



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Inventarisatie urban heat island in Nederlandse steden met automatische waarnemingen door weeramateurs

Dirk Wolters, Janette Bessembinder, Theo Brandsma

De Bilt, 2011 | Scientific report; WR 2011-04

Inventarisatie *urban heat island* in Nederlandse steden met automatische waarnemingen door weeramateurs

Rapport in kader van project "Regiospecifieke klimaatinformatie voor Haaglanden en Regio Rotterdam" (KvK-project HSHL04/HSRR05)

Versie 1.1

Datum 31 oktober 2011
Status Eindversie

Colofon

Title	Inventarisatie <i>urban heat island</i> in Nederlandse steden met automatische waarnemingen door weeramateurs - Rapport in kader van project "Regiospecifieke klimaatinformatie voor Haaglanden en Regio Rotterdam" (KvK-project HSHL04/HSRR05)
Project number	HSHL05/HSRR04 (Kennis voor Klimaat/Knowledge for Climate project)
Contact person	Dirk Wolters dirk.wolters@knmi.nl KNMI Climate Services / Klimaatdata en -advies Wilhelminalaan 10 3732 GK De Bilt Postbus 201 3730 AE De Bilt
Authors	Dirk Wolters Janette Bessembinder Theo Brandsma

Met dank aan alle deelnemende weeramateurs voor het delen van hun waarnemingen, en het verstrekken van uitgebreide metadata en foto's van hun weerstations, Luc Verkoelen (www.hetweeractueel.nl), en aan alle collega's van het KNMI, Gemeentewerken Rotterdam en Waterkader Haaglanden voor hun bijdrage aan de uitwerking en review.

Dit onderzoek is onderdeel van het onderzoeksproject HSHL05/HSRR04: *Regiospecifieke klimaatinformatie voor Haaglanden en Regio Rotterdam*, uitgevoerd in het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat (www.kennisvoorklimaat.nl) en gefinancierd door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu, de provincie Zuid-Holland, de gemeente Rotterdam en het Hoogheemraadschap Delfland.

Inhoudsopgave

Samenvatting/Summary	1
1 Inleiding	2
1.1 Achtergrond	3
1.2 Doelen, onderzoeksvragen en indeling van het rapport	4
2 Oorzaken van het UHI, begrippen	5
2.1 Het stedelijk warmte-eiland (UHI)	6
2.1.1 Oorzaken en dagelijkse gang	6
2.1.2 Belangrijke begrippen	7
3 Methoden	10
3.1 Het meetnet	11
3.2 De stations	11
3.2.1 Algemeen	11
3.2.2 Capelle a/d IJssel: parallelle reeks tuin- en daksensor	12
3.2.3 Meteo Delft: stadsstation op 33 m hoogte	12
3.2.4 De landelijke stations van het KNMI	13
3.3 Selectie van stations	14
3.4 Automatische validatie van weeramateurmetingen	15
3.5 Bevolkingsdichtheid	16
4 Resultaten	16
4.1 Selectie van stations	17
4.2 UHI versus bevolkingsdichtheid	18
4.3 Frequentieverdeling van het UHI	20
4.4 Het UHI onder verschillende omstandigheden	21
4.4.1 Tijd van de dag en weersituatie	21
4.4.2 Tijd van het jaar	25
4.5 Verschillen tussen locaties: temperatuursensoren in de tuin en op het dak	26
4.6 Meteo Delft: stadsstation op 33 m hoogte	27
5 Conclusies en discussiepunten	29
5.1 Conclusies	30
5.2 Discussiepunten	31
Literatuurlijst	31

Samenvatting/Summary

Nederlands Steden zijn over het algemeen warmer dan het landelijk gebied er omheen (het *urban heat island* of UHI). Hierdoor kunnen onder stadsbewoners tijdens warme perioden in de zomer eerder gezondheidsproblemen optreden als gevolg van warmte (*hittestress*). Tot voor kort was over het UHI in Nederlandse steden nog maar weinig bekend. Doordat het KNMI haar weerstations altijd juist buiten steden heeft geplaatst, waren in de stad maar weinig metingen beschikbaar.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van metingen afkomstig van weerstations van hobbyisten (*weer-amateurs*). Uit meer dan 250 beschikbare automatische amateurweerstations zijn voor het onderzoek 20 stations geselecteerd, verdeeld over verschillende regio's van Nederland. Hierbij is een aantal selectiecriteria toegepast, in combinatie met uitgebreide informatie over de meetomstandigheden op elk station. Op basis van een jaar aan metingen is een schatting gemaakt van het UHI in woonwijken in Nederlandse steden. Er is een positief verband afgeleid tussen het zomergemiddelde UHI en de bevolkingsdichtheid (op buurtniveau) bij de onderzochte stations. Verder bleek dat het UHI in de zomer het sterkst is tijdens de nachten en in weersituaties met weinig wind en weinig bewolking. Gemiddeld over de zomer van 2010 was het UHI gemiddeld over 6 stations in de stad 0,9 (0,6-1,1)^{°C}; tijdens de nachten in een relatief warme periode steeg dit tot 1,4 (1,1-1,8)^{°C}. Tijdens het voorjaar en de herfst was het UHI geringer dan in de zomer; in de winter was er gemiddeld gesproken geen sprake van een UHI. De resultaten verkregen uit metingen op verschillende locaties stemmen sterk overeen, en zijn ook in overeenstemming met wetenschappelijke literatuur. Dit geeft aan dat metingen van amateurweerstations van voldoende kwaliteit kunnen zijn voor wetenschappelijk onderzoek, als voldoende metadata beschikbaar is om bruikbare stations te kunnen selecteren. Dit onderzoek geeft een eerste schatting van het UHI in Nederlandse woonwijken. Meer gedetailleerde kennis vereist een dichter waarnemennetwerk en langere meetreeksen.

English Cities are usually warmer than their rural surroundings (the *urban heat island* or UHI). For city residents, this can increase heat-related health problems in summer (*heat stress*). Until recently not much was known about the UHI in Dutch cities. Since weather stations in the meteorological observational network of KNMI have traditionally been placed outside of cities, few observations were available in urban areas.

The present study uses observations from weather stations operated by amateurs. From around 200 available automatic weather stations, 20 stations have been selected, in different parts of the Netherlands, using a set of selection criteria combined with detailed information about the observational circumstances on each station. Using one year of observations, we have obtained estimates of the magnitude of the UHI in Dutch residential areas. A positive relation was derived between the summer-averaged UHI and the (neighborhood-scale) population density near the observational sites. It was found that the UHI in summer is strongest in nighttime, and in weather situations with little wind and few clouds. The summer-averaged UHI in 2010, averaged over 6 urban stations, was around 0.9 (0.6-1.1)^{°C}. During nighttime in a relatively warm subperiode of the summer the average UHI was around 1.4 (0.9-1.8)^{°C}. During spring and autumn the UHI was lower than in summer, during winter no significant UHI was observed. The results obtained from different locations agree well, and are also in agreement with scientific literature. This shows that observations from weather amateurs can be of sufficient quality for use in scientific research, providing that detailed metadata are available in order to select suitable stations. The present study provides a first estimate of the UHI in Dutch residential areas. More detailed knowledge will require more dense observations, and longer time series.

1. Inleiding

1.1 Achtergrond

Steden zijn meestal warmer dan het landelijk gebied. Dit fenomeen wordt het *urban heat island (UHI)-effect* genoemd. Het UHI is in de meeste steden 's nachts het sterkst, zodat tijdens hittegolven in de stad de nachten relatief weinig verkoeling brengen. Dit uit zich onder meer in een verminderde nachtrust onder stadsbewoners, en een verhoogde sterfte door hitte in (grote) steden (Vandentorren *et al.*, 2004). De inwoners van steden zijn dus extra gevoelig voor hittestress. Na de problematische warme zomers van 2003 en 2006 is in Nederland de aandacht voor hittestress sterk toegenomen. Het wordt verwacht dat hittestress in Nederland gedurende de eenentwintigste eeuw zal toenemen, onder invloed van de opwarming van het klimaat. Zo zal het gemiddeld aantal zomerse dagen (dagen met een maximumtemperatuur van 25°C of hoger) per jaar in midden-Nederland waarschijnlijk stijgen van ongeveer 25 in 1990, tot 30-50 in 2050 (KNMI, 2009). Hiermee zullen waarschijnlijk ook het aantal, de duur en de intensiteit van hittegolven toenemen. Bovenop de algemene opwarming komt waarschijnlijk nog een toename van het UHI, onder invloed van bevolkingsgroei en urbanisatie. Overigens zijn ook 'positieve' effecten van het UHI denkbaar, zoals minder koudestress in de winter, minder kans op gladheid en mist, en het vroeger optreden van aangename temperaturen in het voorjaar.

Door deze factoren is een sterke behoefte ontstaan aan een inschatting van de huidige sterkte van het UHI in Nederlands steden. Hierover was tot voor kort nog weinig bekend. De enige beschikbare kennis bestond uit twee studies naar het UHI van de stad Utrecht (Conrads, 1975; Brandsma, 2010), en de wetenschappelijke literatuur uit landen waar meer onderzoek is gedaan naar het UHI. Door verschillen in stedenbouw en klimatologische omstandigheden, is het onzeker in hoeverre deze kennis uit het buitenland is toe te passen op de Nederlandse situatie.

Er is een gebrek aan meteorologische waarnemingen in Nederlandse steden. Bij de start van dit onderzoek waren de gegevens van Conrads (1975) en Brandsma (2010) de enige professionele meteorologische waarnemingen in een Nederlandse stad. We hebben er daarom voor gekozen om in dit onderzoek gebruik te maken van automatische waarnemingen afkomstig van stations die zijn geïnstalleerd en onderhouden door weeramateurs. Dit zijn mensen die als hobby weergegevens verzamelen, meestal gemeten in de directe omgeving van hun eigen huis. Deze gegevens zijn verkregen door middel van een gegevensuitwisseling met de website Hetweeraactueel (<http://www.hetweeraactueel.nl>)¹, waaraan enkele honderden weeramateurs hun waarnemingen geautomatiseerd leveren. Om te compenseren voor het gebrek aan controle over de meetlocatie en meetomstandigheden, is een uitgebreide enquête samengesteld met vragen over de weerstations, die alle deelnemende weeramateurs hebben ingevuld. Ook zijn van alle in het onderzoek gebruikte stations foto's ontvangen. Op basis van deze metadata is een selectie gemaakt van voor het onderzoek bruikbare stations.

Dit soort waarnemingen van weeramateurs is in de meteorologische en klimatologische wetenschappelijke literatuur voor zover bekend niet eerder gebruikt. Dit maakt de gekozen aanpak vernieuwend, en wellicht bruikbaar op andere plaatsen waar een gebrek is aan professionele meteorologische waarnemingen in stedelijk gebied. Een ander interessant aspect van deze werkwijze is dat het de deelname en betrokkenheid van burgers bij klimaatonderzoek stimuleert. Dit is wellicht extra het geval bij weeramateurs, die vaak sterk vertegenwoordigd zijn op het internet en in andere (regionale) media. Als onderdeel van de gegevensuitwisseling zijn de weeramateurs op de hoogte gehouden van de voortgang van het onderzoek door middel van een speciale website, en zijn ze uitgenodigd voor een informatieve bijeenkomst op het KNMI (5 juni 2010, zie Figuur 1.1 voor een foto van de deelnemers bij het KNMI).

¹Hetweeraactueel is een website waarop veel weeramateurs zijn aangesloten. Op de website worden onder meer actuele weerkaarten gepubliceerd, afkomstig uit waarnemingen die door de weeramateurstations automatisch worden doorgestuurd.



Figuur 1.1: Groepsfoto tijdens de bijeenkomst voor deelnemende weeramateurs op het KNMI (5 juni 2010). Bron: Karin Broekhuijsen.

Dit onderzoek is onderdeel van het project HSRR05/HSHL04 in het onderzoeksprogramma Kennis voor Klimaat (<http://www.kennisvoorklimaat.nl>). Als onderdeel van hetzelfde project zijn verschillende andere onderzoeken naar het UHI gestart, met gebruik van professionele (in situ en remote) waarnemingen en (mesoschaal-) weermodellen. Voorbeelden van inmiddels afgerond werk zijn Ronda *et al.* (2010); Klok *et al.* (2010); Van Hove *et al.* (2010b,a).

1.2 Doelen, onderzoeksvragen en indeling van het rapport

Het belangrijkste doel van dit onderzoek is om een eerste inschatting te verkrijgen van de sterkte van het UHI in Nederlandse steden, op basis van metingen door weeramateurs. Deze inschatting moet representatief zijn voor het UHI gemiddeld over een buurt of wijk, dus met zo weinig mogelijk invloed van kleinschalige effecten ('verstoringen') op individuele meetlocaties. Verder was het doel om zoveel mogelijk in kaart te brengen van de variatie van het UHI als functie van verschillende omstandigheden. Hierbij ging het vooral om de respons van het UHI op de lokale typologie en intensiteit van de bebouwing, en de variatie van het UHI tussen verschillende weersomstandigheden. Het was beoogd om de resultaten zoveel mogelijk te vergelijken met wetenschappelijke literatuur, om te zien in hoeverre de resultaten uit eerder onderzoek geldig zijn voor de (huidige) Nederlandse situatie. Samengevat, de onderzoeksvragen:

- *Hoe sterk is het UHI in Nederlandse steden, op het schaalniveau van een buurt of wijk?*
- *Hoe varieert het UHI als functie van:*
 - *De typologie/intensiteit van de bebouwing?*
 - *De (weer-) situatie?*
- *In hoeverre zijn schattingen en relaties uit de wetenschappelijke literatuur geldig voor Nederland (kwalitatief en kwantitatief)?*

Hoofdstuk 2 van dit rapport bevat achtergrondinformatie. In dit hoofdstuk worden de fysische oorzaken van het UHI besproken, en er wordt een aantal belangrijke begrippen toegelicht. Hoofdstuk 3 geeft

een overzicht van alle gebruikte gegevens, zoals de waarnemingen van de weeramateurs. Ook wordt in dit hoofdstuk beschreven hoe, op basis van stationsmetadata, een selectie is gemaakt van voor wetenschappelijk onderzoek geschikte weeramateurstations.

Hoofdstuk 4 bevat alle resultaten van het onderzoek, op basis van metingen door weeramateurs gedurende het jaar 2010. Eerst wordt een overzicht gegeven van alle geschikt bevonden stations. Daarna tonen we de relatie tussen het zomergemiddelde UHI en de bevolkingsdichtheid van buurten. De bevolkingsdichtheid is sterk afhankelijk van de typologie en intensiteit van de stedelijke bebouwing. Op basis van dit resultaat zijn 'stedelijke' stations geselecteerd voor verdere analyse van het UHI. Voor deze stations zijn het verloop van het UHI over de dag en het verband van het UHI met verschillende meteorologische parameters onderzocht voor de zomer van 2010. Ook is gekeken naar het verloop van het UHI over het gehele jaar 2010. Verder is nog gekeken naar de verschillen in het UHI gemeten op stations op verschillende hoogte (op tuin-niveau, dakniveau en op grotere hoogte boven de bebouwing). In hoofdstuk 6 worden de conclusies van het onderzoek samengevat, en wordt een aantal discussiepunten genoemd.

2. Oorzaken van het UHI, begrippen

2.1 Het stedelijk warmte-eiland (UHI)

Met de term *urban heat island (UHI)* wordt stedelijk gebied aangeduid dat warmer is dan zijn rurale omgeving. In de meeste steden op de wereld is gemiddeld gesproken sprake van een UHI. In dit hoofdstuk bespreken we de verschillende oorzaken van het UHI, en wordt een aantal begrippen geïntroduceerd die belangrijk zijn voor de interpretatie van de informatie in de volgende hoofdstukken.

2.1.1 Oorzaken en dagelijkse gang

Het feit dat het in steden warmer is dan op het platteland heeft verschillende oorzaken. Hierbij gaat het vooral om de energiebalans aan het aardoppervlak, die in steden anders is. Een uitgebreide beschrijving van de energiebalans in stedelijk gebied wordt gegeven door Oke (1988). Van Hove *et al.* (2010b) geeft een overzicht van de diverse oorzaken van het UHI in de wetenschappelijke literatuur, en hun belang voor Nederlandse steden. In de situatie overdag en 's nachts spelen verschillende mechanismen een rol. We zullen hier de oorzaken van het UHI overdag en 's nachts afzonderlijk bespreken.

Overdag

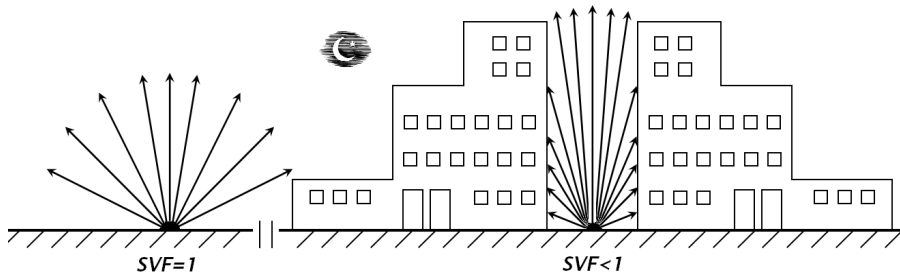
1) Steden hebben vaak een wat donkerder gekleurd oppervlak dan landelijke gebieden. Dit betekent dat overdag in steden minder zonnestraling wordt weerkaatst door het oppervlak. Verder wordt, door de geometrie van de stad, de weggekaatste straling relatief vaak weer opgevangen door een ander oppervlak (bijvoorbeeld een muur van een gebouw), in plaats van direct richting de hemel te verdwijnen. Door deze beide oorzaken is de fractie naar de hemel teruggekaatste zonnestraling (de *albedo*) in de stad lager dan in landelijk gebied (Oke, 1988). Het oppervlak kan dus meer opwarmen door de zonnestraling.

2) Het oppervlak in steden is grotendeels verhard, en is erop gemaakt om (regen)water zeer snel af te voeren. Een groot deel van het oppervlak is dus bijna altijd droog, waardoor er maar weinig verdamping is. Verdamping onttrekt warmte aan het oppervlak, waardoor landelijk gebied bij dezelfde zonne-instraling minder opwarmt dan stedelijk gebied.

's Nachts

1) 's Nachts speelt de geometrie van de bebouwing een belangrijke rol. De afkoeling van de lucht tijdens de nacht wordt vooral veroorzaakt door het uitzenden van langgolvlige ('infrarood-') straling door het aardoppervlak, waardoor het oppervlak warmte verliest en afkoelt. Dit proces gaat in steden minder efficiënt dan in landelijk gebied. Dat komt doordat een belangrijk deel van de aan het aardoppervlak uitgezonden straling niet richting de hemel verdwijnt, maar weer wordt geabsorbeerd of gereflecteerd door gebouwen en andere verticale oppervlakken, waardoor de warmte tussen de gebouwen 'blijft hangen'. Dit effect is sterker naarmate gebouwen hoger zijn en dichter bij elkaar staan. De *sky view factor (SVF)*, de fractie van de hemel zichtbaar vanaf het oppervlak, is dan kleiner. Zie voor een schematische weergave van dit mechanisme Figuur 2.1.

2) In steden bestaat het oppervlak vooral uit steen, beton, asfalt en andere materialen met een hoge warmtecapaciteit. Deze materialen koelen 's avonds minder snel af dan het oppervlak in landelijk gebied. Ze blijven 's avonds nog een tijd de warmte van overdag afgeven aan de lucht. Mogelijk kan



Figuur 2.1: Schematische weergave van de uitgaande langgolvlige straling bij een hoge (open landschap, links) en een lage (stedelijk gebied, rechts) sky view factor (SVF). Door de lage SVF koelt het in steden 's nachts inefficiënt af ten opzichte van het buitengebied. Bron: KNMI.

het door hetzelfde mechanisme 's ochtends in de stad juist enige tijd wat koeler blijven dan in landelijk gebied.

Het UHI is meestal 's nachts het sterkst. In de ochtend, kort na zonsopkomst, begint het UHI normaal gesproken snel af te nemen tot een fractie van haar nachtelijke sterkte, om rond zonsondergang weer toe te nemen (Oke, 1987; Watkins *et al.*, 2002; Van Hove *et al.*, 2010b). Verder is het UHI vaak het sterkst in het zomerhalfjaar (Oke, 1982; Conrads, 1975; Brandsma, 2010; Fortuniak *et al.*, 2006), en sterk afhankelijk van het weer. Het UHI is het sterkst in rustige weersituaties met weinig wind en weinig bewolking (Oke, 1987, 1982; Morris *et al.*, 2001; Johnson *et al.*, 1991).

2.1.2 Belangrijke begrippen

In de geschiedenis van het onderzoek naar stadsklimaat zijn verschillende concepten en begrippen gedefinieerd, als hulp om het klimaat in de stad te beschrijven. De begrippen die belangrijk zijn voor dit onderzoek zullen hier worden toegelicht. Voor het belangrijkste gedeelte van deze theorie baseren we ons op de publicatie door T.R. Oke voor de WMO, een rapport dat richtlijnen bevat voor het doen van meteorologische waarnemingen in stedelijk gebied (*Instruments and observing methods report No. 81: Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*, Oke (2006)).

Horizontale schalen

Voor het begrijpen van de ruimtelijke variaties in klimaat binnen de stad zijn drie horizontale schalen van belang, zoals gedefinieerd in Oke (2006). Zie voor een schematische weergave van deze schalen Figuur 2.2. De kleinste schaal is de *microschaal*. Op de microschaal spelen de effecten van individuele objecten, zoals huizen, muren en bomen een belangrijke rol. Variaties op microschaal zijn bijvoorbeeld de warme lucht in de directe nabijheid van een muur in de zon, of de koelte net boven een vijver. De microschaal is gekenmerkt door lengtes van kleiner dan één meter, tot hooguit enkele honderden meters. In dit onderzoek worden effecten op microschaal vooral gezien als 'verstoringen'; we willen uitspraken doen over het stadsklimaat representatief voor een wijk of stadsdeel, en beïnvloeding door microschaaleffecten rondom bijvoorbeeld een tuin of balkon vermindert ons vermogen daartoe. Het is daarom belangrijk dat weerstations worden gebruikt op meetlocaties met genoeg afstand tot nabijgelegen objecten. Ook is het raadzaam om metingen van verschillende locaties onderling te vergelijken. Wanneer uit metingen op verschillende locaties dezelfde resultaten blijken, dan zijn de metingen waarschijnlijk weinig beïnvloed door microschaaleffecten op individuele meetlocaties.

In ander onderzoek zijn verschillende methodes gebruikt om ruimtelijke variaties in het stadsklimaat op microschaal in kaart te brengen. Het is bijvoorbeeld mogelijk om op trajecten in de stad te meten met mobiele weerstations, bevestigd op een fiets of een motorvoertuig. In Nederland is dit gedaan

door Conrads (1975); Van Hove *et al.* (2010b); Brandsma (2010). Hoewel de focus ligt op grotere schalen, worden in dit rapport wel enige effecten op microschaal beschreven, door de metingen van temperatuursensoren op verschillende hoogtes onderling te vergelijken.

De schaal waarin we het meest zijn geïnteresseerd is de *lokale schaal*. Op de lokale schaal worden de effecten van de microschaal uitgemiddeld, terwijl er wel grootschaliger variaties zijn, zoals de verschillen tussen afzonderlijke wijken of stadsdelen, en gradiënten van de randen van de stad naar het centrum. De lokale schaal wordt gekenmerkt door lengtes van één tot enkele kilometers. Het meten van het stadsklimaat op lokale schaal dient te gebeuren op meetlocaties die representatief zijn voor het desbetreffende deel van de stad. Hierbij is het vooral belangrijk om de verstoring van de metingen door microschaaleffecten zo klein mogelijk te maken.

De *mesoschaal* beschrijft het klimaat op het schaalniveau van een gehele (grote) stad, typisch enkele tot enkele tientallen kilometers in lengte. Hierbij kunnen we denken aan de interacties van het UHI met zijn landelijke omgeving, zoals de advectie van warmte vanuit de stad naar het buitengebied, en mesoschaal-luchtcirculaties of zelfs ruimtelijke verschillen in neerslagklimaat, die kunnen ontstaan bij een stad temidden van een landelijke omgeving. We besteden in dit onderzoek geen aandacht aan fenomenen op mesoschaal.

Verticale schalen

Op het (niet-beboste) platteland vindt de uitwisseling van o.a. warmte en vocht tussen atmosfeer en landoppervlak plaats langs een bij benadering vlak, horizontaal oppervlak. In de stad echter, gebeurt deze uitwisseling langs een complex van zowel horizontale als verticale oppervlakken op verschillende hoogtes, zoals het straatoppervlak, muren, daken en boomkruinen. In dat opzicht heeft de stad belangrijke overeenkomsten met een bos, waar zich rondom en onder het bladerdek een vergelijkbare complexe uitwisselingslaag bevindt, de *canopy layer*. Daarom spreekt men in de wetenschappelijke literatuur over stadsklimaat vaak over de *urban canopy layer (UCL)*, zie Figuur 2.2. De diepte van de UCL is ongeveer gelijk aan de gemiddelde hoogte van de belangrijkste objecten, zoals gebouwen en bomen (Oke, 1984, 2006).

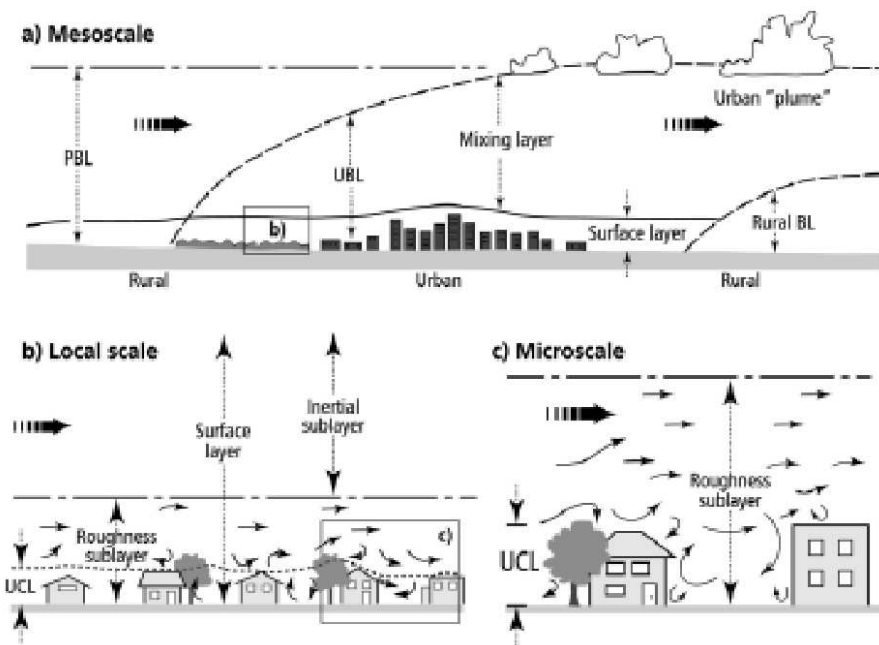
Net boven de UCL zijn de invloeden van individuele objecten (de horizontale en verticale variatie op microschaal) vaak nog te merken. Op grotere hoogte raken deze invloeden door turbulentie steeds meer gemengd, tot aan de *blending height* (Oke, 1984, 2006), het niveau waarboven geen horizontale verschillen meer merkbaar zijn op microschaal. De *blending height* bevindt zich op ongeveer 1,5 tot 4 maal de hoogte van de objecten op microschaal, in woonwijken rond 15-40 m hoogte (Grimmond en Oke, 1999; Oke, 2006).

Er zijn grofweg drie manieren om zo te meten dat de invloed van heterogeniteit op microschaal zo klein mogelijk is, zodat de metingen representatief zijn voor de lokale schaal:

1) Zorg dat de meetlocatie zich zo ver mogelijk van alle objecten bevindt, zodat de meting door geen van deze objecten in het bijzonder wordt getekend. Zo kun je op normale meethoogte (standaard 1,5 m) toch een 'gemiddeld' klimaat van een bepaald stadsdeel benaderen.

2) Gebruik metingen die zijn verkregen van meerdere meetlocaties. De variaties op microschaal tussen individuele locaties wegen dan minder sterk mee. Wanneer de metingen op verschillende locaties sterk overeenstemmen, zijn ze waarschijnlijk weinig beïnvloed door de specifieke microschaaleffecten op individuele meetlocaties.

3) Zorg dat je op een hoogte meet waar de invloeden van individuele objecten uitgemengd zijn (boven de *blending height*), bijvoorbeeld op een hoog gebouw of op een speciale meetmast. Het verschil in hoogte introduceert wel weer afwijkingen van een andere aard. Zo is het op enige hoogte door de lagere luchtdruk overdag meestal koeler dan nabij de grond, terwijl het 's nachts, door de sterke



Figuur 2.2: Schematische weergave van klimatologische schalen en verticale lagen in stedelijk gebied. *PBL*: Planetary boundary layer. *UBL*: Urban boundary layer. *UCL*: urban canopy layer. De *blending height* bevindt zich op de grens tussen de *roughness sublayer* en de *inertial sublayer*. De *UBL* is de totale laag waarin de stad effect heeft op de atmosfeer. Uit: Oke (2006).

afkoeling bij de grond, op hoogte juist wat warmer kan zijn. Voor deze afwijkingen is deels te corrigeren.

In dit onderzoek zijn de bovenstaande drie methoden toegepast. Het UHI is onderzocht op verschillende weeramateurstations in de stad, en er is gekeken naar het UHI gemiddeld over meerdere stations. Hierbij is ook gekeken naar de variatie tussen de stations. Verder zijn alleen stations meegenomen waarvan de meetlocatie aan bepaalde eisen voldoet. Vervolgens is nog een vergelijking gemaakt van de resultaten op deze stations op normale waarneemhoogte, met resultaten verkregen uit metingen van een station dat geplaatst is boven de UCL, op een toren in Delft (zie paragraaf 3.2).

Maten voor het UHI

Het UHI is het temperatuurverschil tussen een locatie in de stad op een bepaald moment, en de temperatuur van dezelfde locatie, op hetzelfde moment, in het geval dat die stad er niet zou zijn geweest. Hieruit volgt dat het UHI nooit direct te meten is (Lowry, 1977); de bebouwing is immers niet zomaar weg te halen om het effect ervan vast te stellen. Daarom wordt als benadering voor het klimaat zonder bebouwing (het *achtergrondklimaat*) vaak een meetpunt genomen in landelijk gebied op enige afstand buiten de stad. Ook in dit onderzoek is deze benadering gebruikt. Hierbij moet uiteraard worden aangenomen dat de horizontale variatie in temperatuur in het achtergrondklimaat verwaarloosbaar is ten opzichte van het UHI. Dit is niet altijd vanzelfsprekend, bijvoorbeeld in de buurt van land-zee-overgangen, waar de temperatuur sterk afhankelijk kan zijn van de afstand tot de kust. In paragraaf 3.2.4 wordt besproken hoe hiermee in dit onderzoek is omgegaan.

Omdat het UHI sterk afhangt van omstandigheden zoals het weer en de tijd van de dag, is het lastig om een algemene maat te vinden voor de sterkte van het UHI op een locatie in de stad. Het jaar- of daggemiddelde UHI (in het volgende genoteerd als UHI_{gem}) zegt vaak weinig over het UHI in die (extreme) situaties die interessant zijn. Vaak wordt daarom het maximale UHI (meestal genoteerd als

UHI_{max}) gebruikt als maat voor het UHI in een stad. Vaak is UHI_{max} gedefinieerd als het dagmaximum van het UHI gemiddeld over een bepaalde periode. In dit onderzoek is gekeken naar het absolute maximum van het UHI in de zomer van 2010. Van Hove *et al.* (2010b) bespreekt een aantal relaties die zijn afgeleid tussen UHI_{max} en bepalende factoren zoals het inwoneraantal van een stad. De waarde van UHI_{max} zegt echter weer weinig over de frequentie van optreden van zulke extreme waarden, en is afhankelijk van de lengte van de periode met gegevens. In dit onderzoek is gekeken naar zowel het gemiddelde UHI (UHI_{gem}) als naar (absolute) UHI_{max} , onder verschillende weersomstandigheden. Daarnaast is gekeken naar de frequentieverdeling van het UHI.

3. Methoden

3.1 Het meetnet

De gegevensuitwisseling waarbij het KNMI weeramateurmetingen ontvangt van Hetweeractueel (zie Inleiding), is begonnen op 23 juli 2009, en liep door tot januari 2011. Aan het begin van de periode werden van meer dan 100 weeramateurs gegevens ontvangen; aan het eind van de periode waren dit er meer dan 250 verspreid door Nederland. In dit onderzoek is slechts een fractie van deze stations gebruikt, namelijk enkel de stations binnen een afstand van 15 km tot het dichtstbijzijnde KNMI-weerstation, en alleen stations waarop de meetomstandigheden voldoen aan bepaalde criteria (zie paragraaf 3.3 voor een motivatie van deze voorwaarden). In de meeste gevallen gaat het om weerstations geplaatst nabij een woonhuis.

De stations zijn verbonden met een pc, die de metingen automatisch publiceert via de website van Hetweeractueel. Alle weerstations geven meerdere keren per uur de actuele temperatuur door. In de analyses in dit rapport zijn uurlijkse waarnemingen gebruikt, verkregen door steeds de vroegste waarneming te nemen die is ontvangen in de periode van tien minuten vóór het hele uur. Deze waarnemingen zijn vergeleken met de uurlijkse waarnemingen op KNMI-stations buiten de stad, die zijn verkregen door voor elk station alle temperatuurmetingen in de 50^e minuut van het uur te middelen (volgens WMO-richtlijnen, zie KNMI (2010)). Het effect van de maximaal tien minuten verschil in het tijdstip van waarnemen is verwaarloosd.

3.2 De stations

3.2.1 Algemeen

Meetapparatuur

Veruit de meeste stations zijn van het merk Davis, type Vantage Pro. Temperatuurmetingen door Vantage Pro-weerstations zijn eerder in wetenschappelijk onderzoek gebruikt, in vakgebieden buiten de meteorologie en klimatologie (bv. McLaren *et al.* (2005), Eigenberg *et al.* (2003), Watanabe *et al.* (2006), Wiacek *et al.* (2007)). Figuur 3.1 toont de *integrated sensor suite*, het gedeelte van het station waarmee onder andere de temperatuur wordt gemeten. Op alle stations is de temperatuursensor beschermd tegen invloeden van (zonne-) straling en regen door een witte schotelhut. Sommige van de stations zijn voorzien van *kunstmatige ventilatie*, een kleine ventilator waarmee lucht van buiten door de sensor wordt geleid. Dit verkleint de kans dat de lucht in de hut door bijvoorbeeld (zonne-) straling opwarmt tot boven de omgevingstemperatuur. Andere sensorhutten zijn, net als die van het KNMI, slechts door de wind ('natuurlijk') geventileerd. Bij weinig wind hebben stations met natuurlijke ventilatie over het algemeen een grotere *stralingsfout*, d.w.z. een overschatting van de luchttemperatuur door verwarming van de meethut door (vooral zonne-) straling (Van der Meulen en Brandsma, 2008; Nakamura en Mahrt, 2005). Hiermee is in dit onderzoek rekening gehouden, door metingen van niet-actief geventileerde stations niet te gebruiken wanneer deze zich op een voor de wind beschutte plek bevinden (zie paragraaf 3.3).

Meetlocatie

Alle gebruikte stations bevinden zich in de directe nabijheid van een woonhuis. Ze zijn in te delen in stations die meten bovenop de bebouwing (bijvoorbeeld op een dak of een balkon), en stations



Figuur 3.1: De *integrated sensor suite* van een Davis Vantage Pro 2 weerstation. Bron: Remie van Bommel, <http://www.wxhoogeloon.nl>.

die meten op leefniveau, bijvoorbeeld in een tuin. Stations op leefniveau meten de luchttemperatuur meestal op een hoogte van 1,5 m à 2 m boven de grond. De omgeving is meestal vrij beschut, door bijvoorbeeld schuttingen, de gevel van een woonhuis, en vegetatie. De hoger gelegen stations staan vaak op een paal bovenop een (plat of schuin) dak of op een dakkapel.

3.2.2 Capelle a/d IJssel: parallelle reeks tuin- en daksensor

Om de verschillen in gemeten stadseffect tussen hoger en lager gelegen stations nader te onderzoeken, is een parallelle meetreeks gebruikt, van temperaturen gemeten in de tuin en op het dak van één woonhuis in Capelle a/d IJssel. In de overige analyses is van dit station alleen de daksensor gebruikt.

De tuinsensor van dit station meet op 1,5 m hoogte. Deze meting vindt plaats in een beplant deel van de tuin, met als belangrijkste objecten rondom enkele hortensiastruiken en een conifeer, op ongeveer 1 m afstand van de sensor. De dichtstbijzijnde huismuur staat op ongeveer 3 m afstand. De sensor is niet kunstmatig geventileerd, en bevindt zich op een beschutte plek. De sensor komt niet of nauwelijks in de zon doordat de huismuren zich ten zuidoosten en ten zuidwesten bevinden. Ook blijkt uit de metingen geen verstoring door zonnestraling. De tuinsensor meet in gehele graden Fahrenheit, welke daarna worden omgerekend naar graden Celsius afgerond op één decimaal. De nauwkeurigheid van de meting is daardoor ongeveer een halve graad Celsius.

De daksensor bevindt zich op 9,5 m hoogte boven de grond, op ongeveer 1,30 m boven een plat dak. De daksensor geeft meetwaarden door met een nauwkeurigheid van een tiende graad Celsius. Deze sensor is kunstmatig geventileerd.

3.2.3 Meteo Delft: stadsstation op 33 m hoogte

Bijna alle bij het onderzoek gebruikte stations bevinden zich in de UCL, onder de *blending height* (zie paragraaf 2.1.2). Ze zijn dus alle in meer of mindere mate beïnvloed door effecten op microschaal. Eén station echter, nabij het centrum van Delft op een 33 m hoge toren, meet rond of boven de *blending height*, door Grimmond en Oke (1999) in woonwijken geschat op 15-40 m. Door de waarnemingen gedaan op dit station te analyseren kan een schatting worden gemaakt van het UHI met een kleinere beïnvloeding door microschaaleffecten. Door deze resultaten te vergelijken met de resultaten van tuin- en dakstations in de UCL, is iets te zeggen over de beïnvloeding van deze stations door de microschaal, en dus hun representativiteit voor de lokale schaal.



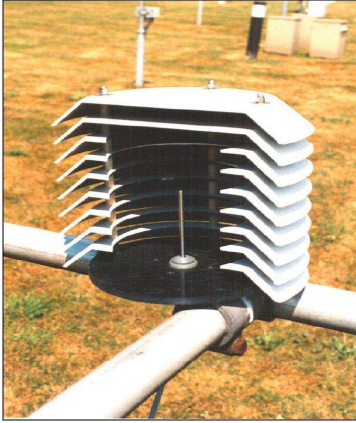
Figuur 3.2: Foto van het weeramateurstation Meteo Delft. Groen omcirkeld: *Integrated sensor suite* met temperatuursensor. Bron: Rainier Abma, <http://www.meteodelft.nl>.

Het station Meteo Delft bevindt zich aan de rand van de binnenstad, tussen de woonwijken ten zuidoosten van het centrum en de gebouwen van de TU. De temperatuursensor is gemonteerd aan het hek bovenop de toren, op ongeveer 1,5 m van de muur van de toren zelf. Zie voor een foto van de opstelling Figuur 3.2. De gemeten temperaturen worden gecorrigeerd naar de standaard meethoogte van 1,5 m aan de hand van een droogadiabatisch temperatuurverloop van $9.81 \cdot 10^{-3} \text{ K m}^{-1}$. Dit is de temperatuurafname in lucht die goed gemengd is door turbulentie. In rustige weersituaties, vooral 's nachts, kan de temperatuur met hoogte minder snel dalen, of zelfs stijgen (een *temperatuurinversie*). Voor dit effect is niet eenvoudig te corrigeren. Met de mogelijkheid van dit effect is rekening gehouden in de bespreking van de meetresultaten op dit station.

3.2.4 De landelijke stations van het KNMI

Het UHI is hier gedefinieerd als het temperatuurverschil tussen een weeramateurlocatie in stedelijk gebied, en een automatisch KNMI-weerstation landelijk gebied in de nabijheid (tot 15 km) van deze meetlocatie. Op de KNMI-stations wordt de temperatuur gemeten in een natuurlijk geventileerde schothut (zie Figuur 3.3). Uitgebreide informatie over de methoden van meten op de KNMI-weerstations is te vinden in het Handboek Waarnemingen (KNMI, 2010). Deze KNMI-weerstations zijn ingericht met als doel om te meten in een zo weinig mogelijk door de mens beïnvloed landelijk klimaat dat representatief is voor een groot gebied. Van het KNMI-station De Bilt, dat op enige kilometers ten oosten van de stad Utrecht ligt, is vastgesteld dat dit station door de nabijheid van de stad een gemiddeld ongeveer $0,14^\circ\text{C}$ hogere temperatuur meet (Brandsma *et al.*, 2003). Ook het KNMI-station Rotterdam, dat relatief dicht bij de stad ligt, en aan de lijzijde van bebouwing, kan zijn beïnvloed door het UHI. Dit effect op de KNMI-weerstations kan in dit onderzoek een lichte onderschatting van het UHI hebben veroorzaakt.

Bij het onderzoeken van de afhankelijkheid van het UHI van de meteorologische situatie, zijn de windsnelheid, de temperatuur, de wolkenbedekking en de luchtdruk gebruikt zoals gemeten op de KNMI-weerstations.



Figuur 3.3: Temperatuurmeethut zoals gebruikt op de KNMI-weerstations (opengewerkt om de temperatuursensor zichtbaar te maken). Bron: KNMI (2010).

3.3 Selectie van stations

Van meer dan 250 weeramateurstations waren waarnemingen beschikbaar. De locatie en opstelling van deze weerstations loopt sterk uiteen. Vaak is de omgeving van het weerstation dusdanig, dat de meetgegevens waarschijnlijk niet representatief zijn voor het klimaat op de lokale schaal. Zo is de temperatuurmeting op een deel van de stations duidelijk beïnvloed door (zonne-) straling, en bevindt bij een deel van de stations de temperatuursensor zich zo dicht bij een object (bijvoorbeeld een muur of een schoorsteen) dat de kans op verstoring door dit object te groot is. Dit uit zich vaak ook in zichtbaar verstoorde metingen, zoals een onrealistisch sterke reactie van de gemeten temperatuur op zonneshijn. Om enkel representatieve stations te gebruiken in het onderzoek, zijn selectiecriteria opgesteld. Het aantal beschikbare stations wordt hiermee sterk verkleind, maar de resultaten winnen veel aan consistentie. Hieronder volgt een opsomming van de selectiecriteria. De criteria zijn gebaseerd op theoretische concepten, grotendeels beschreven in Oke (2006), maar zijn ook deels verkregen door te kijken naar de metingen zelf.

De stationsselectie is gedaan aan de hand van uitgebreide metadata. Alle weeramateurs hebben een lijst met vragen omtrent hun meetopstelling beantwoord, en van alle gebruikte stations waren foto's beschikbaar. Bij onduidelijkheid over de meetomstandigheden is persoonlijk contact gezocht met weeramateurs.

De volgende stations zijn *niet* gebruikt in het onderzoek:

- *Stations in een beschutte omgeving, zonder kunstmatige ventilatie.* Wanneer er veel beschutting is, bijvoorbeeld bij een station in een tuin omgeven door schuttingen, is er weinig wind. Dit kan zorgen voor te weinig ventilatie in de meethut, waardoor deze sterk opwarmt door (zonne-) straling van buitenaf (Nakamura en Mahrt, 2005; Van der Meulen en Brandsma, 2008). Op sommige stations die zijn geplaatst in tuinen is dit effect zichtbaar als een 'piek' in het overdag gemeten stadseffect, die bij kunstmatig geventileerde tuinstations afwezig is. Bij stations op dakniveau, waar meer wind is, is dit effect niet te zien. Als definitie voor 'beschut' gebruiken we het criterium dat het station in de nabije omgeving (op de ruimtelijke schaal van een achtertuin) aan meerdere kanten is omgeven door winddichte objecten, op dezelfde hoogte of hoger dan het station. Hierbij is aangenomen dat stations die volgens deze definitie niet beschut zijn, door de natuurlijke luchtstroom ongeveer net zo effectief geventileerd worden als de KNMI-stations buiten de stad (met natuurlijke ventilatie). Zie ook Oke (2006): (...) *an assembly placed in the lower UCL may be too well sheltered, so forced ventilation is recommended.*

Op deze regel is een uitzondering gemaakt voor het beschutte, natuurlijk geventileerde station in Capelle a/d IJssel (zie paragraaf 3.2.2). Dit station bevindt zich aan de noordkant van een huis, en ontvangt, ook in de zomer, vrijwel geen directe zonnestraling (Blécourt, pers. comm.). In de metingen op dit station was geen verstoring door straling zichtbaar. Het station is enkel gebruikt bij een vergelijking met metingen van een sensor op het dak van hetzelfde woonhuis, niet bij de overige analyses.

- *Stations met winddichte oppervlakken binnen een straal van 1,5 m.* Wanneer zich in de directe nabijheid van een station een object bevindt, zoals een stenen muur, dan is er kans op sterke beïnvloeding van het klimaat ter plekke door dit object. Een minimale afstand van 1,5 m is gehanteerd, zodat de afstand van de sensor tot objecten minstens zo groot is als de afstand van de sensor tot de grond. Voor (open) vegetatie is soms een wat kleinere afstand tot de sensor toegestaan. Wegens de grote verschillen tussen het klimaat boven water en boven land, is ook voor wateroppervlakken (zoals tuinvijvers) een minimale horizontale afstand van 1,5 m in acht genomen. De invloed van individuele objecten op de luchttemperatuur is bij afstanden van meer dan 1 m van het object relatief klein (Oke, 2006; Nakamura en Oke, 1988).

- *Stations met te weinig data.* De beschikbaarheid van gegevens is van belang. Daarom zijn stations enkel meegenomen in analyses wanneer zij voor minstens 85% van de onderzochte periode gegevens hebben geleverd.

- *Stations op te grote afstand van een KNMI-station.* Om het UHI op een weeramateurstation te bepalen, is steeds het verschil genomen van de temperatuur op het weerstation en die op een KNMI-station in het buitengebied (zie paragraaf 2.1.2). Om beïnvloeding van het resultaat door gradiënten in het achtergrondklimaat zo veel mogelijk te voorkomen, zijn alleen weeramateurstations gebruikt die zich op minder dan 15 km van een KNMI-weerstation bevinden. Verder moet de afstand tot de kust vanaf beide stations groter zijn dan de onderlinge afstand. Dit omdat in er Nederland langs de kuststrook een sterke temperatuurgradiënt bestaat, die het geschatte UHI zou kunnen beïnvloeden (zie Heijboer en Nellestijn (2002)). Twee weeramateurstations in Zuid-Limburg zijn uitgesloten omdat de hoogteverschillen met het dichtstbijzijnde KNMI-station Maastricht te groot waren.

3.4 Automatische validatie van weeramateurmetingen

In de meeste temperatuurreeksen van weeramateurstations komen hier en daar fouten voor. Deze kunnen zijn veroorzaakt door een verstoring van de meting zelf, bijvoorbeeld door het uitvoeren van activiteiten in de nabije omgeving van de sensor, of ze kunnen zijn geïntroduceerd door storingen ergens in de gegevensoverdracht van het station naar het KNMI. Deze fouten zijn vaak zichtbaar als zeer onrealistische waarden. Het is noodzakelijk om dit soort uitschieters weg te filteren uit de gebruikte reeksen. Dit is gedaan door de metingen te vergelijken met de klimatologie in de periode 1971-2000¹, van het dichtstbijzijnde KNMI-station waarvan metingen gedurende deze hele periode beschikbaar zijn. Hierbij zijn voor elke decade (tiendaagse periode) in het jaar, voor alle 24 uurvakken op de dag de hoogst en laagst gemeten temperaturen genomen. Wanneer de temperatuurmeting op een amateurstation de voor dat uurvak in die decade hoogste of laagste waarde respectievelijk over- of onderschrijft met minstens 5°C, wordt de meting verworpen. Het eerdergenoemde criterium dat 85% van de waarnemingen op een amateurstation aanwezig moet zijn, geldt na toepassing van deze automatische validatie. Er is een kleine kans dat door deze methode valide metingen worden verworpen (bijvoorbeeld bij een zeer sterk UHI). Zonder zo'n validatie is de kans echter te groot dat grote fouten in de reeksen worden meegenomen. Per station worden in het jaar 2010 hooguit enkele uurlijkse metingen verworpen.

¹Ten tijde van het uitvoeren van de analyses was nog geen klimatologie voor de nieuwe normaalperiode 1981-2010 beschikbaar.

3.5 Bevolkingsdichtheid

In eerder onderzoek is vaak getracht om een verband vast te stellen tussen het UHI en het inwoneraantal van een gemeente of stad (bv. Oke (1973); Park (1986)). Van Hove *et al.* (2010b) vond voor Nederlandse gemeenten geen significant verband tussen deze twee parameters, en stelt voor om in plaats van inwoneraantal bevolkingsdichtheid te gebruiken als verklarende variabele. De bevolkingsdichtheid in een buurt of stad zegt meer over het UHI dan het inwoneraantal, omdat de bevolkingsdichtheid minder dan het totale inwoneraantal bepaald wordt door de bestuurlijke indeling van een stad of stadsdeel. Ook is er een duidelijker verband tussen de bevolkingsdichtheid en de typologie van de bebouwing (bv. veel hoogbouw bij een hoge bevolkingsdichtheid; meer parkachtige wijken met vrijstaande huizen bij een lage bevolkingsdichtheid). Een hoge bevolkingsdichtheid hangt vaak samen met lage SVF's (*sky view factors*, zie paragraaf 2.1.1) (Giridharan en Ganesan, 2004).

Het verband tussen UHI en bevolkingsdichtheid is onderzocht. Hierbij is voor elk weeramateurstation de bevolkingsdichtheid genomen in de wijk waar het station geplaatst is. Deze bevolkingsdichtheid is afkomstig van de website CBSinuwbuurt (CBS, 2010) van het CBS. Deze website geeft statistische gegevens van alle buurten in Nederland. De gebruikte gegevens stammen uit 2009 en 2008. Het CBS hanteert buurtgrenzen zoals die zijn vastgesteld door gemeenten in 2008. De grootte van deze buurten varieert. De weeramateurstations die in dit onderzoek zijn behandeld als 'stedelijk' (zie paragraaf 4.3) lagen in buurten met een gemiddelde oppervlakte van 0,24 km² (standaardafwijking 0,09 km²); de overige (meer landelijk gelegen) stations lagen in buurten met een gemiddelde oppervlakte van 5,23 km² (standaardafwijking 6 km²).

4. Resultaten

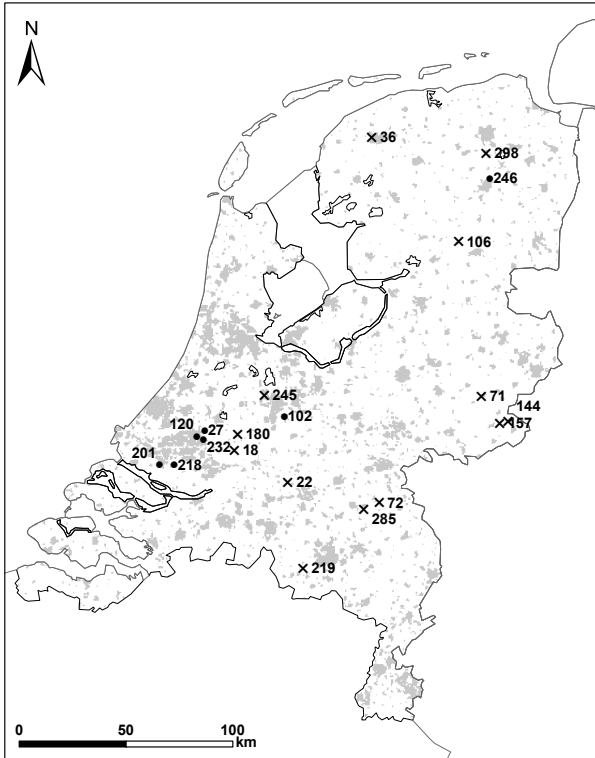
4.1 Selectie van stations

Tabel 4.1 geeft een overzicht van alle gebruikte stations, na toepassing van de selectiecriteria genoemd in Hoofdstuk 3.. Deze stations liggen alle binnen een straal van 15 km rondom één van de KNMI-weerstations, en voldoen ook aan de overige criteria beschreven in paragraaf 3.2. Ook getoond in Tabel 4.1 is de bevolkingsdichtheid van de buurt waarin het station is gelegen, volgens het CBS (CBS, 2010). Sommige van de stations in Tabel 4.1 zijn in één of enkele van de analyses niet meegenomen, omdat daar niet werd voldaan aan de minimale databeschikbaarheid van 85%.

Figuur 4.1 toont de locaties van de stations in een kaart van Nederland. Hoewel de stations verspreid zijn over het hele land, bevinden de meeste stedelijke stations zich in de regio Rotterdam. In andere stedelijke gebieden, zoals de regio Haaglanden, waren niet genoeg (goede) gegevens voorhanden voor een verantwoorde analyse. Door de relatief kleine verschillen in inrichting en het vergelijkbare klimaat, zijn de gevonden resultaten waarschijnlijk representatief voor stedelijk gebied in heel Nederland.

Tabel 4.1: Lijst van de gebruikte weeramateurstations, met bevolkingsdichtheid van de buurt, en dichtstbijzijnd KNMI-station. Stations boven de horizontale streep zijn in de analyses behandeld als stadsstations (zie paragraaf 4.3).

#	Gemeente	Bevolkingsdichtheid (km ⁻²)	KNMI-station
201	Spijkenisse	10.254	Rotterdam
27	Nieuwerkerk aan de IJssel	7.329	Rotterdam
232	Capelle a/d IJssel	6.829	Rotterdam
246	Assen	6.569	Eelde
102	Houten	5.911	De Bilt
120	Capelle a/d IJssel	5.464	Rotterdam
218	Oud-Beijerland	4.600	Rotterdam
36	Leeuwarden	3.418	Leeuwarden
285	Odiliapeel	2.771	Volkel
71	Borculo	2.462	Hupsel
245	Maarssen	2.451	De Bilt
298	Eelde	1.863	Eelde
22	Well	405	Herwijnen
219	Hoogeloon	82	Eindhoven
72	Sint Hubert	74	Volkel
180	Vlist	46	Cabauw
144	Meddo	34	Hupsel
157	Vragender	33	Hupsel
18	Brandwijk	33	Cabauw
106	Ruinen	20	Hoogeveen



Figuur 4.1: Kaart van Nederland, met locaties van de gebruikte weeramateurstations (zie Tabel 4.1). Stations aangegeven met een bolletje zijn behandeld als 'stedelijk' (bevolkingsdichtheid > 4000 personen per km²).

4.2 UHI versus bevolkingsdichtheid

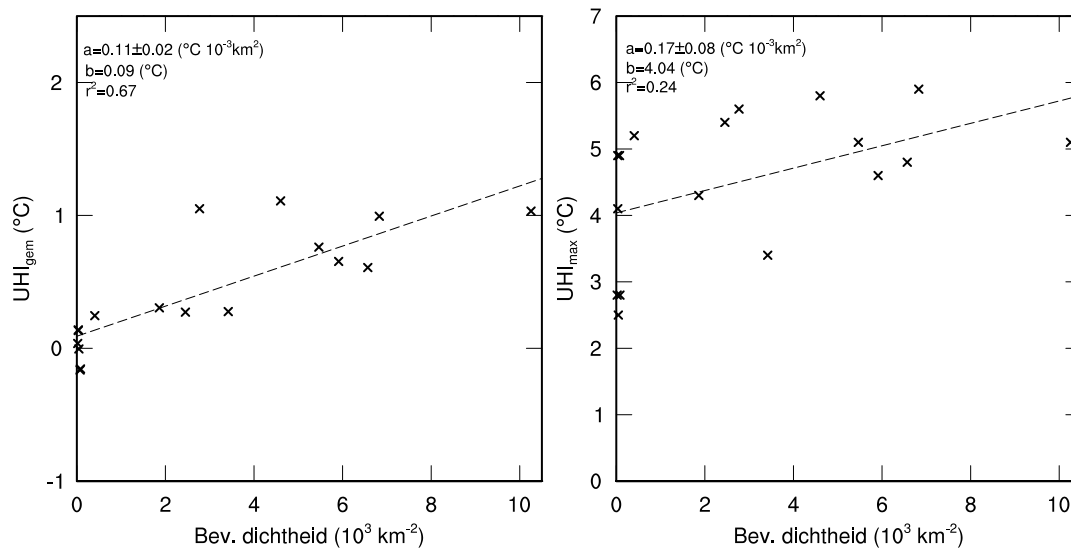
Voor alle stations is het gemiddelde (UHI_{gem}) en het maximale UHI (UHI_{max}) bepaald, over de meteorologische zomer (juni, juli, augustus) van 2010. UHI_{max} is hierbij de hoogst opgetreden waarde in de gehele zomer. Figuur 4.2 geeft de relatie tussen UHI_{gem} en UHI_{max} en bevolkingsdichtheid. Bij zowel UHI_{gem} als UHI_{max} is sprake van een positief verband met de bevolkingsdichtheid (positieve regressiecoëfficiënt a), zoals is te verwachten. UHI_{gem} neemt toe met 0,11°C per 1000 inwoners per km², UHI_{max} met 0,17°C per 1000 inwoners per km². De regressielijn van UHI_{gem} met bevolkingsdichtheid kruist de x-as bij een bevolkingsdichtheid dicht bij 0 (intercept $b=0,1$ °C). Dit is wat men zou verwachten, bij een bevolkingsdichtheid van 0 hoort immers een ruraal klimaat met een UHI_{gem} van 0°C. De regressielijn bij UHI_{max} kruist de x-as bij 4°C, ruim boven nul. Dit geeft aan dat sterke positieve (en negatieve) momentane temperatuurverschillen ook kunnen voorkomen wanneer het gemiddelde temperatuurverschil dicht bij nul ligt. Voor zowel UHI_{gem} als UHI_{max} is de positieve correlatie significant ($P < 0,0005$ en $P < 0,025$ voor UHI_{gem} resp. UHI_{max}).

Figuur 4.3 toont dezelfde analyse als hierboven besproken, maar dan voor alle nachtelijke waarnemingen in de periode van 24 juni tot en met 23 juli 2010, in de zomer van 2010 de periode van één maand met de hoogste gemiddelde temperatuur. In deze periode kwam het in De Bilt enkele malen bijna tot een hittegolf (zie Sluijter (2010b)). Onder warme en nachtelijke omstandigheden zou het UHI volgens de literatuur (zie paragraaf 2.1.1) sterker moeten zijn. Voor UHI_{gem} is het verband met bevolkingsdichtheid inderdaad steiler, 0,19°C per 10³km⁻², 72% meer dan in de volledige zomer van 2010. Voor UHI_{max} geldt hetzelfde, hier is de toename 0,31°C per 10³km⁻², 82% meer dan in de volledige zomer van 2010.

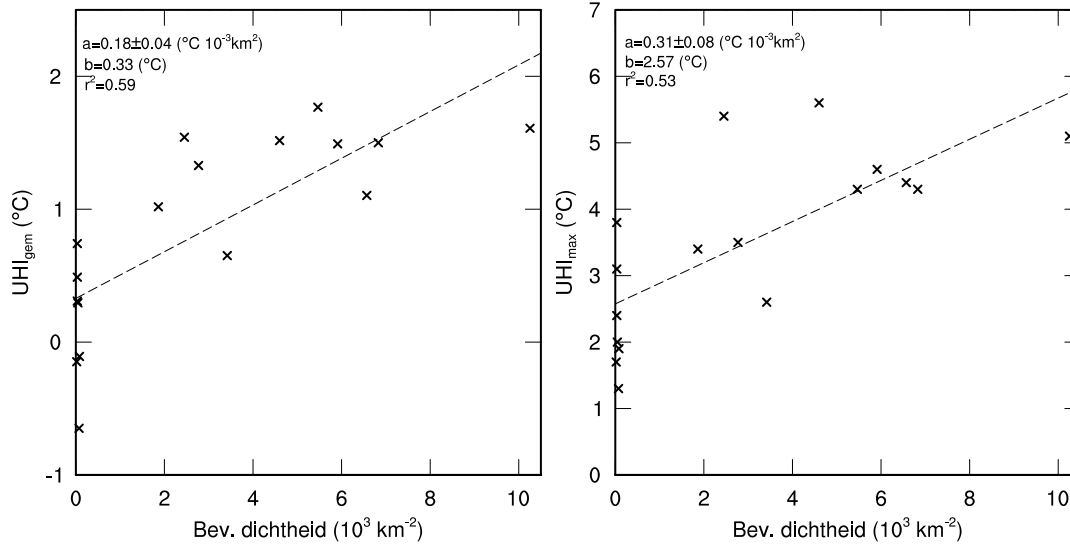
De stad met de meeste inwoners in Nederland is Amsterdam (783.364 inwoners, april 2011); de groot-

ste bevolkingsdichtheid in Amsterdam vindt men in de Transvaalbuurt, met 25.200 inwoners per km². Extrapolatie van de hierboven beschreven lineaire regressie geeft een schatting voor UHI_{max} van 8,3°C (gebaseerd op het maximum gedurende de zomer) en 10,4°C (gebaseerd op het maximum gedurende de nachten in een warme periode). Het verband tussen UHI_{max} en inwoneraantal afgeleid door Oke (1973) voor Europese steden ($UHI_{max} = 2.01 \log P - 4.06$) geeft voor Amsterdam een UHI_{max} van 7,8°C. Mogelijk is onze schatting hoger doordat Oke (1973) UHI_{max} definieerde als het UHI tijdens rustige en heldere weersomstandigheden, terwijl in dit onderzoek het waargenomen absolute maximum genomen is. Verder zijn de waarden van het UHI in Oke (1973) geldig voor een gehele stad, en niet speciaal voor de buurt met de hoogste bevolkingsdichtheid. Ook is wanneer ook zeer hoge bevolkingsdichtheden worden meegenomen, een logaritmische of exponentiële regressie mogelijk beter dan een lineaire, zoals hier is toegepast.

In de hierboven beschreven analyses is handmatig één uitschieter verwijderd, een UHI van 10,9°C gemeten op station Meddo, op 14 juli 2010 om 17:00 lokale tijd. Deze waarde trad op rondom het moment van passage van een buienlijn, die aanleiding gaf tot grote temperatuurcontrasten (Groenland *et al.*, 2010). Deze uitschieter werd niet verwijderd bij de automatische validatie.



Figuur 4.2: Relatie tussen UHI_{gem} en UHI_{max} en bevolkingsdichtheid in de zomer van 2010, met lineaire trendlijn (*least squares estimate*). a en b: coëfficiënten trendlijn volgens $y = ax + b$. r: correlatiecoëfficiënt. Positieve correlatie significant met $P < 0,0005$ (UHI_{gem}) en $P < 0,025$ (UHI_{max}). ±: standaardfout van de geschatte parameter.



Figuur 4.3: Relatie tussen UHI_{gem} en UHI_{max} en bevolkingsdichtheid van 23:00 t/m 5:00 LT (lokale tijd), in de periode van 24 juni tot en met 23 juli 2010, met lineaire trendlijn (*least squares estimate*). a en b: coëfficiënten trendlijn volgens $y = ax + b$. r: correlatiecoëfficiënt. Positieve correlatie significant met $P < 0.0005$ voor zowel UHI_{gem} als UHI_{max} . \pm : standaardfout van de geschatte parameter.

4.3 Frequentieverdeling van het UHI

In deze en de volgende paragrafen is gekeken naar de weeramateurstations met een aanzienlijk UHI, zomergemiddeld 0,5°C of sterker. Deze grens valt samen met de grens van een bevolkingsdichtheid van 4000 personen per km². Deze stations zullen in het volgende als 'stedelijk' worden aangemerkt.

Tabel 4.2 toont de frequentieverdeling van de uurlijkse waarden van het UHI over verschillende overschrijdskwantielen, en het gemiddeld en maximaal gemeten UHI, voor alle stations gelegen in een buurt met een bevolkingsdichtheid groter dan 4000 personen per km². Dit op basis van de gehele meteorologische zomer van 2010. Tabel 4.3 geeft deze verdeling voor de nachten in de subperiode van 24 juni tot en met 23 juli 2010, dezelfde relatief warme periode als hierboven besproken.

Uit Tabel 4.2 volgt dat het op de stedelijke weeramateurstations in de zomer van 2010 0,6°-1,1°C (gemiddeld 0,9°C) warmer was dan in het buitengebied. In 25% van de tijd ligt het UHI boven 1,1-1,8°C (gemiddeld 1,6°C). In de nachten tijdens een periode met overwegend warm en rustig weer (Tabel 4.3) is het temperatuurverschil groter: 1,2-1,8°C (gemiddeld 1,5°C), en groter dan 2,1-2,7°C (gemiddeld 2,5°C) in 25% van de tijd. Er is dus op de stedelijke stations een duidelijk UHI aanwezig, dat tijdens de nachten in een periode met warm weer sterker is dan gemiddeld over de hele zomer. UHI_{max} ligt meestal rond 5°C. Op alle onderzochte stations is het UHI in de zomer van 2010 in minstens 5% van de tijd negatief. Het is dan in de stad juist koeler dan in het buitengebied. De variatie tussen de stations is vrij gering. Dit geeft aan dat de gemiddelde verdeling van het UHI vrij betrouwbaar is voor het type locatie waar deze stations zijn geplaatst (locaties rondom een woonhuis).

Het hierboven gevonden UHI_{gem} in de zomermaanden van 0,6-1,1°C ligt wat lager dan het zomergemiddelde UHI van 1,3°C gevonden door Conrads (1975), in een tuin in het centrum van Utrecht. Het verschil komt waarschijnlijk doordat de weeramateurs meestal meten in woonwijken, en niet in stadscentra, waar het UHI doorgaans sterker is (Watkins *et al.*, 2002). Voor de bevolkingsdichtheid in de wijk rondom de meetlocatie van Conrads (1975) (De buurt Nobelstraat en Omgeving in Utrecht, 10.259 inwoners per km²) in 2010, zouden we volgens de lineaire regressie in Figuur 4.2 een UHI_{gem} verwachten

Tabel 4.2: Kwantielen overschrijding UHI, en UHI_{gem} en UHI_{max} ($^{\circ}C$) in zomer 2010, voor de stedelijke weeramateurstations. BD: bevolkingsdichtheid.

Station	BD	95%	75%	UHI_{gem}	25%	5%	UHI_{max}
201	10254	-0,8	0,1	1,0	1,8	3,1	5,1
232	6829	-0,6	0,2	1,0	1,8	3,2	5,9
246	6569	-0,7	-0,2	0,6	1,3	2,4	4,8
102	5911	-0,5	0,0	0,7	1,1	2,5	4,6
120	5464	-0,7	0,0	0,8	1,4	2,7	5,1
218	4600	-0,7	0,3	1,1	1,9	3,2	5,8
gem.	6605	-0,7	0,1	0,9	1,6	2,9	5,2

Tabel 4.3: Kwantielen overschrijding UHI, en UHI_{gem} en UHI_{max} ($^{\circ}C$) van 23:00 t/m 5:00 LT, in de periode van 24 juni tot en met 23 juli 2010, voor alle stedelijke weeramateurstations. BD: bevolkingsdichtheid.

Station	BD	95%	75%	UHI_{gem}	25%	5%	UHI_{max}
201	10254	-0,9	0,3	1,6	2,7	4,4	5,1
232	6829	-0,9	0,7	1,5	2,4	3,4	4,3
246	6569	-0,4	0,2	1,1	2,0	3,3	4,4
102	5911	-0,4	0,4	1,5	2,6	3,5	4,6
120	5464	-0,3	1,0	1,8	2,7	3,5	4,3
218	4600	-1,2	0,1	1,5	2,7	4,1	5,6
gem.	6605	-0,7	0,5	1,5	2,5	3,7	4,7

van $1,2^{\circ}C$, niet significant verwijderd van de door Conrads vastgestelde waarde van $1,3^{\circ}C$.

De in dit onderzoek gevonden waarden van UHI_{max} (rond $5^{\circ}C$) zijn ten opzichte van de meeste andere Europese steden (meestal $4-10^{\circ}C$, Van Hove *et al.* (2010b)) wat aan de lage kant. Dit is waarschijnlijk te verklaren door het gebrek aan waarnemingen in stadscentra in dit onderzoek, en aan het Nederlandse klimaat, dat koeler, winderiger en meer bewolkt is dan dat in veel andere studiegebieden (zie ook de volgende paragraaf). Verder zijn de onderzochte steden minder groot dan de steden die worden beschreven in de meeste internationale literatuur. Ook kan het UHI in ons onderzoek wat zijn onderschat doordat een aantal van de als 'landelijk' gebruikte KNMI-stations (bijvoorbeeld De Bilt en Rotterdam) dicht bij de stad ligt, waardoor deze stations zelf niet geheel vrij zijn van (advectioneel) stadseffect (zie paragraaf 3.2.4).

De intensiteit van het UHI op de weeramateurstations is vergelijkbaar met dat op station 'Oost' in Van Hove *et al.* (2010a), gemeten in de zomer van 2010 (mediaan= $0,6^{\circ}C$, $Q95=3,2^{\circ}C$). Dit station ligt in een omgeving met huizenblokken en dicht op elkaar staande vrijstaande huizen, vergelijkbaar met de omgeving van de meeste weeramateurstations. Van Hove *et al.* (2010a) vindt op stations in meer intensief ontwikkeld stedelijk gebied een sterker UHI (mediaan= $1,3-1,4^{\circ}C$, $Q95=5,1-5,9^{\circ}C$). Op station 'Oost' ligt UHI_{max} rond $5^{\circ}C$, ook vergelijkbaar met de waarden op de weeramateurstations, waar dat op de stations in meer intensief ontwikkeld stedelijk gebied rond $7-8^{\circ}C$ ligt.

4.4 Het UHI onder verschillende omstandigheden

4.4.1 Tijd van de dag en weersituatie

Volgens de wetenschappelijke literatuur is het UHI vaak het sterkst tussen zonsondergang en zonsopkomst (Oke, 1987; Watkins *et al.*, 2002; Van Hove *et al.*, 2010b), bij helder weer (Morris *et al.*, 2001), bij weinig wind (Oke, 1987, 1982; Morris *et al.*, 2001) en in het zomerseizoen (Oke, 1982; Conrads, 1975;

Brandsma, 2010). We hebben deze afhankelijkheden van het UHI onderzocht op alle hiervoor als stedelijk aangemerkte weeramateurstations, in buurten met een bevolkingsdichtheid groter dan 4000 inwoners per km². Ook hebben we gekeken naar het gemiddelde UHI op alle stedelijke stations in de regio Rotterdam¹ (stations 201,232,120,218, zie Tabel 4.1). Eerst is alleen gekeken naar de zomer van 2010, hierna is het verloop van het UHI door het jaar heen onderzocht. Figuur 4.4 geeft het gemiddelde verloop van het UHI als functie van de tijd van de dag, de windsnelheid, de temperatuur, de (wolken-) bedekkingsgraad en de luchtdruk, voor de stedelijke weeramateurstations afzonderlijk. Figuur 4.5 toont hetzelfde, voor het UHI gemiddeld over alle weeramateurstations in de regio Rotterdam, met hierin aan de hand van kwantielen de spreiding van het UHI rondom het gemiddelde weergegeven. In Figuur 4.6 is het gemiddelde verloop gegeven van het UHI op de stations in de regio Rotterdam als functie van de temperatuur, windsnelheid, bedekkingsgraad en luchtdruk, voor 's nachts en overdag afzonderlijk.

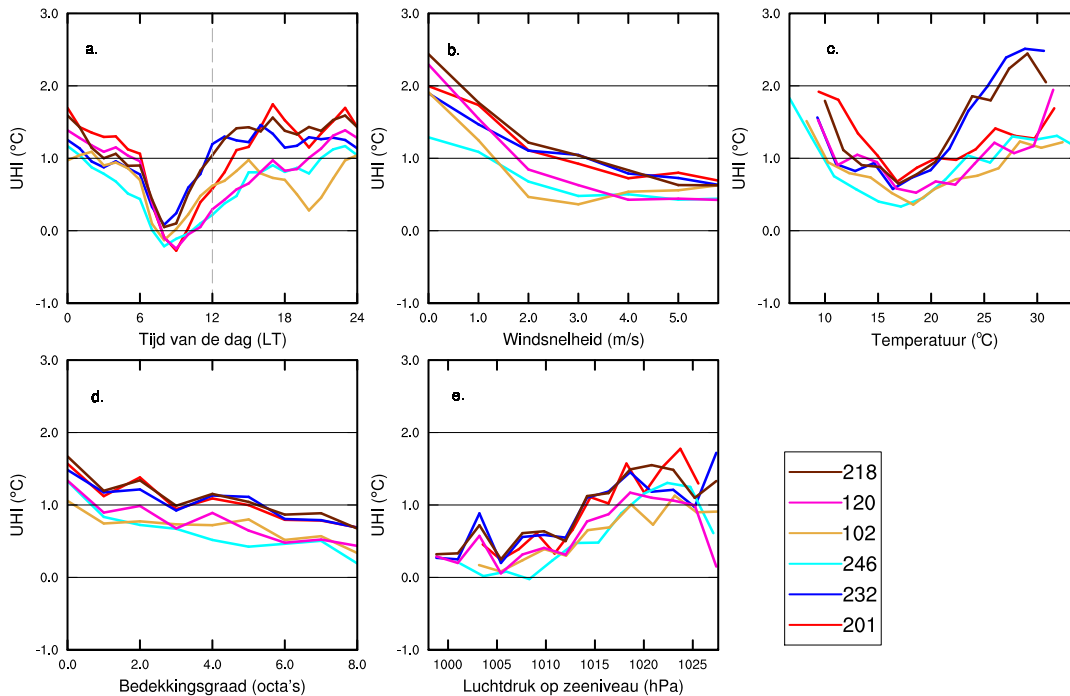
Voor deze analyses is het gemiddelde (Figuur 4.4) en de frequentieverdeling (Figuur 4.5) van het UHI bepaald binnen verschillende intervallen (*bins*) van de onafhankelijke variabele op de x-as. Voor de tijd van de dag, de maand in het jaar, de windsnelheid en de bedekkingsgraad zijn deze intervallen ingedeeld in gehele eenheden (bv. gehele uren en gehele meters per seconde), voor temperatuur en luchtdruk is voor de breedte van de intervallen een optimum gezocht tussen resolutie (een zo groot mogelijk aantal *bins*) en representativiteit (genoeg gegevens per *bin* voor representatieve statistiek). In Figuur 4.5 zijn het gemiddelde en de kwantielen alleen weergegeven voor intervallen waarin meer dan 8 waarnemingen vallen. De windsnelheid, temperatuur, wolkenbedekking en luchtdruk zijn verkregen uit metingen op het dichtstbijzijnde KNMI-station in het buitengebied.

Tijd van de dag

Uit Figuur 4.4a. en Figuur 4.5a. blijkt dat het UHI 's in de zomer van 2010 in de namiddag en nacht het sterkst was. In deze periode is het UHI op de stedelijke stations op de stedelijke stations gemiddeld meer dan 1°C. In de ochtend, kort na zonsopkomst (zonsopkomst is om 5:26 LT (lokale tijd) op 1 juni, om 6:50 LT op 31 augustus) neemt het UHI snel af tot een minimum, gemiddeld nagenoeg nul, met voor de regio Rotterdam een spreiding tussen grofweg -1°C en +1°C (95% resp. 5%-kwantiel). In de nachtperiode ligt deze spreiding tussen grofweg 0°C en +3°C. Deze dagelijkse gang, waarbij het UHI 's nachts het sterkst is, met een snelle afname in de ochtend stemt overeen met de meeste wetenschappelijke literatuur. Het UHI neemt in de loop van de ochtend weer toe, daar waar het in ander onderzoek meestal ongeveer constant blijft op een bepaald niveau, en pas in de avond weer toeneemt (bv. Watkins *et al.* (2002); Oke (1982)). De dagelijkse gang in onze waarnemingen lijkt nog het meest op dat in Hamdi en Schayes (2008), die zowel in waarnemingen als in een model vonden dat het UHI in de ochtend snel afneemt tot ongeveer nul, en in de loop van de ochtend en middag weer geleidelijk toeneemt. Het verloop van het UHI over de dag in Figuur 4.4a. en Figuur 4.5a. stemt ook goed overeen met dat gevonden voor professionele weerstations in Rotterdam in Van Hove *et al.* (2010a).

Het minimum kort na zonsopkomst wordt mogelijk veroorzaakt door de nog laagstaande zon, waarbij het stedelijk gebied door schaduwwerking trager opwarmt dan het buitengebied (zie ook paragraaf 4.5), in combinatie met de relatief grote warmtecapaciteit van de materialen in de stad (Hamdi en Schayes, 2008). In deze situatie warmt het buitengebied sneller op dan de stad, waardoor het UHI afneemt. Mogelijk speelt ook de grotere dichtheid van koude lucht een rol, waardoor afgekoelde lucht 's ochtends langer kan blijven hangen op laaggelegen, beschaduwde en beschutte plekken.

¹In andere grote stedelijke gebieden in Nederland, zoals de regio Haaglanden, waren niet genoeg gegevens voorhanden om een (verantwoorde) inschatting te maken. De resultaten voor de regio Rotterdam zijn waarschijnlijk ook representatief voor andere, vergelijkbare stedelijke gebieden in Nederland. Zie ook de relaties tussen UHI en bevolkingsdichtheid afgeleid in Paragraaf 4.2.



Figuur 4.4: Gemiddeld verloop van het UHI in de zomer van 2010 als functie van de tijd van de dag (a.) en de gemeten windsnelheid (b.), temperatuur (c.), wolkenbedekkingsgraad (d.) en luchtdruk (e.), voor alle weeramateurstations in stedelijk gebied.

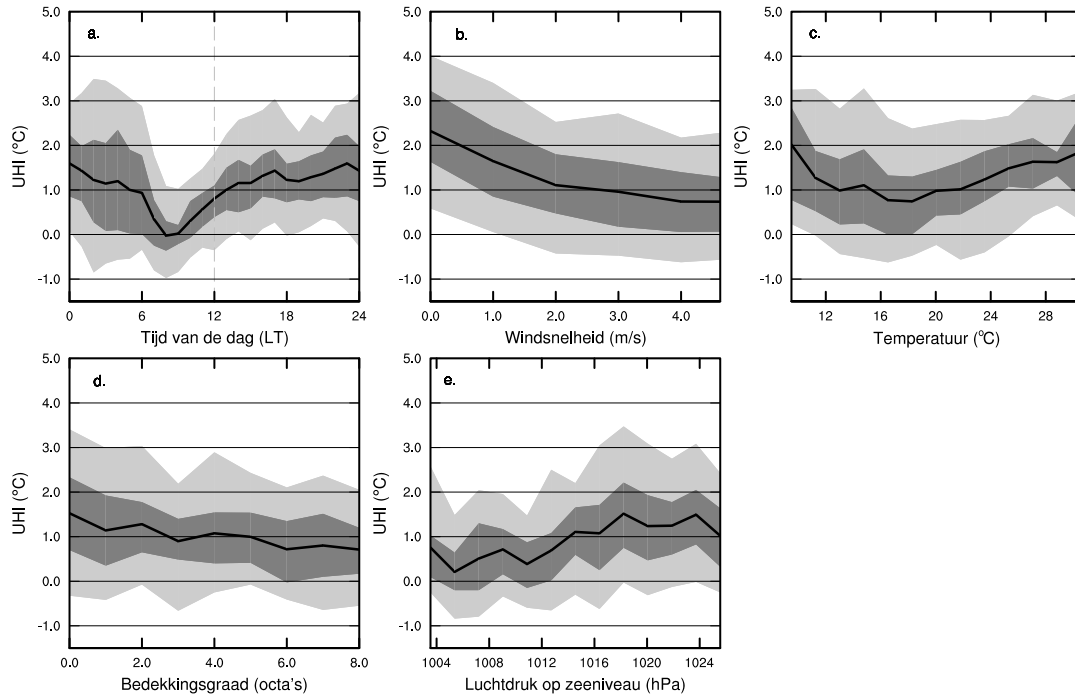
Windsnelheid

Het UHI neemt in de zomer van 2010 toe met afnemende windsnelheid (Figuur 4.4b. en Figuur 4.5b.). Bij windstilte is het UHI gemiddeld ongeveer $1,5^{\circ}\text{C}$ sterker dan bij een windsnelheid van 4 m/s . Dit verband is steiler dan de $0,8^{\circ}\text{C}$ per 5 m/s gevonden door Morris *et al.* (2001), op basis van nachtelijke situaties in de zomer, in Melbourne. Nemen we alleen nachtelijke situaties (Figuur 4.6b.), dan zien we zelfs een verloop van meer dan 2°C tussen windstilte en 4 m/s , terwijl het verband tussen windsnelheid en UHI overdag afwezig is. De verschillen in klimaat en typologie van de bebouwing tussen Melbourne en Nederlandse steden maken dat deze resultaten moeilijk vergelijkbaar zijn. Het verband tussen windsnelheid en UHI komt sterk overeen met dat in Van Hove *et al.* (2010a), met name op weerstation 'Oost', het station dat wat betreft omgevingskenmerken het meest overeenkomt met de weeramateurstations.

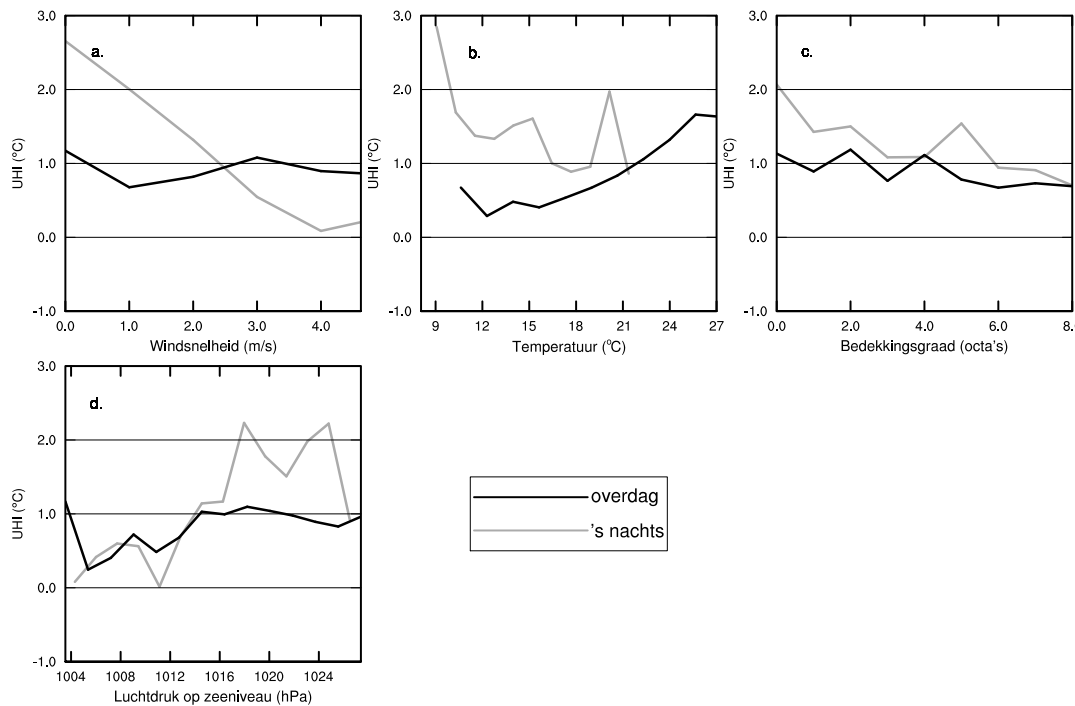
Het verband tussen het UHI en de windsnelheid is goed te verklaren. Bij weinig wind is er minder aanvoer van lucht uit het buitengebied richting de stad en vice versa, waardoor temperatuurverschillen tussen stedelijk en landelijk gebied verder kunnen oplopen. Ook is er bij minder wind minder verticale (turbulente) menging van lucht, waardoor de lokale energiebalans van dat moment aan het aardoppervlak sterk bepalend is voor de eigenschappen van de lucht.

Temperatuur

Wat betreft de temperatuur in de zomer (Figuur 4.4c., 4.5c., 4.6c.) heeft de respons van het UHI een soort U-vorm. Het UHI is het sterkst bij lage, en bij hoge temperaturen (als gemeten op het KNMI-station in het buitengebied). Het UHI bij lage temperaturen is, net als bij windsnelheid, te verklaren doordat lage temperaturen vooral overeenkomen met nachtelijke situaties, wanneer het UHI het sterkst



Figuur 4.5: Verloop van het UHI in de zomer van 2010, gemiddeld over stedelijke weeramateurstations in de regio Rotterdam, als functie van de tijd van de dag (a.), en de gemeten windsnelheid (b.), temperatuur (c.), wolkenbedekkingsgraad (d.) en luchtdruk (e.). Zwarte lijn: gemiddelde. Grenzen van licht- en donkergekleurde vlakken, van laag naar hoog UHI: 95%, 75%, 25% en 5%-kwantiel van overschrijding.



Figuur 4.6: Gemiddeld verloop van het UHI in de zomer van 2010, gemiddeld over stedelijke weeramateurstations in de regio Rotterdam, als functie van de gemeten windsnelheid (a.), bedekkingsgraad (b.) en luchtdruk (c.), voor overdag (7:00-20:00 LT) en 's nachts (23:00-5:00 LT) afzonderlijk.

is. Hoge temperaturen komen 's zomers meestal overeen met situaties overdag met warm en helder, 'mooi' weer met weinig wind, wanneer de verschillen tussen stralingseigenschappen van stedelijk en ruraal oppervlak groot kunnen zijn. Het UHI is 's zomers dus het sterkst enerzijds tijdens de nachten en anderzijds tijdens warme dagen. Figuur 4.6 bevestigt dit, met een positief verband tussen temperatuur en UHI overdag, terwijl het UHI 's nachts gemiddeld hoger ligt, en ook sterker lijkt tijdens koude nachten.

Wolkenbedekking

Figuur 4.4d., 4.5d. en 4.6c. tonen het verloop van het UHI met de bedekkingsgraad in de zomer van 2010. Bij toenemende wolkenbedekking zien we een afnemend UHI. Dit stemt overeen met het idee dat het UHI het sterkst is bij 'mooi', helder zomerweer. Er is zowel in het gemiddelde als in de extremen een verloop van iets minder dan 1°C tussen onbewolkt (0 octa's) en zwaar bewolkt weer (8 octa's). Dit verloop is vergelijkbaar met de afname van 1,1°C tussen 0 en 8 octa gevonden door Morris *et al.* (2001), op basis van nachtelijke situaties in de stad Melbourne. De afhankelijkheid van het UHI van de wolkenbedekking is begrijpelijk. Bij minder bewolking is er aan het aardoppervlak een sterkere invloed van straling van en richting de (heldere) hemel, waardoor de verschillen in stralingseigenschappen tussen stedelijk en landelijk oppervlak (zie paragraaf 2.1.1) meer invloed hebben. Uit Figuur 4.6 blijkt dat er zowel overdag als 's nachts een verband is tussen bedekkingsgraad en temperatuur, waarbij dit verband 's nachts sterker is dan overdag.

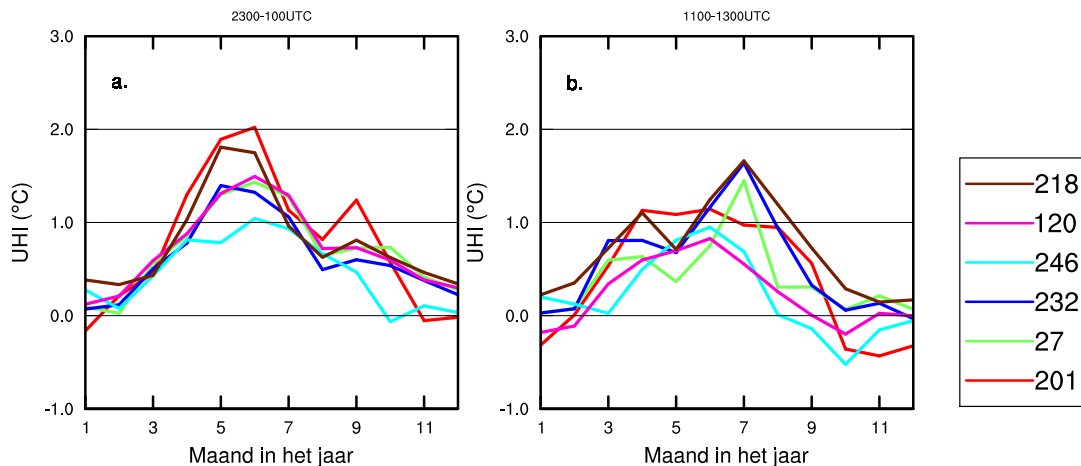
Luchtdruk

Het beeld van een UHI dat op zijn sterkst is bij helder, rustig weer wordt bevestigd door de relatie tussen het UHI en de luchtdruk (Figuur 4.4e., 4.5e., 4.6d.). Bij stijgende luchtdruk nemen in de zomer normaliter zowel de windsnelheid als de bedekkingsgraad af. We zien dat bij stijgende luchtdruk het UHI toeneemt van gemiddeld ongeveer 0,5°C bij 1005 hPa, tot gemiddeld ongeveer 1,4°C bij een luchtdruk boven 1016 hPa. De normale zomergemiddelde luchtdruk in de regio Rotterdam is ongeveer 1016,5 hPa. Het UHI bij deze luchtdruk valt in Figuur 4.4e. ongeveer samen met het zomergemiddelde voor de weeramateurstations in de regio Rotterdam (1°C). Net als bij de wolkenbedekking, is het verband tussen luchtdruk en UHI zowel overdag als 's nachts aanwezig, waarbij het verband 's nachts sterker is dan overdag (Figuur 4.6).

4.4.2 Tijd van het jaar

In het voorgaande is alleen gekeken naar de zomermaanden, voor het UHI wat betreft de impact op hittestress de meest interessante periode. Het verloop van het UHI door het jaar heen is echter ook interessant. Figuur 4.7 geeft het gemiddelde UHI in de verschillende maanden in het jaar, opnieuw voor de stedelijke weeramateurstations afzonderlijk en gemiddeld over de stations in de regio Rotterdam. Eerder was al geconcludeerd dat het UHI een sterke dagelijkse gang heeft. In Figuur 4.7 is daarom, vanwege het verschil in daglichtperiode tussen de seizoenen, niet gekeken naar het daggemiddelde UHI maar naar het UHI gemiddeld over 3 uren rondom middernacht (00UTC, 1:00/2:00 lokale tijd in resp. winter en zomer) en 3 uren rond het midden van de dag (12UTC, 13:00/14:00 lokale tijd in resp. winter en zomer). Het daggemiddelde UHI zou anders alleen al door de sterke verschillen in daglichtperiode een jaarlijkse gang laten zien.

Uit Figuur 4.7 blijkt een sterk verloop van het UHI door het jaar heen. In de maanden mei, juni en juli is het UHI op zijn sterkst, in november, december en januari is het UHI gemiddeld gesproken nagenoeg afwezig. Er is een 'dip' zichtbaar in het nachtelijke UHI in augustus. Deze is waarschijnlijk veroorzaakt door de zeer natte, sombere en koele maand augustus 2010 (Sluijter, 2010a), en dus klimatologisch niet representatief. In het voorgaande was immers al gevonden dat het UHI in de zomer zwakker is bij somber, 'slecht' weer. In de literatuur is het UHI meestal 's zomers sterker dan 's winters (Arnfield,



Figuur 4.7: Verloop van het maandgemiddelde UHI door het jaar 2010, rond 00UTC (a.) en rond 12UTC (b.), voor alle weeramateurstations in stedelijk gebied.

2003). Conrads (1975) vond minimumtemperaturen die in een tuin in het centrum van Utrecht 's zomers $2,7^{\circ}\text{C}$, en 's winters $1,7^{\circ}\text{C}$ hoger lagen dan in het buitengebied. Dit verschil tussen zomer en winter is vergelijkbaar met dat in Figuur 4.7a. Het feit dat Conrads (1975) zijn metingen deed in het centrum van Utrecht, terwijl de weeramateurs voornamelijk in woonwijken meten, verklaart wellicht dat Conrads' metingen 's winters wel een UHI laten zien. Ook Wilby (2003) vond een jaarlijkse gang in het nachtelijke UHI van ongeveer 1°C (tussen $2,2^{\circ}\text{C}$ in januari en $1,1^{\circ}\text{C}$ in juli). Het jaarlijks verloop van het UHI in Figuur 4.7 komt sterk overeen met dat op professionele weerstations in Rotterdam in Van Hove *et al.* (2010a).

Interessant is verder dat het UHI 's nachts niet op zijn minimum en maximum zit in de klimatologisch koudste resp. warmste tijd van het jaar, maar wat eerder. Mogelijk heeft dit te maken met de hoeveelheid zonnestraling en de hiermee samenhangende dagelijkse gang, die rond juni zijn hoogste, en rond december zijn laagste gemiddelde waardes bereikt. Deze 'verschuiving' is in het UHI overdag niet zichtbaar.

Een opmerking die bij dit resultaat gemaakt moet worden, is dat 's winters wanneer er sneeuw ligt de situatie heel anders kan zijn. Sneeuw kan lokaal een versterkte afkoeling geven in de nachten, dit terwijl in steden sneeuw (vooral door inzet van gladheidsbestrijding) op leefniveau vaak niet lang blijft liggen. Hierdoor zou in theorie in situaties met sneeuwdek met name 's nachts wel degelijk een sterk temperatuurcontrast tussen de stad en het buitengebied kunnen ontstaan.

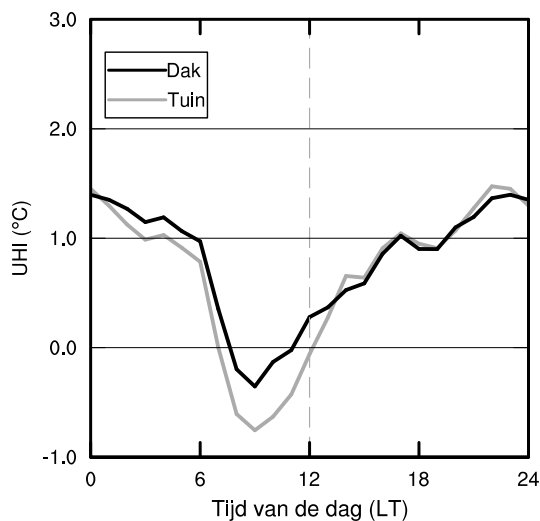
4.5 Verschillen tussen locaties: temperatuursensoren in de tuin en op het dak

In de dataset bevindt zich een parallelle reeks van twee temperatuursensoren op verschillende plaatsen rondom één woonhuis in Capelle aan de IJssel (station 120). De ene sensor bevindt zich op het dak van het huis, de andere bevindt zich op een voor zon en wind beschutte plaats in de achtertuin (zie voor meer informatie paragraaf 3.2.2). Dit is een interessante mogelijkheid om de verschillen in het UHI tussen deze twee typen locaties in de stad te verkennen. We hebben daarom het UHI in beide meetreeksen vergeleken. Hierbij was het meest interessante verschil in gemeten UHI zichtbaar in het verloop van het UHI over de dag. Figuur 4.8 geeft dit verloop voor de beide meetlocaties.

Gedurende het grootste deel van de dag zijn de verschillen zeer klein, maar 's ochtends is er een opvallend verschil. Vanaf rond zonsopkomst tot het begin van de middag is het in de tuin gemiddeld

tot ongeveer een halve graad koeler dan op het dak. Een mogelijke verklaring is dat de bebouwing en vegetatie in tuinen bij een lage zonnestand veel schaduw geven, waardoor het op deze locaties 's ochtends wat koeler blijft dan op grotere hoogte, waar de zon eerder oppervlakken kan beschijnen. Mogelijk nog geholpen door haar hogere dichtheid, zou relatief koude lucht hierdoor op dit soort plekken in de *urban canyon* nog tot enige tijd na zonsopkomst 'blijven hangen', terwijl het op hogere niveaus al opwarmt. Uit Figuur 4.8 blijkt zelfs dat het in de stad op tuinniveau rond zonsopkomst enige tijd behoorlijk koeler is dan in het buitengebied (een 'negatief UHI'). Ook dit is niet onlogisch, omdat ook in het buitengebied het oppervlak rondom het weerstation wat eerder door de zon wordt beschenen (een effect eerder genoemd door o.a. McPherson (1994)). Brandsma (2009) vindt een vergelijkbaar effect, bij vergelijking tussen metingen van een sensor in een open landschap, met metingen van een nabijgelegen sensor op een schaduwrijke, meer beschutte plek. Het idee uitgesproken door Oke (2006) dat er rond dakniveau een verticale 'sprong' is in temperatuurklimaat, wordt dus door deze metingen bevestigd. Dit is in ons geval echter alleen overdag zo, gedurende een aantal uren na zonsopkomst. Ook lijkt deze sprong in dit geval niet veroorzaakt door de thermodynamische eigenschappen van het dakoppervlak, zoals in Oke (2006) voorgesteld, maar (mogelijk) door beschaduwing in de *urban canyon*.

Over bovenstaand effect is weinig te vinden in de wetenschappelijke literatuur. Verticale profielen boven de stad zijn meestal onderzocht vanuit een mesoschaalperspectief, waarbij wordt gekeken naar het verticale profiel door de hele grenslaag (zie bijvoorbeeld de literatuur genoemd in Garstang *et al.* (1975)), en niet zozeer op microschaal. Dit soort effecten moet daarom nog beter worden onderzocht, door middel van meer waarnemingen op meer locaties, en/of numerieke modellen.

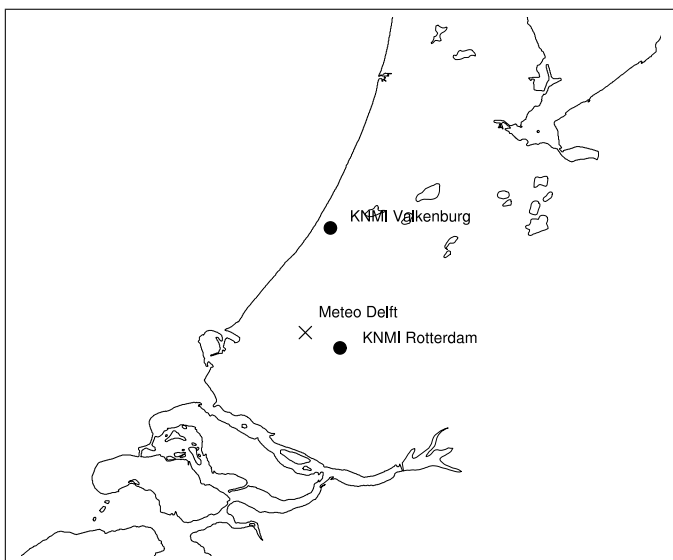


Figuur 4.8: Gemiddeld verloop van het UHI door de dag heen, op een locatie in de tuin en een locatie op het dak, rondom hetzelfde woonhuis in Capelle aan de IJssel.

4.6 Meteo Delft: stadsstation op 33 m hoogte

Het weeramateurstation *Meteo Delft* is gelegen nabij het centrum van Delft bovenop een toren op 33 m hoogte. De temperatuurwaarnemingen op dit station zijn interessant omdat het station zich rond of boven de *blending height* bevindt (zie paragraaf 2.1.2 en paragraaf 3.2.3). Boven de *blending height* is het mogelijk om een stadsklimaat te meten dat niet of weinig is beïnvloed door microschaaleffecten (Oke, 2006), terwijl deze invloeden voor de overige onderzochte stations niet op voorhand zijn uit te sluiten. Deze bevinden zich immers in de *urban canopy layer*, waar microschaaleffecten veroorzaakt door individuele objecten de metingen kunnen beïnvloeden.

Vergeleken met de rest van de onderzochte weeramateurstations bevindt Meteo Delft zich dicht bij zee (ongeveer 12 km). Het dichtstbijzijnde KNMI-station, Rotterdam, is niet representatief voor het achtergrondklimaat van Delft, omdat het zich een eind verder van de kust bevindt (20 km). Om het achtergrondklimaat van Delft toch te benaderen, is daarom het gemiddelde genomen van de temperatuur gemeten op de KNMI-stations Rotterdam en Valkenburg (4 km van de kust). Loodrecht op de kust gezien ligt Delft ongeveer midden tussen deze twee stations in. Figuur 4.9 toont de locaties van deze drie stations. In situaties met veel wind is het UHI op Meteo Delft bepaald volgens deze methode ongeveer 0.3°C , vergelijkbaar met dat op de overige stations besproken in het voorgaande, wat aangeeft dat door middel van deze middeling over twee stations het achtergrondklimaat van Delft waarschijnlijk redelijk wordt benaderd.



Figuur 4.9: Kustlijn van Nederland, met locaties van KNMI-stations Valkenburg en Rotterdam, en weeramateurstation Meteo Delft (afstand tot de kust respectievelijk 4 km, 20 km en 12 km).

Station Meteo Delft was in de zomer van 2010 gemiddeld $0,9^{\circ}\text{C}$ warmer dan het buitengebied. Deze intensiteit van het UHI is vergelijkbaar met die op de andere stedelijke weeramateurstations, zie Tabel 4.2. Figuur 4.10 toont het verloop van het stadsklimaat bij Meteo Delft in de zomer van 2010, als functie van verschillende variabelen. Deze resultaten kunnen we vergelijken met die in Figuur 4.4 voor alle stedelijke stations, en Figuur 4.5 voor de stations in de regio Rotterdam gemiddeld.

We zien hierbij dat het UHI bij Meteo Delft gemiddeld gesproken alleen 's nachts aanwezig is. Het is dan gemiddeld ongeveer $1,5\text{-}2^{\circ}\text{C}$ warmer dan op het platteland, vergelijkbaar met het UHI op de andere stations. Overdag is het UHI gemiddeld gesproken afwezig. Dit verloop is vergelijkbaar met dat op de andere stations, zij het dat het UHI bij Meteo Delft in de namiddag/avond pas begint toe te nemen, waar dit op de andere stations al eerder op de dag gebeurt. Dit wijst op een sterkere opwarming overdag in de UCL, tussen de gebouwen, wellicht door een gebrek aan wind en verticale menging. Er is echter te weinig literatuur beschikbaar over de verticale structuur van het UHI om hierover uitsluitel te geven.

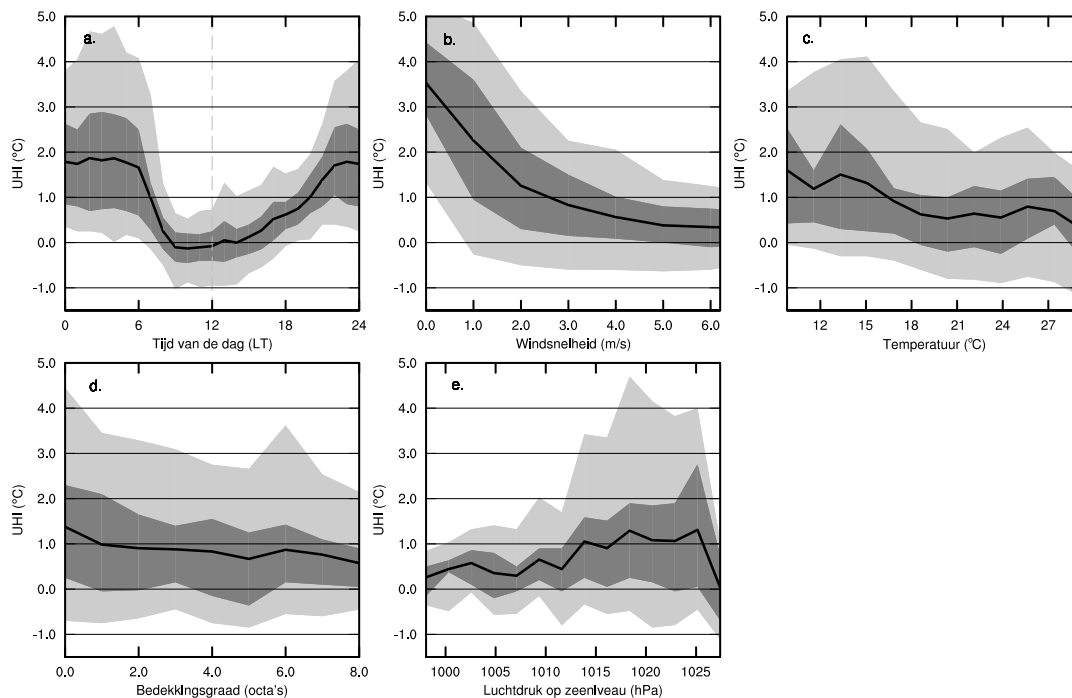
Ook uit het verloop van het UHI als functie van de windsnelheid en de temperatuur blijkt dat het UHI bij Meteo Delft het sterkst is tijdens (rustige) nachtelijke situaties. Het belangrijkste verschil is dat het UHI bij Meteo Delft veel sterker dan bij de andere stations reageert op de windsnelheid. Bij Meteo Delft is er een verschil van ongeveer 3°C tussen het UHI bij windstilte en bij een wind van 4 m/s, ongeveer het dubbele van wat we zien op de andere stations. Dit komt waarschijnlijk door het verticale temperatuurprofiel 's nachts bij weinig wind. Bij weinig wind is er 's nachts weinig verticale menging, waardoor de temperatuur dicht bij het (koude) aardoppervlak (veel) lager kan zijn dan op grotere hoogte. Door

deze 'temperatuurinversie' blijft het in deze situaties op 33 m hoogte warmer dan op 1,5 m hoogte. Dit heeft dus enkel te maken met het verschil in meethoogte tussen Meteo Delft en de andere stations, en is geen onderdeel van het UHI-effect. Dit verticale temperatuurverschil heeft eigenschappen vergelijkbaar met het UHI (sterker 's nachts, sterker bij weinig wind), terwijl er niet voor is te corrigeren. Hierdoor zijn beide effecten niet goed van elkaar te onderscheiden, een belangrijke kanttekening bij de resultaten op basis van dit station.

We zien bij Meteo Delft geen hoger UHI bij hogere temperaturen. Dit stemt overeen met het feit dat het UHI op Meteo Delft overdag dicht bij nul ligt (zie boven). De respons van het UHI op de bedekkingsgraad en de luchtdruk is vergelijkbaar met dat op de andere stations, en bevestigt dat het UHI het sterkst is in rustige, heldere weersituaties.

Samenvattend: het UHI op het station Meteo Delft is qua intensiteit en gedrag in grote lijnen hetzelfde is als op de stations in de *urban canopy layer*. Dit geeft aan dat de toegepaste selectiecriteria voor amateurweerstations in de UCL doeltreffend waren, en dat de conclusies op basis van deze stations het UHI op de lokale schaal karakteriseren. In meer detail is het belangrijkste verschil het veel sterkere verband tussen UHI en windsnelheid bij Meteo Delft. Dit is te verklaren aan de hand van het verticale temperatuurprofiel tijdens nachten met weinig wind. Dit effect maakt dat voorzichtigheid is geboden bij de interpretatie van de resultaten op dit station.

Een ander verschil is het feit dat het UHI bij Meteo Delft overdag dicht bij nul blijft, waar het op alle andere stations gedurende de ochtend en middag toeneemt. Hiervoor is geen goede verklaring gevonden.



Figuur 4.10: Verloop van het UHI in de zomer van 2010 op de locatie Meteo Delft, als functie van de tijd van de dag (a.), en de gemeten windsnelheid (b.), temperatuur (c.), bedekkingsgraad (d.) en luchtdruk (e.). Zwarte lijn: gemiddelde. Grenzen van licht- en donkergekleurde vlakken, van laag naar hoog UHI: 95%, 75%, 25% en 5%-kwantiel van overschrijding.

5. Conclusies en discussiepunten

5.1 Conclusies

Het UHI (stedelijk warmte-eiland) in Nederland is onderzocht aan de hand van automatische temperatuurwaarnemingen uit het jaar 2010, afkomstig van weerstations geïnstalleerd en beheerd door weeramateurs. Na een selectie op basis van metadata, met toepassing van verschillende objectieve criteria voor de kwaliteit en de beschikbaarheid van de gegevens, bleven 20 stations over, in landelijk en in verschillende mate verstedelijkt gebied. Het UHI, gedefiniëerd als het verschil in temperatuur gemeten op een weeramateurstation en het dichtstbijzijnde landelijke KNMI-station, is onderzocht door middel van verschillende analyses. Een samenvatting van de conclusies:

- Er is een significant positief verband gevonden tussen het gemiddelde UHI in de zomer en de bevolkingsdichtheid in de buurt waarin het station is geplaatst. Hierbij is het UHI nagenoeg afwezig bij een bevolkingsdichtheid van 0, en neemt het UHI bij stijgende bevolkingsdichtheid toe met ongeveer 0,11°C per 1000 inwoners per km². Ook voor het maximale UHI tijdens de zomer is een positief verband gevonden met de bevolkingsdichtheid. Tijdens de nachten in een periode met warm weer namen het gemiddelde en maximale UHI nog sterker toe met de bevolkingsdichtheid.
- De stations met een aanzienlijk UHI (zomergemiddeld 0,5°C of hoger, samenvallend met een bevolkingsdichtheid van 4000 inwoners per km² of meer) zijn nader onderzocht als 'stedelijke' stations. Op deze stations is het gemiddelde UHI in de zomer 0,6-1,1°C (gemiddeld 0,9°C). Tijdens de nachten in een periode met warm weer stijgt dit tot 1,2-1,8°C (gemiddeld 1,5°C). Het hoogst gemeten UHI in de zomer ligt op de meeste stations rond 5 à 6°C.
- Op alle zes onderzochte stations is het UHI in de zomer 's nachts sterker dan overdag. Altijd is even na zonsopkomst een 'dip' zichtbaar in het gemiddelde UHI tot ongeveer 0°C, waarna het UHI gedurende de rest van de ochtend en middag toeneemt, en 's nachts gemiddeld min of meer stabiel blijft op 1,0-1,5°C. Uit analyse van de afhankelijkheid van het UHI van de windsnelheid, de temperatuur, de bedekkingsgraad en de luchtdruk blijkt dat in de zomer het UHI het sterkst is bij rustige omstandigheden, met helder weer en weinig wind. Dit verband is 's nachts sterker dan overdag.
- Er is een sterke jaarlijkse gang gevonden in het UHI. Op de weeramateurstations in stedelijk gebied is het UHI 's zomers het sterkst, terwijl het UHI 's winters gemiddeld ongeveer 0 is. In de lente en de herfst is het UHI ongeveer half zo sterk als in de zomer.
- Een parallelle reeks van metingen in de tuin en op het dak, rondom één woonhuis, is afzonderlijk geanalyseerd. 's Middags en 's nachts zijn de verschillen tussen deze twee meetlocaties gering. In de ochtend is er een duidelijk verschil: het is dan in de tuin koeler dan op het dak. Waarschijnlijk is dit veroorzaakt doordat locaties in tuinen bij een lage zonnestand meer beschaduwde zijn, en hierdoor 's ochtends minder snel opwarmen.
- Op alle onderzochte stedelijke weeramateurstations is het UHI vergelijkbaar in intensiteit en variatie in de tijd en als functie van weersomstandigheden. Ook is het gedrag van het UHI fysisch goed begrijpbaar en in overeenstemming met wetenschappelijke literatuur. Dit geeft aan dat de gebruikte metingen waarschijnlijk weinig zijn beïnvloed door kleinschalige effecten op individuele stations, en dat de toegepaste selectie van stations op basis van metadata effectief is geweest. Deze uitspraak wordt bevestigd door een aanvullende analyse van de eigenschappen van het UHI op een stedelijk weeramateurstation op 33 m hoogte, waar het UHI zich in grote lijnen vergelijkbaar gedraagt, terwijl een station op deze hoogte waarschijnlijk minder dan de stations op lager niveau door kleinschalige effecten is beïnvloed. De verticale opbouw van de atmosfeer tijdens rustige nachten maakt echter dat voorzichtigheid is geboden bij de interpretatie van de metingen op dit station.

-
- De conclusies voor de stedelijke stations zijn het meest representatief voor locaties in woonwijken, in de nabijheid van woonhuizen. Waarschijnlijk is het UHI in bijvoorbeeld stadscentra en woonwijken met een zeer hoge bevolkingsdichtheid sterker dan uit dit onderzoek blijkt.

5.2 Discussiepunten

Omdat de resultaten tussen de verschillende meetlocaties consistent zijn, fysisch goed te begrijpen en in overeenstemming met de wetenschappelijke literatuur, geeft dit onderzoek een goede eerste indicatie van de sterkte en het gedrag van het UHI in Nederlandse steden. Het gebrek aan controle over de meetomstandigheden op de weeramateurstations maakt echter dat we voorzichtig moeten zijn met vergaande conclusies. Ook is één jaar aan metingen te weinig voor een betrouwbare, gedetailleerde klimatologie.

De gebruikte weeramateurstations bevinden zich voornamelijk in woonwijken. Het UHI ligt daardoor in stadscentra waarschijnlijk wat hoger dan uit dit onderzoek blijkt. Verder kan het UHI op een aantal van de weeramateurstations nog onderschat zijn doordat de temperatuur op sommige KNMI-stations die zijn gebruikt als referentie voor het buitengebied (zoals door Brandsma et al. (2003) aangetoond voor De Bilt), ook licht door de stad is beïnvloed.

Het is belangrijk om dit onderzoek niet te zien als op zichzelf staand, maar binnen de context van ander (recent) werk naar het stadsklimaat in Nederlandse steden. Van Hove et al. (2010) geeft een overzicht van voor de Nederlandse situatie relevante, recente wetenschappelijke literatuur naar het UHI. Verder bevat het analyses van temperatuurdoorsnedes door Rotterdam en Arnhem, gemeten met een bakfiets. Ook zijn in-situ-metingen van professionele weerstations gebruikt. Dit geeft interessante informatie over de ruimtelijke variatie van het (zomerse) UHI. Brandsma (2010) heeft met een vergelijkbaar mobiel weerstation temperatuurdoorsnedes gemaakt van de stad Utrecht. Duyzer et al. (2010) bevat veel informatie over de ruimtelijke verdeling van oppervlaktetemperaturen in steden, gemeten in de regio Rotterdam en Haaglanden door middel van satellieten. Voorzichtigheid is echter geboden bij het vertalen van deze oppervlaktetemperaturen naar het UHI op leefniveau.

Op basis van dit en bovengenoemd recent onderzoek is een goede algemene eerste indruk te krijgen van de sterkte en het gedrag van het UHI in Nederlandse steden. Meer gedetailleerd werk, op basis van langere meetreeksen van (professionele) weerstations, en aan de hand van moderne mesoschaalweermodellen zoals HARMONIE en WRF-ARW, moet in de nabije toekomst onze kennis vergroten. Zo zal meer bekend worden over de ruimtelijke variatie van het UHI, en de afhankelijkheid van het UHI van zaken als gebouweigenschappen en ruimtelijke indeling, en de respons van het UHI op mitigatiemaatregelen.

Literatuurlijst

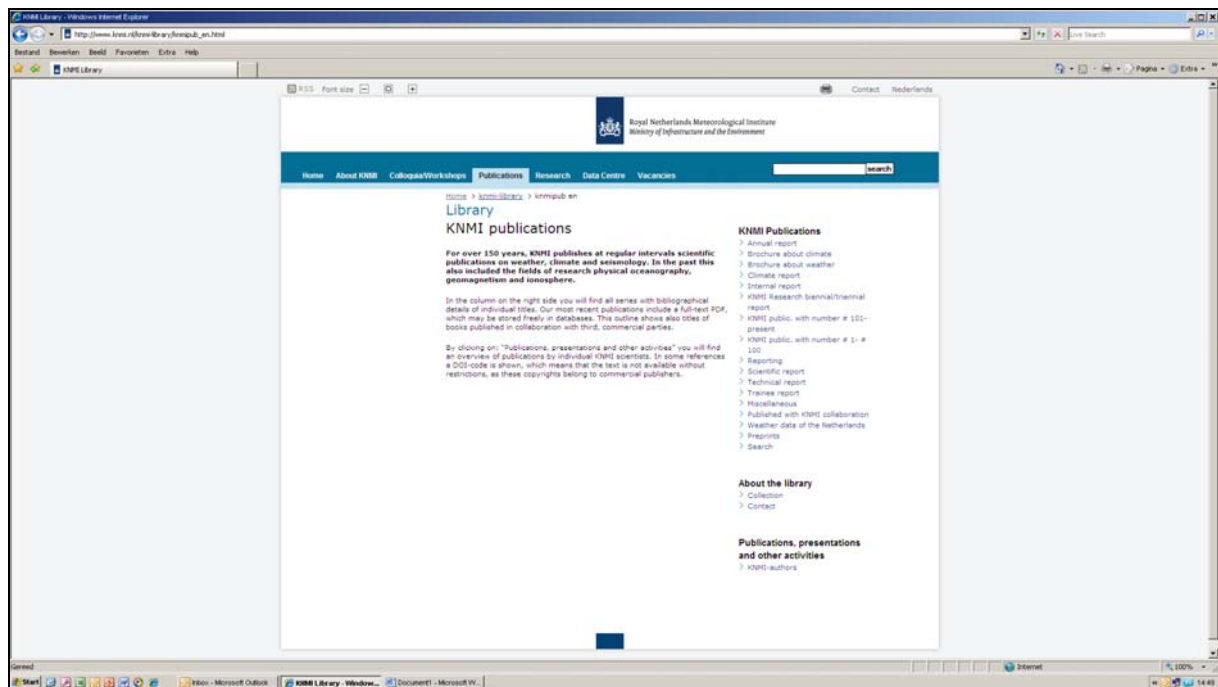
- Arnfield A. 2003. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology* **23**: 1–26.
- Brandsma T. 2009. Understanding inter-site temperature differences at the KNMI terrain in De Bilt (Netherlands). In: *Joint 6th Seminar for homogenization and quality control in climatological databases and the COST-HOME meeting, 26/5/2008-30/5/2008*. Hungarian Met Office (Ed).
- Brandsma T. 2010. Warmte-eilandeffect van de stad Utrecht. *Zenit* : 500–505.
- Brandsma T, Können G, Wessels H. 2003. Empirical estimation of the effect of urban temperature advection on the temperature series of De Bilt (the Netherlands). *International Journal of Climatology* **23**: 829–845.
- CBS. 2010. Website CBS in uw buurt. <http://www.cbsinuwbuurt.nl>.
- Conrads LA. 1975. Observations of meteorological urban effects. The heat island of Utrecht. PhD thesis, University of Utrecht.
- Eigenberg RA, Nienaber JA, Brown-Brandl TM. 2003. Development of a livestock safety monitor for cattle. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* : Paper number 032 338.
- Fortuniak K, Klysiak K, Wibig J. 2006. Urban-rural contrasts of meteorological parameters in Lodz. *Theoretical Applied Climatology* **84**: 91–101.
- Garstang M, Tyson PD, Emmitt GD. 1975. The structure of heat islands. *Reviews of Geophysics and Space Physics* **13-1**: 139–165.
- Giridharan R, Ganesan S. 2004. Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. *Energy and Buildings* **36**: 525–534.
- Grimmond CSB, Oke TR. 1999. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology* **38**: 1262–1292.
- Groenland R, Hemink J, Kuiper W, Groen G. 2010. Het noodweer van 14 juli 2010 in Vethuizen en Neerkant e.o. - Meteorologisch onderzoek en achtergronden. KNMI-rapport 2010-228.
- Hamdi R, Schayes G. 2008. Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics. *International Journal of Climatology* **28**: 973–982.
- Heijboer D, Nellestijn J. 2002. *Klimaatatlas van Nederland*. Elmar B.V.: Rijswijk, p. 80.
- Johnson G, Oke T, Lyons T, Steyn D, Watson I, Voogt J. 1991. Simulation of surface urban heat islands in the 'IDEAL' conditions at night part 1: Theory and tests against field data. *Boundary-Layer Meteorology* **56-3**: 275–294.
- Klok I, Ten Broeke H, Van Harmelen T, Verhagen H, Kok H, Zwart S. 2010. Ruimtelijke verdeling en mogelijke oorzaken van het hitte-eiland-effect. Technisch Rapport TNO-034-UT-2010-01229-RPT-ML, TNO Bouw en Ondergrond.
- KNMI. 2009. Klimaatschetsboek Nederland: het huidige en toekomstige klimaat. Technisch Rapport 223, KNMI.
- KNMI. 2010. Handboek Waarnemingen. <http://www.knmi.nl/samenw/hawa>.
- Lowry WP. 1977. Empirical estimation of urban effects on climate: A problem analysis. *Journal of Applied Meteorology* **16-2**: 129–135.

-
- McLaren C, Null J, Quinn J. 2005. Heat stress from enclosed vehicles: Moderate ambient temperatures cause significant temperature rise in enclosed vehicles. *Pediatrics* **116-1**: e109–e112.
- McPherson EG. 1994. *Sustainable cities: preserving and restoring biodiversity*, hfst. Cooling urban heat islands with sustainable landscapes. University of Massachusetts Press: Amherst, MA (USA).
- Morris CJG, Simmonds I, Plummer N. 2001. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *Journal of Applied Meteorology* **40**: 169–182.
- Nakamura R, Mahrt L. 2005. Air temperature measurement errors in naturally ventilated radiation shields. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **22**: 1046–1058.
- Nakamura Y, Oke T. 1988. Wind, temperature and stability conditions in an E-W orientied urban canyon. *Atmospheric Environment* : 2691–2700.
- Oke T. 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* **7**: 769–779.
- Oke TR. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **108**: 1–24.
- Oke TR. 1984. Methods in urban climatology. In: *Applied Climatology*, jaarg. 14, Zürcher Geografische Schriften, pp. 19–29.
- Oke TR. 1987. *Boundary layer climates*. Routledge Taylor and Francis Group: London, New York, pp. 288–302.
- Oke TR. 1988. The urban energy balance. *Progress in Physical Geography* **12-4**: 471–508.
- Oke TR. 2006. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. WMO Instruments and Observing Methods Report No. 1250.
- Park HS. 1986. Features of the urban heat island in Seoul and surrounding cities. *Atmospheric Environment* **20**: 1859–1866.
- Ronda R, Steeneveld GJ, Van Hove B. 2010. Modelsimulaties van het stadsklimaat van Rotterdam. Vakgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit, Wageningen UR.
- Sluijter R. 2010a. Maandoverzicht Augustus 2010: Zeer nat, somber en aan de koele kant. http://www.knmi.nl/klimatologie/maand_en_seizoensoverzichten/seizoen/zom10.html.
- Sluijter R. 2010b. Seizoensoverzicht Zomer 2010 (juni, juli, augustus): Warm en zonnig maar ook nat. http://www.knmi.nl/klimatologie/maand_en_seizoensoverzichten/maand/aug10.html.
- Van der Meulen JP, Brandsma T. 2008. Thermometer screen intercomparison in De Bilt (The Netherlands), Part I: Understanding the weather-dependent temperature differences. *International Journal of Climatology* **28-3**: 371–387.
- Van Hove B, Elbers J, Jacobs C, Heusinkveld B, Jans W. 2010a. Het stadsklimaat in Rotterdam: Een eerste analyse van de meetgegevens van het meteorologische meetnet. Vakgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit, Wageningen UR.
- Van Hove B, Steeneveld GJ, Jacobs C, Heusinkveld B, Elbers J, Ter Maat H, Moors E, Holtslag B. 2010b. Quantifying the urban heat island intensity - Literature review of observational studies exploring the UHI intensity in the Netherlands. Vakgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit, Wageningen UR.
- Vandentorren, Suzan F, Medina S, Pascal M, Maulpoix A, Cohen JC, Ledrans M. 2004. Mortality in 13 French cities during the August 2003 heat wave. *American Journal of Public Health* **94**: 1518–1520.
- Watanabe S, Sano T, Kamada H, Ezura H. 2006. Reducing gene flow from pollen dispersal of genetically modified plants in special screened greenhouses. *Plant Biotechnology* **23**: 129–135.

-
- Watkins R, Palmer J, Kolokotroni M, Littlefair P. 2002. The London heat island: results from summertime monitoring. *Building Services Engineering Research & Technology* **23,2**: 97–106.
- Wiacek A, Taylor JR, Strong K, Saari R, Kerzenmacher TE. 2007. Ground-based solar absorption FTIR spectroscopy: Characterization of retrievals and first results from a novel optical design instrument at a new NDACC complementary station. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **24**: 432–448.
- Wilby RL. 2003. Past and projected trends in London's urban heat island. *Weather* **58**: 251–260.

A complete list of all KNMI -publications (1854 – present) can be found on our website

www.knmi.nl/knmi-library/knmipub_en.html



The most recent reports are available as a PDF on this site.

