rechts) 2m luchttemperatuur in Ukkel voor respectievelijk de zomers van 2012, 2013, 2014 en 2015.

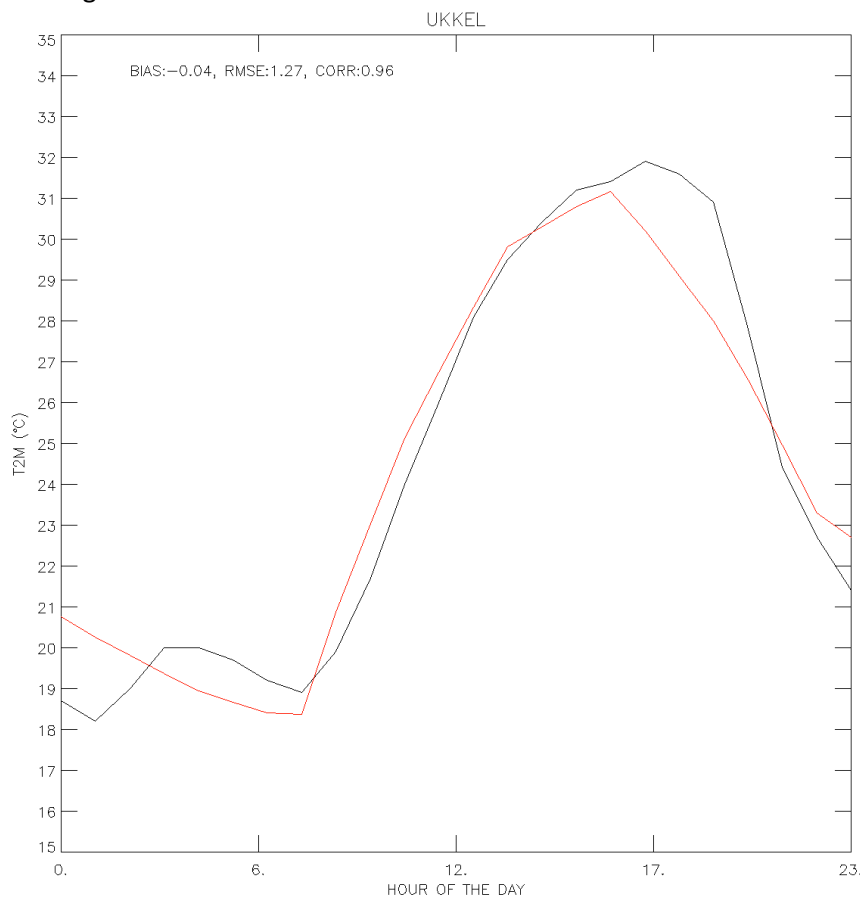




Figuur 21. Vergelijking tussen de geobserveerde en gemodelleerde dagelijkse maximale (links) en minimale (rechts) 2m luchttemperatuur in Molenbeek voor respectievelijk de zomers van 2012, 2013, 2014 en 2015.

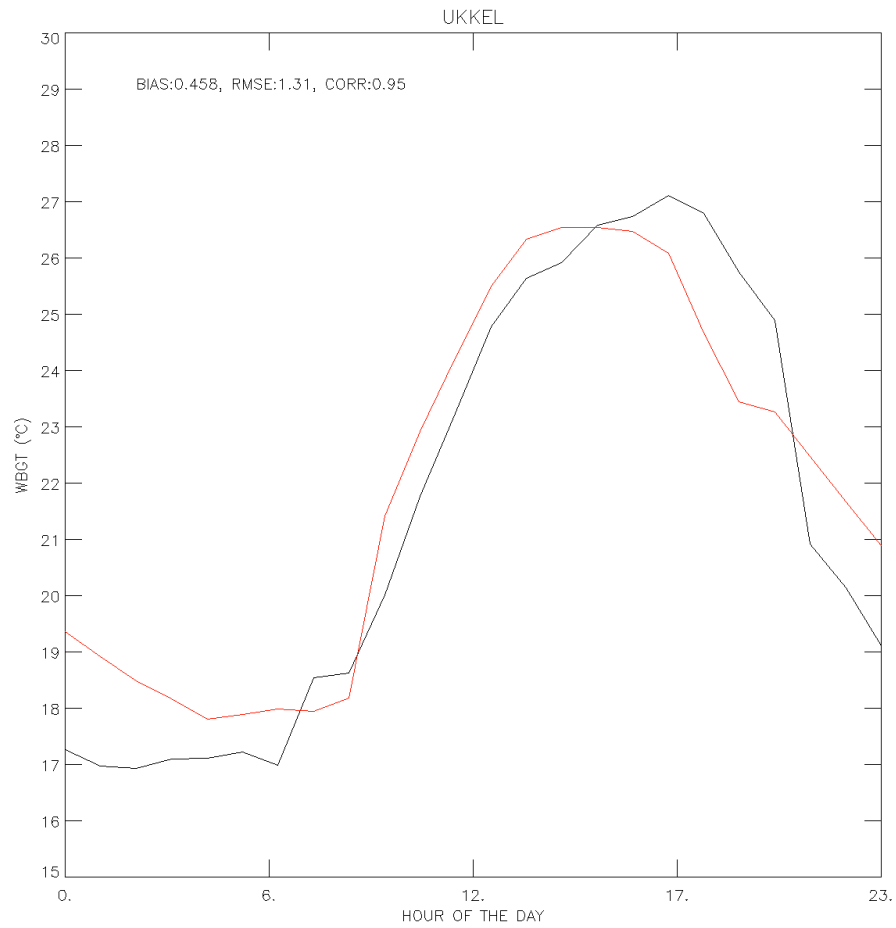
3.5. WBGT VALIDATIE

Naast de luchttemperaturen valideren we ook de gemodelleerde Wet Bulb Globe Temperatuur (WBGT) op 24 augustus 2016. Hiervoor zijn enkel metingen in Ukkel beschikbaar. De WBGT bestaat uit een combinatie van de gewone luchttemperatuur, de natte bol temperatuur en de zwarte bol temperatuur. Als we de gewone luchttemperatuur bekijken (Figuur 22), dan zien we dat deze goed wordt gesimuleerd in het model tot in de namiddag (16u), wanneer er wolken verschijnen in de ERA-Interim input data die er in werkelijkheid niet waren. Hierdoor koelen de temperaturen iets te snel af in de late namiddag.



Figuur 22. Vergelijking tussen de gemeten (zwart) en gesimuleerde (rood) luchttemperatuur in Ukkel op 24/08/2016.

Figuur 23 toont het gemeten en gemodelleerde dagverloop van de WBGT, dat er erg gelijkaardig uitziet als voor de gewone luchttemperaturen. De WBGT-waarden liggen altijd een stukje lager dan de gewone temperatuurwaarden. We zien dat het model de waarden 's nachts wat overschat, allicht door een iets te hoge luchtvochtigheid, maar dat de hoogste waarden overdag wel goed worden gereproduceerd. Net als bij de luchttemperaturen dalen de gemodelleerde WBGT waarden in de namiddag iets te snel. Maar al bij al is het model toch goed in staat om het dagverloop te reproduceren, en liggen de (meest relevante) maximale waarden dicht bij de meetwaarden.



Figuur 23. Vergelijking tussen de gemeten (zwart) en gesimuleerde (rood) Wet Bulb Globe Temperature in Ukkel op 24/08/2016.

3.6. DISCUSSIE EN CONCLUSIE

In dit hoofdstuk werden de resultaten van het UrbClim model vergeleken met metingen uitgevoerd op drie verschillende locaties in en rond Brussel, voor de zomers van 2003 en 2012-2016. De vergelijking focuste op de 2m luchttemperaturen, aangezien deze de basis vormen voor het berekenen van de hittestress indicatoren. In Tabel 2 worden de belangrijkste resultaten nog eens samen gevat over alle zomerperioden heen.

Tabel 2: Overzicht van de gemeten en gemodelleerde dagelijkse minimale en maximale 2m luchttemperaturen (°C) en het aantal hittegolfgaaddagen (°C.d.) in alle meetstations, gemiddeld over alle zomerperioden.

	Tmin			Tmax			HGD	
	BIAS	RMSE	CORR	BIAS	RMSE	CORR	OBS	MOD
Steeokkerzeel	0.43	2.09	0.90	0.35	1.93	0.94	7.3	13.5
Ukkel	-0.19	1.43	0.94	0.34	1.64	0.96	15.3	13.1
Molenbeek-BIM	0.83	2.56	0.92	-1.08	5.73	0.91	54.8	52.6
Molenbeek-VITO	1.02	1.97	0.92	0.12	1.02	0.96	36.1	51.8

Wanneer de gemeten en gemodelleerde uurlijkse 2m luchttemperaturen rechtstreeks met elkaar vergeleken worden, zien we erg consistente resultaten voor alle locaties. De modelresultaten blijven steeds dicht bij de metingen, met dank aan de goede ERA-Interim basis data, waar het UrbClim model dicht bij aan blijft leunen. Het model vertoont over het algemeen een licht positieve bias, die vooral te wijten is aan een overschatting van de nachtelijke temperaturen. Dit is een gekend probleem in de modellerwereld, allicht te wijten aan een overschatting van de turbulente menging in stabiele omstandigheden 's nachts.

Ook de temperatuurverschillen tussen stad en platteland zijn met elkaar vergeleken voor verschillende zomerperioden, maar hier hadden we het probleem dat verschillende meetstations gebruik maken van passief geventileerde metingen, hetgeen overdag tot overschattingen kan leiden, zeker in stedelijke omgevingen. Hierdoor zagen de gemeten verschilprofielen er soms vreemd uit, en kwamen ze overdag niet goed overeen met de modelresultaten. Het warmte-effect 's nachts kwam wel redelijk goed overeen tussen model en metingen, al heeft het model de neiging om het hitte-eiland effect licht te overschatten.

Vervolgens werden de dagelijkse maximale en minimale 2m luchttemperaturen met elkaar vergeleken, die de basis vormen voor de berekening van de verschillende hitte-indicatoren. Het model doet het over het algemeen uitstekend, enkel zien we in Molenbeek een consistente overschatting van de nachtelijke minima met ongeveer 1°C, en een onderschatting van de maxima met ongeveer 1°C. De resultaten variëren lichtjes van jaar tot jaar, afhankelijk van de accuraatheid van de ERA-Interim data die als basis voor de modellering dienen. Als we naar het resulterende aantal hittegolfgaaddagen kijken, dan zien we dat deze indicator voor Steenokkerzeel meestal licht wordt overschat, en voor Ukkel licht wordt onderschat. In Molenbeek heffen de positieve bias voor de minima en de negatieve bias voor de maxima elkaar ongeveer op, waardoor het aantal hittegolfgaaddagen erg goed overeenkomt tussen model en metingen.

Vooraleer we tot een conclusie overgaan, is het niet slecht om ook even stil te staan bij de onzekerheid op de metingen. In bovenstaande vergelijking is er steeds van uitgegaan dat de metingen zonder fout zijn, maar dit klopt uiteraard niet, eerder onderzoek toonde aan dat er op (goed uitgevoerde) metingen een onzekerheid van ongeveer 0.4°C zit (De Ridder et al., 2015a). Op

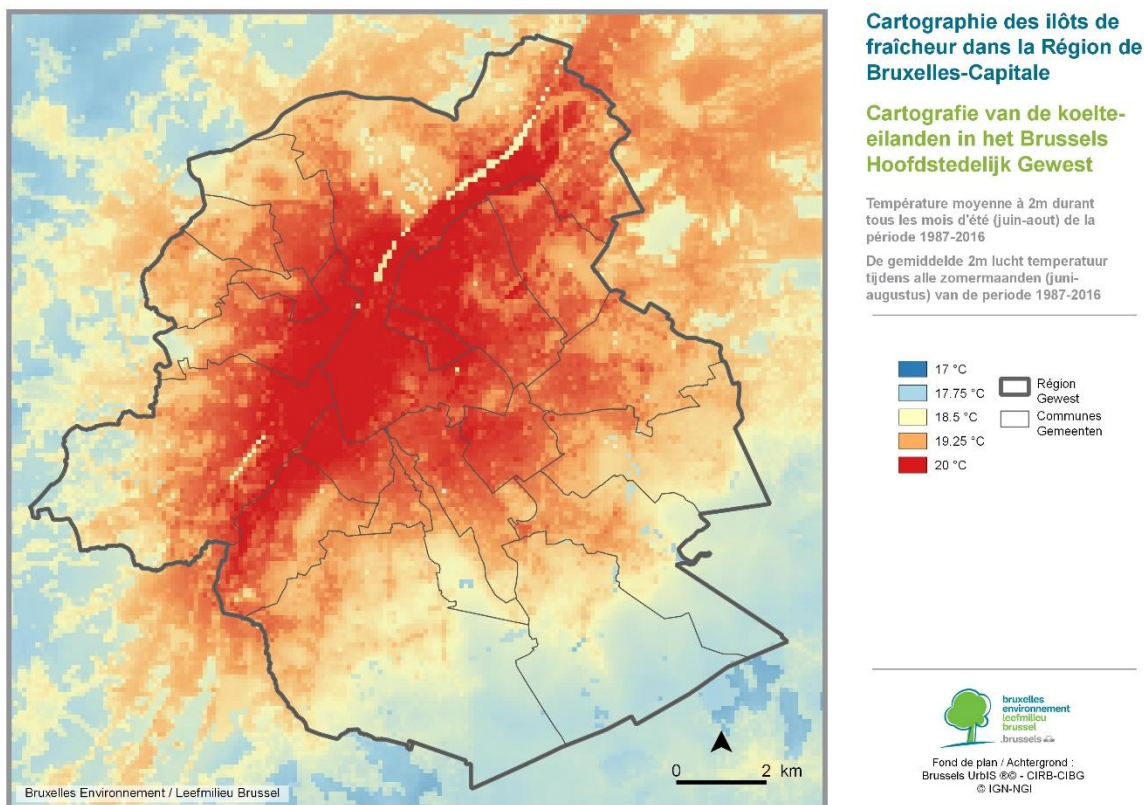
de passief geventileerde metingen in Steenokkerzeel en Molenbeek-BIM is de onzekerheid uiteraard nog een stuk hoger. In het VMM-MIRA project hebben we eerder het effect van zo'n onzekerheid toegepast in een Monte Carlo simulatie, waarbij we 1000 nieuwe tijdreeksen hebben geproduceerd, met voor elke tijdstap een willekeurige afwijking, getrokken uit een normaal verdeelde distributie met gemiddelde 0 en standaard deviatie van 0.4. Het resultaat hiervan waren typische afwijkingen van een 10-tal hittegolfgaaddagen, ongeveer de grootte-orde van de modelafwijkingen die we maximaal terugvinden in de validatieresultaten. Met andere woorden, de typische modelafwijkingen liggen in de buurt van de maximale onzekerheid op de metingen.

Tenslotte werden ook de gemodelleerde Wet Bulb Globe Temperaturen gevalideerd met metingen in Ukkel. Het model bleek in staat om het dagverloop op de geselecteerde zomerdag goed te reproduceren, mits een lichte overschatting van de nachtelijke waarden en een te snelle afkoeling in de late namiddag. Voor deze studie zijn vooral de maximale waarden in de vroege namiddag relevant, en die werden correct door het model gesimuleerd.

Uit de bovenstaande resultaten kunnen we besluiten dat het UrbClim model geschikt is voor gebruik in deze IBGE-BIM studie.

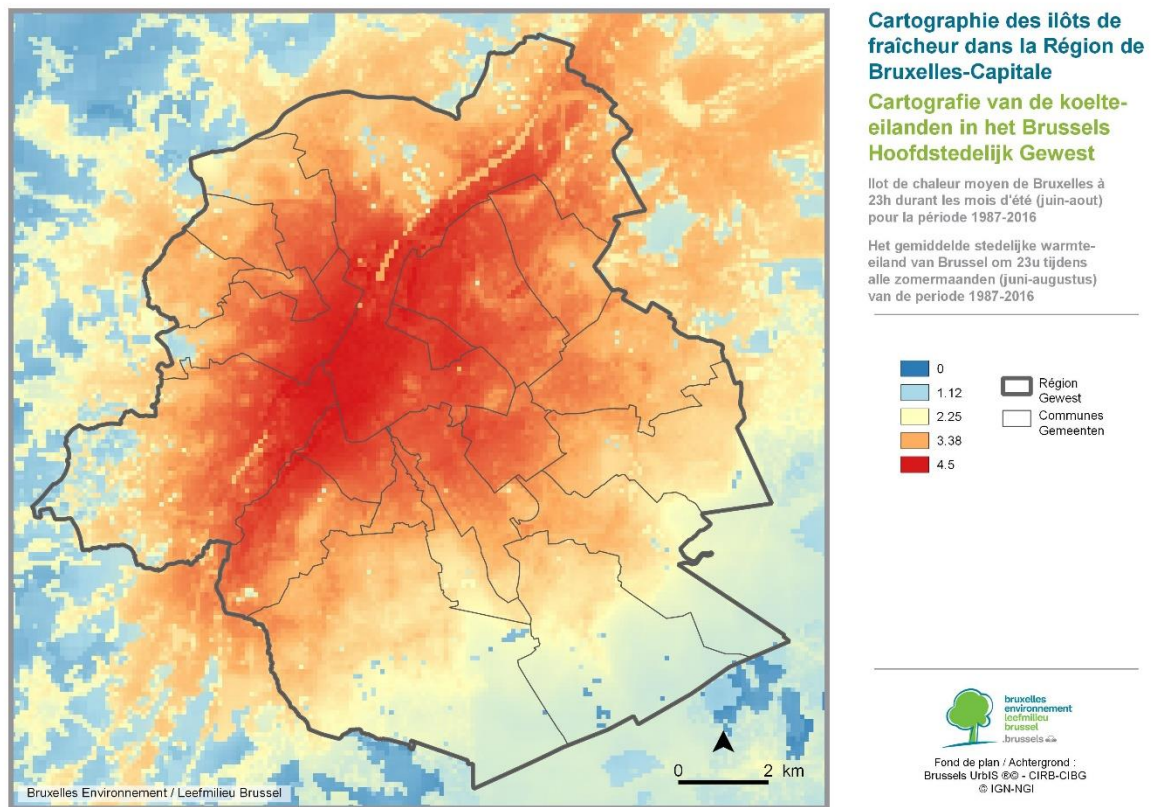
HOOFDSTUK 4. BASISKAARTEN BRUSSEL

Op basis van alle UrbClim simulaties voor de warme maanden (april-september) van de periode 1987-2016 zijn een aantal geaggregeerde kaarten aangemaakt die relevant zijn voor het inschatten en kwantificeren van de hittestress situatie in Brussel. In dit hoofdstuk wordt een selectie van dit kaartmateriaal voorgesteld en besproken. Figuur 24 toont de gemiddelde temperatuur tijdens alle zomermaanden voor de 30-jarige periode. We merken dat er duidelijk sprake is van een warmte-eiland in het centrum van Brussel, met temperaturen die er in de zomer gemiddeld zo'n 3°C hoger liggen dan op het platteland rond de stad. De hogere temperaturen doen zich in grote zones van het verstedelijkte stadcentrum voor, enkel boven de wateroppervlakken en in grote parken liggen de temperaturen iets lager. De echt koelere zones zijn ver buiten het centrum te vinden in de open akker- en graslanden of in de bosgebieden.



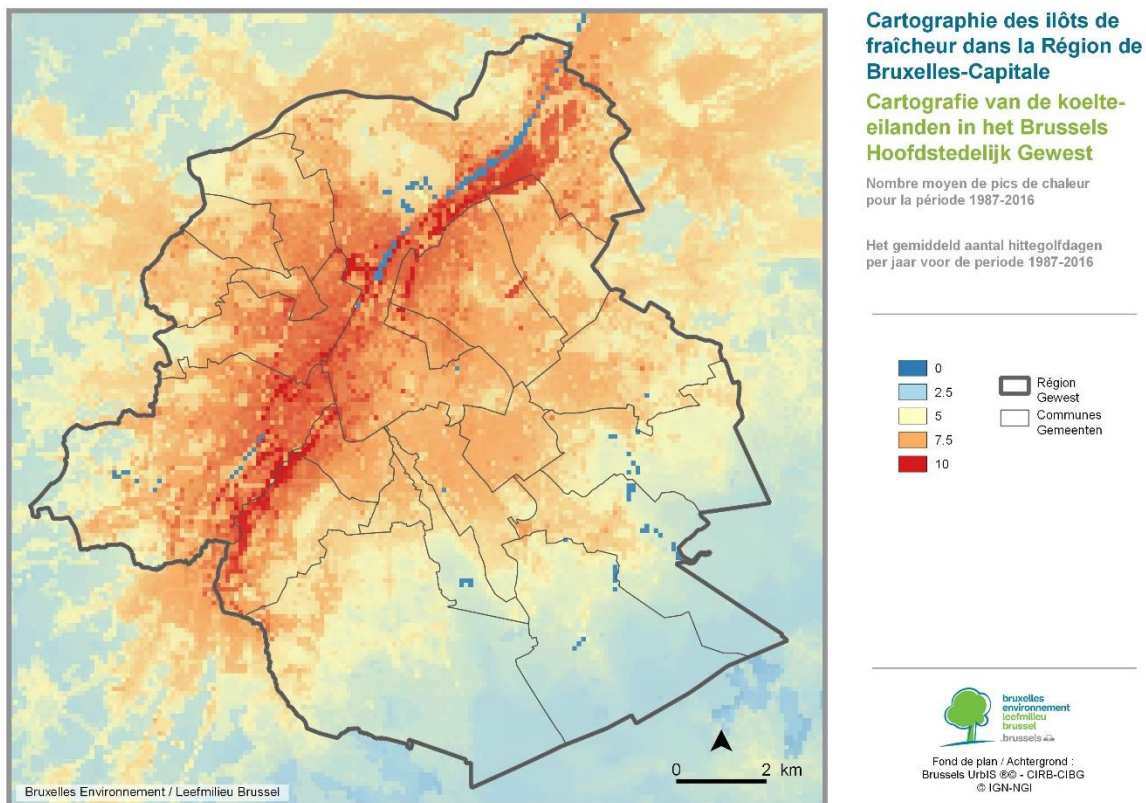
Figuur 24. De gemiddelde 2m lucht temperatuur tijdens alle zomermaanden (juni-augustus) van de periode 1987-2016.

Figuur 25 toont de gemiddelde situatie om 23u over alle zomermaanden van alle jaren, het uur dat het stedelijk hitte-eiland normaal gezien het meest uitgesproken is. Op dit tijdstip bedragen de temperatuurverschillen tussen het centrum van de stad en het platteland errond gemiddeld ongeveer 4.5°C, een aanzienlijk verschil. Het gaat hier zoals gezegd om een gemiddelde situatie, tijdens warme, windstille dagen met veel zonneschijn kan dit makkelijk oplopen tot 8 à 9°C, terwijl het op bewolkte, regenachtige dagen slechts om 1 à 2°C gaat.



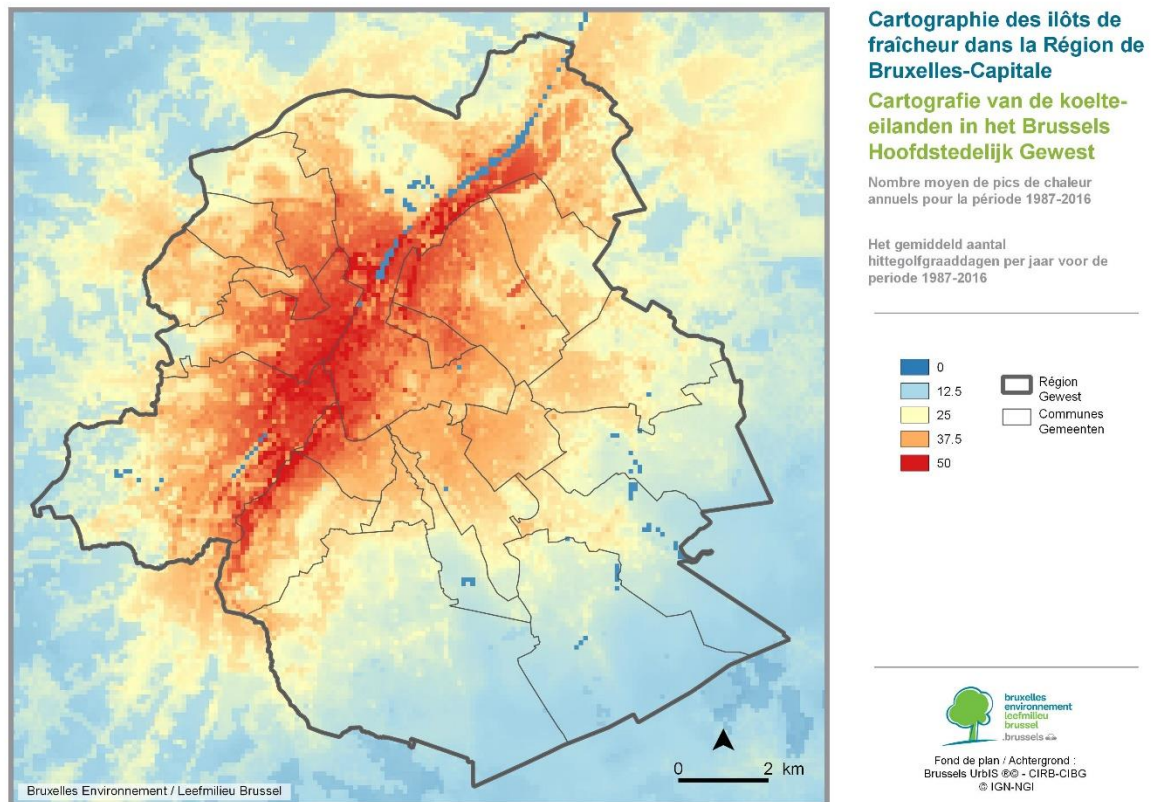
Figuur 25. Het gemiddelde stedelijke warmte-eiland van Brussel om 23u tijdens alle zomermaanden (juni-augustus) van de periode 1987-2016.

Bovenstaande kaarten tonen vooral de nachtelijke temperatuurverschillen tussen stad en platteland. Om een beter totaalbeeld te krijgen van de extra hittestress die mensen in de stad te verwerken krijgen, hebben we het aantal dagen met alarmfase 2 voor “grote hitte” berekend (volgens de definities uit het Hitte-en Ozonpiekenplan 2015 van de FOD Volksgezondheid). Deze definitie is gebaseerd op de overschrijding van een drempelwaarde voor zowel de maximum (30°C) als de minimum (18°C) temperatuur. Figuur 26 toont het ruimtelijk beeld van het aantal hittegolfdagen per jaar in Brussel en omgeving. Het is duidelijk dat mensen in de stad meer dan dubbel tot zelfs drie keer zoveel hittegolfdagen te verwerken krijgen dan mensen die in de meer landelijke gebieden rond de stad wonen.



Figuur 26. Het gemiddeld aantal hittegolfdagen per jaar voor de periode 1987-2016.

Het wordt nog erger wanneer we niet alleen kijken naar wanneer de drempelwaarden worden overschreden, maar ook met hoeveel graden Celsius ze worden overschreden, de zogenaamde 'hittegolfgraaddagen' of HGD indicator die door VMM-MIRA naar voor wordt geschoven om de hittestress in Vlaanderen in kaart te brengen (Lauwaet et al., 2017). De waarden in het centrum van Brussel zijn hoger dan eender waar in Vlaanderen, al is het duidelijk dat wateroppervlakken en vegetatie lokaal een groot verkoelend effect hebben.



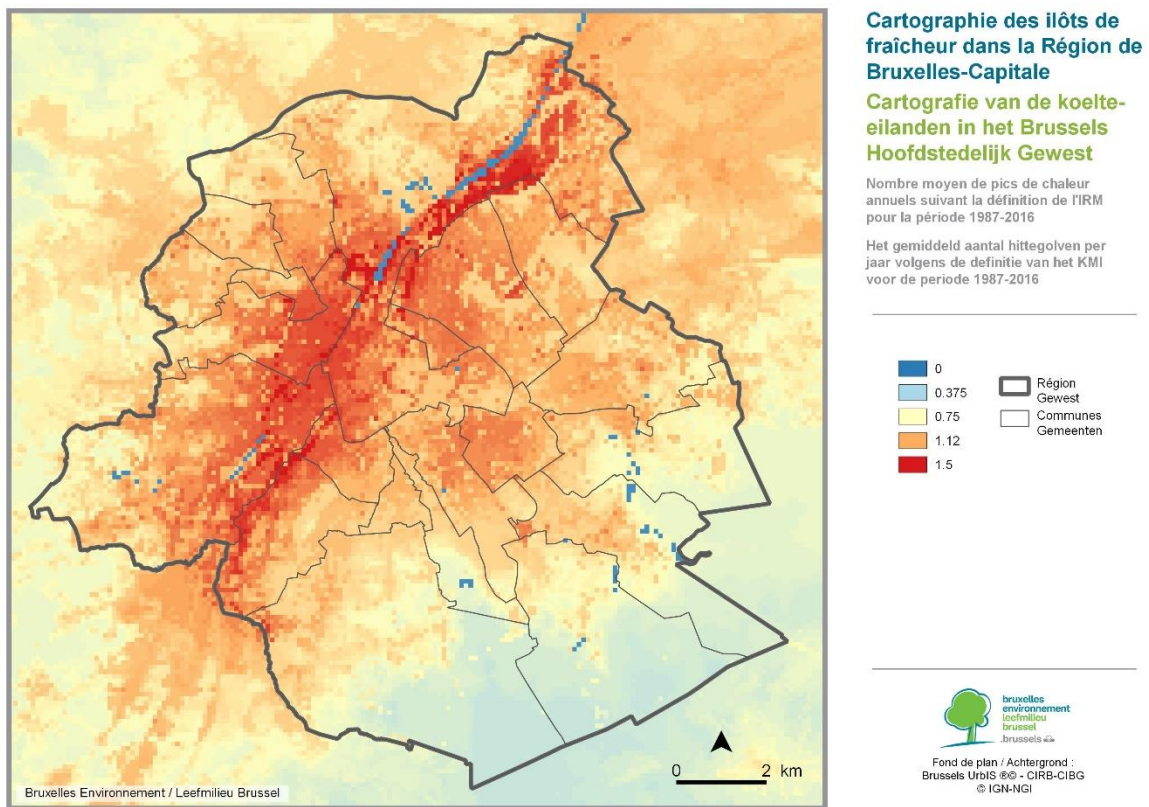
Figuur 27. Het gemiddeld aantal hittegolfgraaddagen per jaar voor de periode 1987-2016.

De HGD waarden die we in deze studie gemiddeld uitkomen liggen een beetje lager dan de waarden uit de VMM-MIRA studie voor Brussel, en het ruimtelijk patroon ziet er ook lichtjes verschillend uit. Dit heeft verschillende oorzaken:

- De gebruikte input landgebruik kaarten voor de modellering zijn verschillend
- De modellering is gebeurd voor verschillende tijdperiodes (1987-2016 voor deze studie, en 2000-2016 in de VMM-MIRA studie)
- De indicator wordt berekend met verschillende drempelwaarden (18 en 30°C in deze studie, tegenover 18.2°C en 29.6°C in de VMM-MIRA studie).

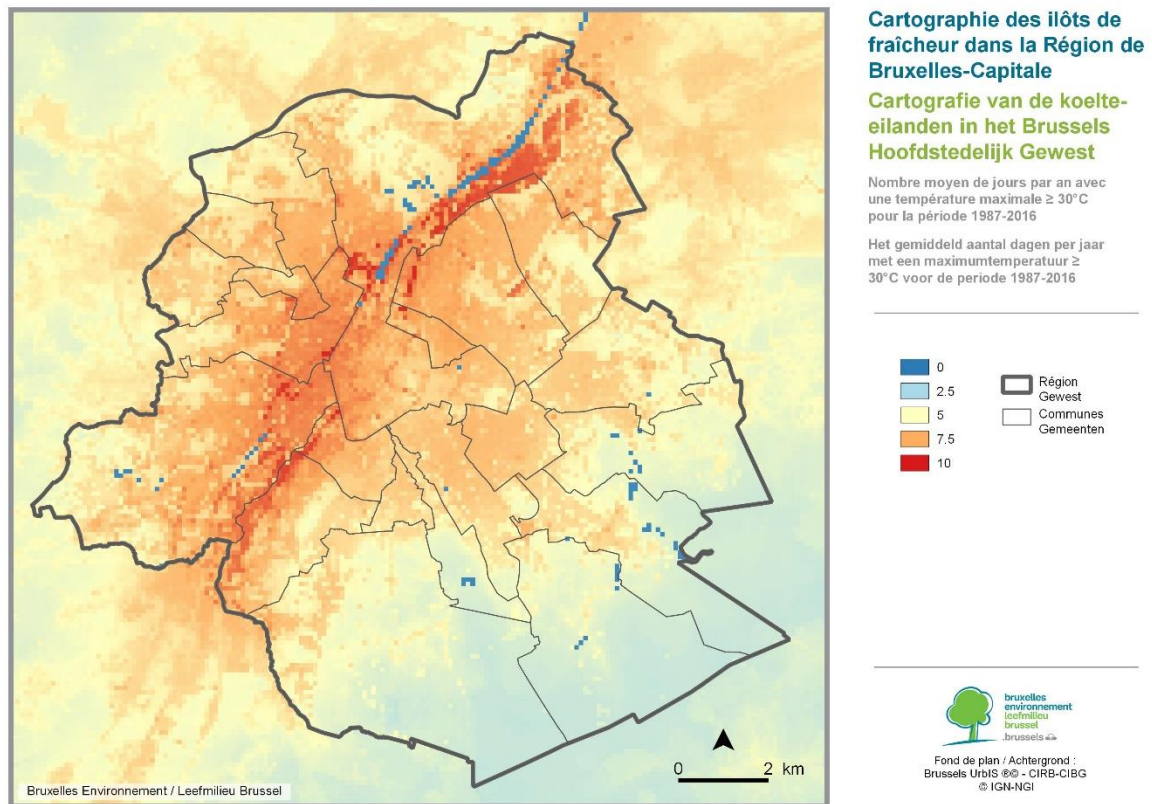
Dit alles maakt dat beide kaarten niet met elkaar vergeleken kunnen worden.

Zoals aangegeven in de inleiding hebben we ook het aantal hittegolven volgens de definitie van het KMI berekend, gebaseerd op de dagelijkse maxima (Figuur 28). Ook hier zien we opnieuw het grote verschil tussen het centrum en daarbuiten, met opnieuw de hoogste waarden in de lager gelegen kanaalzone en de industriegebieden. De ruimtelijke patronen van al deze kaarten lijken uiteraard sterk op elkaar, omdat ze gebaseerd zijn op dezelfde basis data.

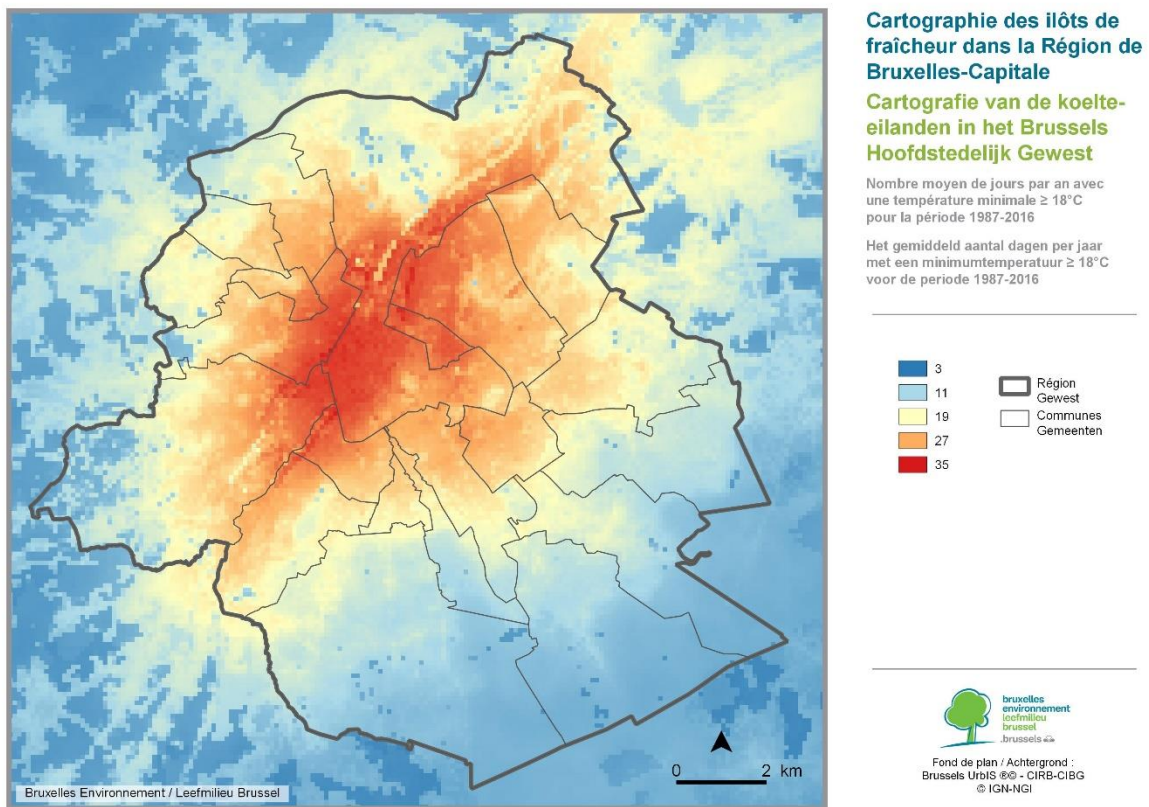


Figuur 28. Het gemiddeld aantal hittegolven per jaar volgens de definitie van het KMI voor de periode 1987-2016.

Tenslotte tonen we nog het gemiddeld aantal dagen per jaar dat de respectievelijke drempelwaarden voor de maxima (Figuur 29) en minima (Figuur 30) worden overschreden. Uit de figuren blijkt duidelijk dat de drempelwaarde voor de minimum temperaturen veel makkelijker wordt overschreden in Brussel dan de drempelwaarde voor de maximum temperaturen, omwille van het stedelijke hitte-eiland dat 's nachts een stuk sterker is dan overdag. Verder valt op dat wateroppervlakken en vegetatie een groter effect hebben op de maximum temperaturen, en dat de laagste minima zich voordoen in open landelijk gebied.

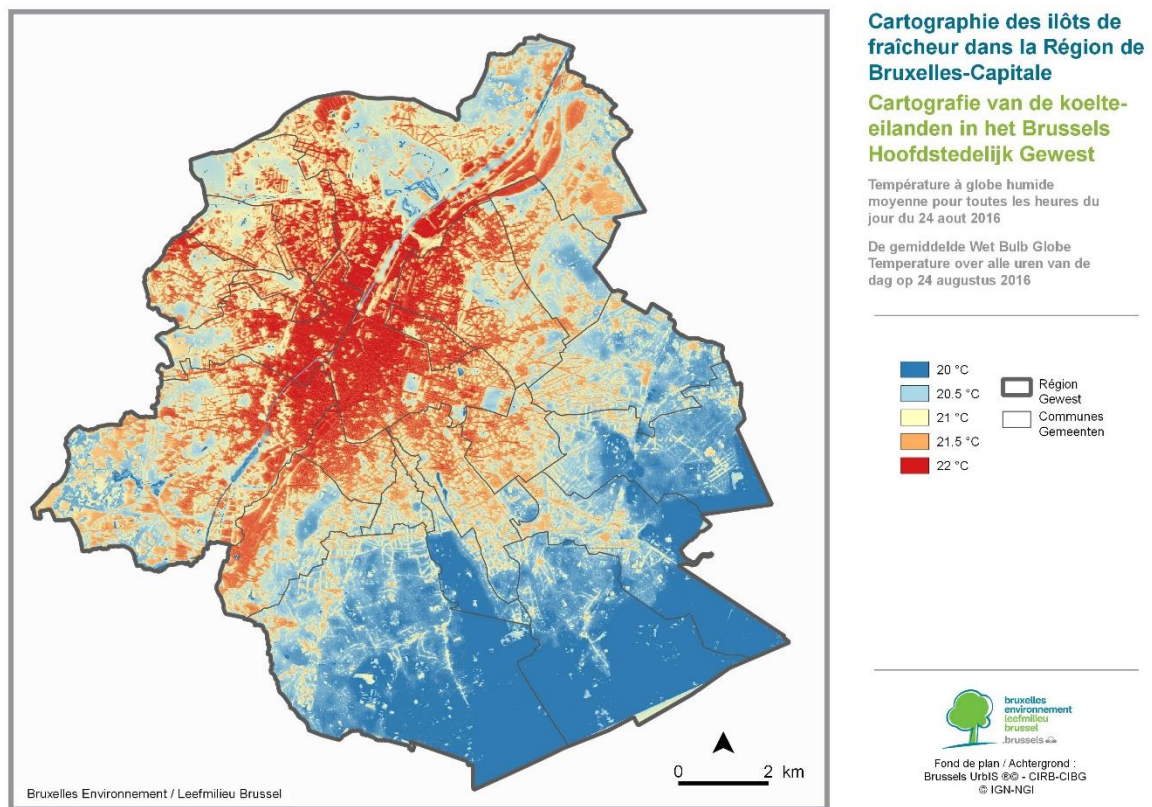


Figuur 29. Het gemiddeld aantal dagen per jaar met een maximumtemperatuur $\geq 30^{\circ}\text{C}$ voor de periode 1987-2016.



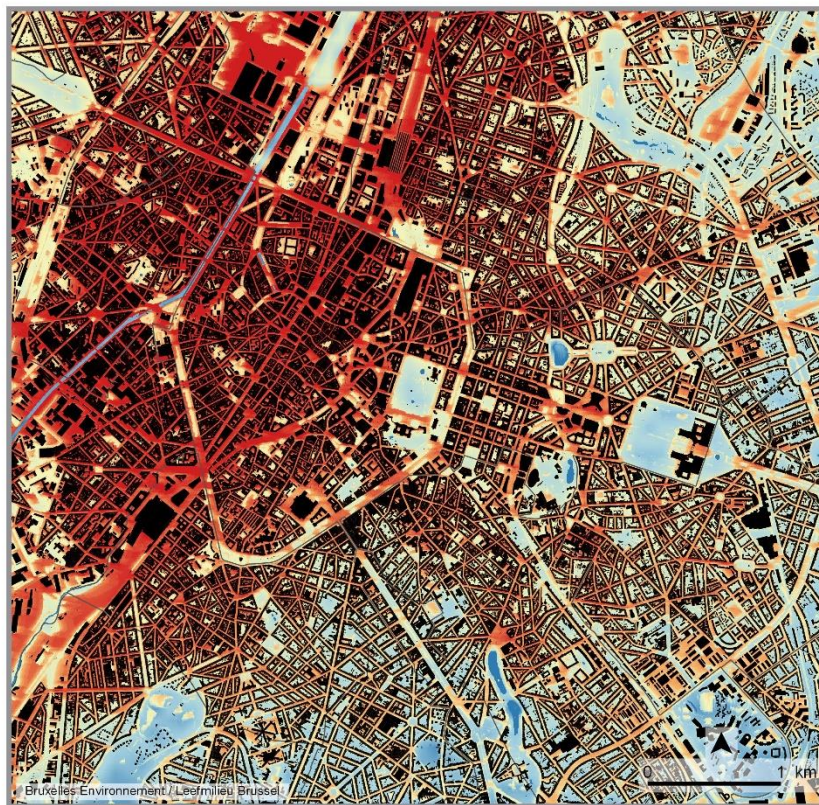
Figuur 30. Het gemiddeld aantal dagen per jaar met een minimumtemperatuur $\geq 18^{\circ}\text{C}$ voor de periode 1987-2016.

Bovenstaande kaarten geven een goed beeld van de algemene hittestress situatie in Brussel en het verschil met de gemeenten rondom, maar tonen weinig detail binnen het verstedelijkte centrum. Lucht temperaturen variëren nu eenmaal weinig over korte afstanden. Maar zoals eerder aangegeven wordt hittestress door meer bepaald dan enkel de lucht temperatuur, en is het beter om naar een alles omvattende indicator te kijken die met hoge resolutie kan berekend worden, met name de Wet Bulb Globe Temperature. Omdat de input data voor de berekeningen beperkt waren tot het grondgebied van Brussel, kan de WBGT dus enkel daar berekend worden. Omwille van de zware berekeningen was het enkel mogelijk om dit voor een typische hete zomerdag (24 augustus 2016) te doen. Dit is het meest relevant in de zoektocht naar koelteplekken die op zulke dagen afdoende bescherming tegen de hitte bieden.



Figuur 31. De gemiddelde Wet Bulb Globe Temperature over alle uren van de dag op 24 augustus 2016.

Figuur 31 toont de gemiddelde WBGT situatie in Brussel op 24 augustus 2016. De indicator varieert tussen 20 en 22°C, iets lager dus dan normale lucht temperaturen. Het ruimtelijk patroon op de kaart oogt wat anders dan op de voorgaande kaarten en er is veel meer detail op te zien. De hoogste waarden worden bereikt in de open stedelijke locaties waar geen beschutting is tegen de zon, en de grote open vlaktes van beton en asfalt sterk opwarmen gedurende de dag. Locaties waar er schaduwvorming is door gebouwen of bomen zijn iets koeler, terwijl de grotere parken/bossen en wateroppervlakten duidelijk de koelste plekken zijn. Wanneer we inzoomen op het centrum van Brussel komen de details van de kaart nog wat beter tot hun recht (Figuur 32).



Cartographie des îlots de fraîcheur dans la Région de Bruxelles-Capitale

Cartografie van de koelte-eilanden in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest

Température au thermomètre-globe mouillé (Wet Bulb Globe Temperature) pour toutes les heures du jour du 24 août 2016 dans le centre de Bruxelles

De gemiddelde Wet Bulb Globe Temperature over alle uren van de dag op 24 augustus 2016 in het centrum van Brussel

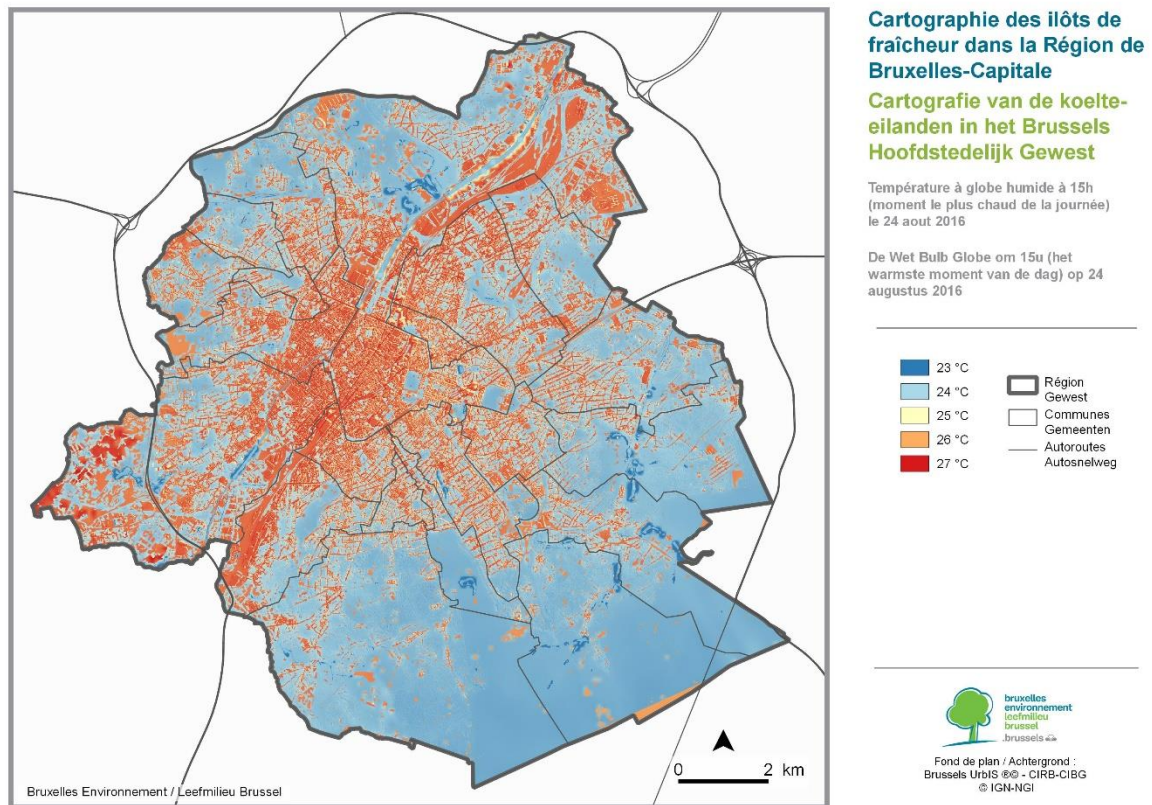
- 20 °C
 - 20.5 °C
 - 21 °C
 - 21.5 °C
 - 22 °C
- Région
— Gewest
— Communes
— Gemeenten



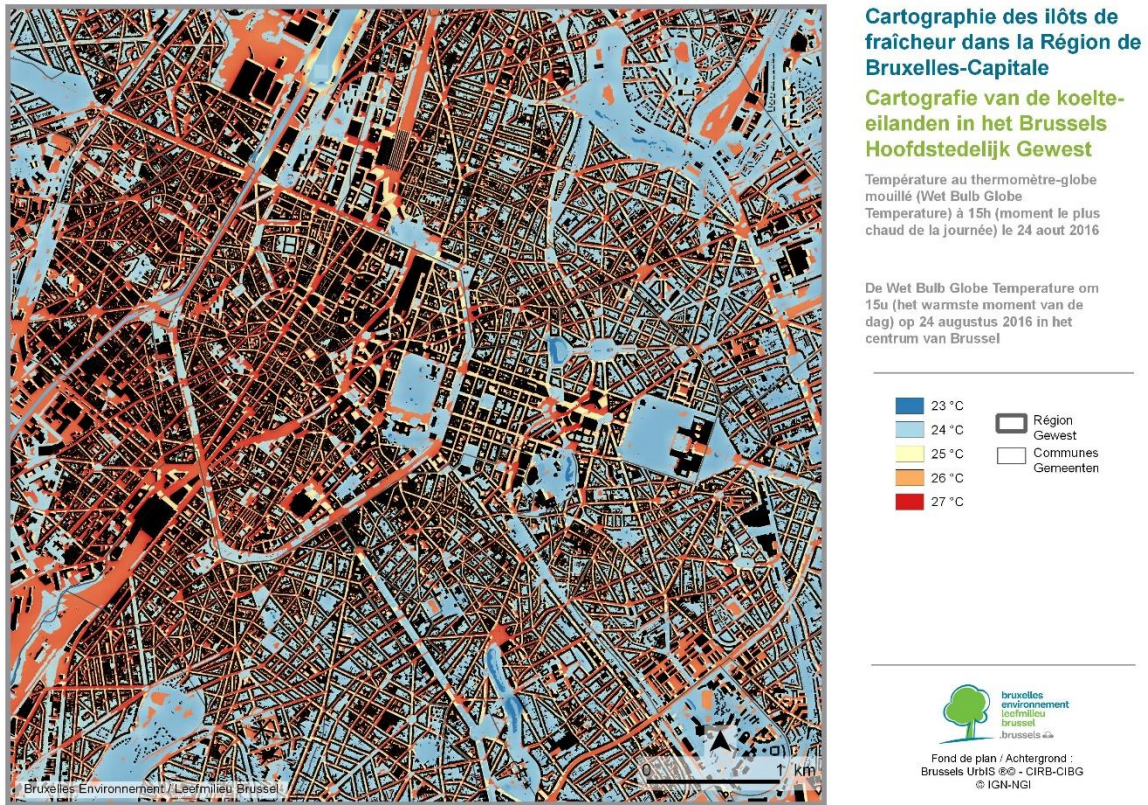
Fond de plan / Achtergrond :
Brussels UrbIS © - CIRB-CIBG
© IGN-NGI

Figuur 32. De gemiddelde Wet Bulb Globe Temperature over alle uren van de dag op 24 augustus 2016 in het centrum van Brussel.

Het is ook goed om eens te kijken naar de situatie op het warmste moment van de dag (Figuur 33). De bereikte waarden liggen nu al een stuk hoger (tussen 23 en meer dan 27°C), en het is vooral de schaduwvorming die op zulke momenten een rol speelt. Dit is nog wat beter zichtbaar in de detailkaart (Figuur 34). Op alle locaties in de zon lopen de WBGT waarden op tot boven de 25°C (de drempelwaarde om te spreken van hittestress), en zijn er weinig verschillen tussen het centrum van de stad en daarbuiten. In de schaduw van gebouwen liggen de waarden iets lager (rond de 25°C), en enkel in de schaduw van bomen en bij wateroppervlakken zijn de waarden lager dan 25°C. Op de detailkaart is ook duidelijk te zien dat het koelte-effect van bomen en parken beperkt is tot de onmiddellijke omgeving, het is dus niet zo dat ze een ruime omgeving verkoelen op deze hete momenten, de mensen moeten zich echt in het park of onder een boom bevinden.

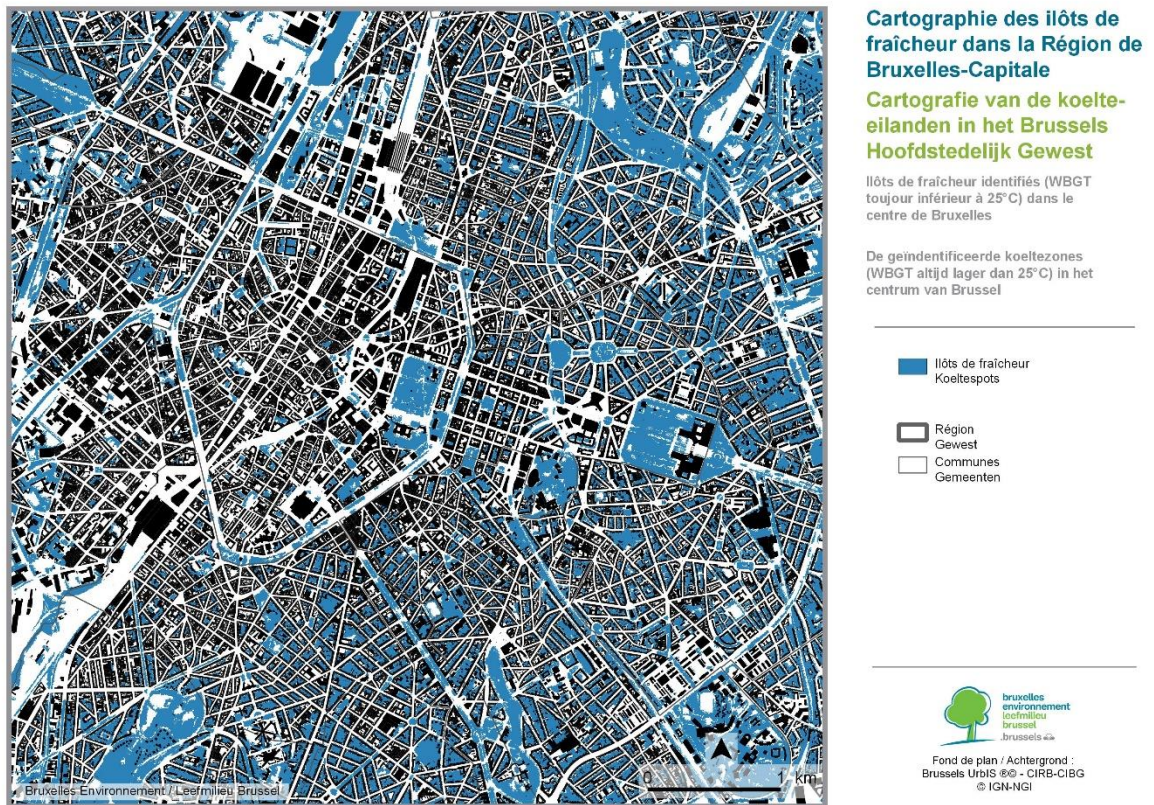


Figuur 33. De Wet Bulb Globe Temperature om 15u (het warmste moment van de dag) op 24 augustus 2016.



Figuur 34. De Wet Bulb Globe Temperature om 15u (het warmste moment van de dag) op 24 augustus 2016 in het centrum van Brussel.

Dit gedetailleerde kaartmateriaal laat dan ook toe om te bepalen welke locaties in Brussel als (buitenhuis) koeltezone kunnen dienen. Daarvoor worden de zones geselecteerd waarin de WBGT altijd onder de 25°C blijft (de drempelwaarde voor hittestress, zie Sectie 2.2) tijdens deze hete zomerdag. Het eindresultaat is te zien in Figuur 35. Zoals hierboven aangegeven gaat het om de schaduwgebieden in alle parken, en onder alle bomen met een dicht bladerdek (we zijn er bij de modellering van uit gegaan dat alle bomen voorzien waren van een gezonde hoeveelheid gebladerte). Het lijkt dan ook aangewezen om deze locaties zo toegankelijk mogelijk te maken, en er eventueel meer van te voorzien in de stadswijken waar er nu weinig schaduwvormend groen is.



Figuur 35. De geïdentificeerde koeltezones (WBGT altijd lager dan 25°C) in het centrum van Brussel.

HOOFDSTUK 5. CONCLUSIE

Van alle weerextremen zijn hittegolven de meest dodelijke in Europa (Forzieri et al., 2017). De verwachting is dat met de klimaatverandering hittegolven in de toekomst verder zullen toenemen in aantal, duur, en sterkte. Hittegolven zoals die van 2003 – en erger – kunnen later deze eeuw de norm worden. Steden hebben meer dan andere gebieden te lijden onder hittegolven. Dit komt door het stedelijk hitte-eilandeffect, waarbij steden gemiddeld enkele graden warmer zijn dan hun landelijke omgeving. Op sommige momenten kunnen de temperatuurverschillen oplopen tot 7-8 °C en meer. Hierdoor doen hittegolven zich in steden uiteraard meer gevoelen. Steden zijn bovendien erg vatbaar voor klimaatextremen door de hoge concentratie aan (kwetsbare) mensen, infrastructuur, en economische activiteit.

De voorliggende studie kwantificeert hittestress in Brussel, met het oog op de identificatie van potentiële koeltezones. Daarbij werd gebruik gemaakt van computersimulaties met VITO's stedelijk klimaatmodel UrbClim om de lucht temperaturen in kaart te brengen voor de periode 1987-2016. De resulterende uurlijkse kaarten bevatten een ruimtelijk detail van 100 m. De modelresultaten werden eerst gebruikt in een validatie-oefening, en een analyse van de verschillen tussen gesimuleerde en waargenomen klimaatgegevens bevestigden daarbij de betrouwbaarheid en de relevantie van het geproduceerde kaartmateriaal.

De aangemaakte kaarten tonen duidelijk het stedelijk effect op de lucht temperaturen en op hittestress, met temperaturen die gemiddeld 3°C hoger liggen in het stadcentrum tijdens de zomer. Dit heeft zijn effect op het aantal hittegolfdagen, die tot 3 keer hoger liggen in het centrum van Brussel (meer dan 10 per jaar) dan op het platteland rond de stad (ongeveer 3 per jaar). Vooral de nachtelijke minimum temperaturen zijn een stuk hoger in het stadcentrum, met alle gevolgen van dien voor de nachtrust en gezondheid van de inwoners.

Bij het fysiologisch ervaren van hittestress komen echter meer klimatologische parameters kijken dan enkel de lucht temperatuur, ook de blootstelling aan zonnestraling, de wind en de luchtvochtigheid spelen een rol. Daarom heeft VITO ook gedetailleerde kaarten aangemaakt van de Wet Bulb Globe Temperature, een internationaal erkende hittestress indicator, voor een geselecteerde hete zomerdag. Op deze kaarten zijn meer ruimtelijke details zichtbaar, en ze zijn beter geschikt voor het zoeken naar potentiële koeltezones in de publieke ruimte. Uit de resultaten blijkt dat schaduwvormend groen, eventueel in combinatie met waterelementen, het meest efficiënt is in het reduceren van outdoor hittestress.

Belangrijk om te vermelden is dat uit dit (en voorgaand) onderzoek blijkt dat het koelte-effect van groen-blauwe elementen erg lokaal is. Het is dus niet omdat er een boom op het plein staat, dat daarom het hele plein ineens hitte-vrij is. Het effect is enkel voelbaar in de onmiddellijke omgeving. Om het hitte-probleem op stadsniveau aan te pakken is het dus nodig om de groen-blauwe maatregelen op grote schaal (overal) toe te passen, en liefst zoveel mogelijk maatregelen met elkaar te combineren. Het is niet altijd evident om bomen te planten in een stad, maar het voordeel van dit soort groenmaatregelen is dat het zogezegde 'no-regret measures' zijn, ze hebben sowieso een positief effect op de leefbaarheid en de aantrekkelijkheid van een stad.

LITERATUURLIJST

- Brisson E., Van Weverberg K., Demuzere M., Devis A., Saeed S., Stengel M., van Lipzig N. P. M. 2016. How well can a convection-permitting climate model reproduce decadal statistics of precipitation, temperature and cloud characteristics ability. *Environmental Research Letters* 9 (11),114,024, doi:10.1088/1748-9326/9/11/114024.
- Brits, E., K. Simons, J. Rebolledo, en A. Van Nieuwenhuysse, 2010. Hittegolven, zomer -en wintersmog. Wetenschappelijk instituut volksgezondheid.
- Brouwers J., Peeters B., Van Steertegem M., van Lipzig N., Wouters H., Beullens J., Demuzere M., Willems P., De Ridder K., Maiheu B., De Troch R., Termonia P., Vansteenkiste Th., Craninx M., Maetens W., Defloor W., Cauwenberghs K. (2015) MIRA Klimaatrapport 2015, over waargenomen en toekomstige klimaatveranderingen. Vlaamse Milieumaatschappij i.s.m. KU Leuven, VITO en KMI. Aalst, Belgium, 147 p.
- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Boehner J., 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development* 8, 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.
- De Ridder K., 1997. Radiative transfer in the IAGL land surface model, *Journal of Applied Meteorology* 36, 12–21.
- De Ridder K., Maiheu B., Wouters H., van Lipzig N. 2015a. Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2015/05, VITO en KU Leuven.
- De Ridder, K; Lauwaet D. and Maiheu B. 2015b. UrbClim - a fast urban boundary layer climate model. *Urban Climate*, 12, 21-48.
- Dimitrova R., Silver Z., Zsedrovits T., Hocut C.M., Leo L.S., Di Sabatino S., Fernando H.J.S., 2016. Assessment of Planetary Boundary-Layer Schemes in the Weather Research and Forecasting Mesoscale Model Using MATERHORN Field Data. *Boundary-Layer Meteorology* 159 (3), 589–609, doi:10.1007/s10546-015-0095-8.
- Forzieri G., A. Cescatti, F. Batista e Silva, and L. Feyen, 2017. Increasing risk over time of weather-related hazards to the European population: a data-driven prognostic study. *Lancet Planet. Health*, 1: e200–08.
- Gabriel K.M.A., Endlicher W.R., 2011. Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environmental Pollution* 159, 2044-2050.
- García-Díez M., Lauwaet D., Hooyberghs H., Ballester J., De Ridder K., Rodó X., 2016. Advantages of using a fast urban boundary layer model as compared to a full mesoscale model to simulate the urban heat island of Barcelona. *Geoscientific Model Development* 9, 4439–4450.
- Garratt, J.R., 1992. The atmospheric boundary layer. Cambridge University Press, 316 pp.
- Hooyberghs H, Lauwaet D, Lefebvre W, Maiheu B, De Ridder Koen, González-Aparicio I, Acero JA, Mendizabal M (2015) RAMSES project report D4.2: Agglomeration-scale urban climate and air quality projections.
- Hamdi, R., Van de Vyver, H., De Troch, R., Termonia, P., 2013. Assessment of three dynamical urban climate downscaling methods: Brussels's future urban heat island under an A1B emission scenario. *Int. J. Climatol.* <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3734>.
- ISO, 1989: Hot Environments - Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature). ISO Standard 7243. Geneva: International Standards Organization.
- Jacob D., Bärring L., Christensen O.B., Christensen J.H., de Castro M., Déqué M., Giorgi F., Hagemann S., Hirschi M., Jones R., Kjellström E., Lenderink G., Rockel B., Sánchez E., Schär C., Seneviratne S.I., Somot A., van Ulden A., van den Hurk B., 2007. An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. *Climatic Change* 81 (S1), 31–52, doi:10.1007/s10584-006-9213-4.
- Lauwaet, D., B. Maiheu, J. Aertssens, K. De Ridder, 2013. Opmaak van een hittekaart en analyse van het stedelijk hitte-eiland effect voor Antwerpen. VITO rapport 2013/RMA/R/352.

- Lauwaet D., Hooyberghs H., Maiheu B., Lefebvre W., Driesen G., Van Looy S., De Ridder K., 2015. Detailed Urban Heat Island projections for cities worldwide: dynamical downscaling CMIP5 global climate models. *Climate*, 3, 391-415.
- Lauwaet D., De Ridder K., Saeed S., Brisson E., Chatterjee F., van Lipzig N.P.M., Maiheu B., Hooyberghs H., 2016. Assessing the current and future urban heat island of Brussels. *Urban Climate*, 15, 1-15.
- Lauwaet D., De Ridder K., Hooyberghs H., Maiheu B., Lefebvre F., 2017. Uitbreiding en validatie indicator hitte-eilandeffect, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, in press.
- Lemke B., Kjellstrom T., 2012. Calculating Workplace WBGT from Meteorological Data: A Tool for Climate Change Assessment. *Industrial Health* 50, 267–278.
- Liljegren J.C., Carhart R.A., Lawday P., Tschopp S., Sharp R., 2008. Modeling the Wet Bulb Globe Temperature Using Standard Meteorological Measurements. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 5(10), 645-655. DOI:10.1080/15459620802310770.
- Sanchez-Martinez G., Diaz J., Hooyberghs H., Lauwaet D., De Ridder K., Linares C., Carmona R., Ortiz C., Kendrovski V., 2018. Heat and health in Antwerp under climate change: projected impacts and implications for prevention. *Environment International*, 111, 135-143.
- U.S. Army 2003. Technical Bulletin Medical 507 and Air Force Pamphlet 48-152(I). Heat stress control and heat casualty management.
- Willett, K. M. & Sherwood, S., 2012. Exceedance of heat index thresholds for 15 regions under a warming climate using the wet-bulb globe temperature. *Int. J. Climatol.*, 32, 161–177.