

Warmte-eilandeffect van de stad Utrecht



Foto: Eclipse Ballooning, www.ec.nl

Theo Brandsma

Theo Brandsma is wetenschappelijk onderzoeker en projectleider bij het KNMI. Hij houdt zich vooral bezig met het ontsluiten en analyseren van historische klimaatwaarnemingen.

De meeste steden in de wereld zijn warmer dan het omliggende platteland. Ze vormen daardoor een warmte-eiland in het landschap, bekend als Urban Heat Island (UHI). Het verschil tussen de temperatuur in de stad en op het platteland neemt daarbij af van

het centrum van de stad naar de buitenwijken en is vooral afhankelijk van de omvang en geometrie van de stad, tijdstip van dag en de weersomstandigheden. De groei van steden in de afgelopen honderd jaar en de daarmee samenhangende versterking van het UHI-effect wordt regelmatig aangevoerd als een van de oorzaken van de waargenomen opwarming van de aarde. Het KNMI heeft daarom mobiele metingen verricht in de stad Utrecht. De metingen geven inzicht in het UHI-fenomeen en geven een

indicatie van het effect van het warmte-eiland van de stad Utrecht op de temperatuur in De Bilt.

Warmte-eilanden zijn 's nachts het duidelijkst zichtbaar. De temperatuurverschillen met het omliggende platteland kunnen dan oplopen tot bijvoorbeeld 4°C voor een stad van 10.000 inwoners of 7°C voor een stad van 200.000 inwoners. Dit zijn echter de grootste verschillen voor steden van die omvang. Dergelijke verschillen treden alleen op tijdens

heldere, windstille nachten. In de praktijk komen die omstandigheden niet vaak voor. Gemiddeld is het verschil dan ook bijna een factor 10 kleiner dan het maximale verschil.

Er zijn verschillende oorzaken voor het ontstaan van UHIs. Eén van de belangrijkste lijkt de geometrie van de stad te zijn, vaak uitgedrukt in de Sky-View-Factor (SVF) of in de verhouding hoogte (H) van de bebouwing en breedte (B) van de straten. 'De SVF geeft voor een bepaalde locatie de fractie van de hemel die zichtbaar is wanneer je met je rug op de grond ligt. Door meervoudige reflecties zorgt een kleine SVF (grote H/B-verhouding), vergeleken met een grote SVF voor een sterkere absorptie van inkomende straling en kan de uitgaande infrarode straling niet goed uitstralen. Een kleine SVF in steden leidt ook tot een afname van turbulent transport (grotere beschutting). Tezamen met het stralingseffect zorgt dit ervoor dat de stad haar warmte niet goed kwijt kan. Grote Noord-Amerikaanse steden met dicht opeengepakte hoge wolkenkrabbers, hebben een kleinere SVF en daardoor een grotere maximale UHI dan Europese steden met een vergelijkbaar inwonertal.

Een tweede oorzaak voor het ontstaan van warmte-eilanden in steden is de beperkte verdamping. Door het grote percentage verhard oppervlak in steden en de snelle afvoer van regenwater wordt overdag minder energie omgezet in verdamping dan op het platteland. In plaats daarvan wordt meer energie opgeslagen in materialen en constructies. Deze energie komt 's nachts vertraagd weer vrij. Goed van water voorziene parken in steden verdampen juist weer meer dan hun omgeving en vormen de koele plekken in de stad.

Antropogene warmtebronnen (verkeer, verwarming van huizen en gebouwen) kunnen vooral in de winter een bijdrage leveren aan het ontstaan van UHIs. Tot slot speelt ook luchtvervuiling een



Foto 1: het 14 kilometer lange dwarsprofiel Nieuwegein-Utrecht-De Bilt.

rol. Luchtvervuiling zorgt voor absorptie en reflectie van de uitgaande infrarode straling en voor vermindering van de inkomende straling. Met name 's nachts draagt het bij aan de opwarming van steden.

Mobiele metingen

Om meer inzicht te krijgen in het effect van verstedelijking op de temperatuur is het nodig metingen in steden te verrichten. Een groot probleem hierbij is het heterogene karakter van de stedelijke omgeving. Dit brengt met zich mee dat het bijna onmogelijk is om meetlocaties te vinden die representatief zijn voor een groter gebied, bijvoorbeeld voor een straat of wijk. Voor veel grote steden in de wereld worden om die reden mobiele metingen verricht. Mobiele metingen geven een min of meer continue beeld van de temperatuur over een stad. Door Conrads (1975) zijn voor de stad Utrecht al eerder mobiele

metingen verricht. Die vonden plaats in de winter van 1969/70 gedurende een periode van 90 dagen. Met behulp van instrumenten, bevestigd boven op een Volkswagenbusje, werd langs twee dwarsprofielen de luchttemperatuur gemeten: een oost-westprofiel en een noord-zuidprofiel. Beide profielen werden twee keer per dag gereden; de eerste rit startte om 7:30 uur 's ochtends en de tweede om 13:00 uur 's middags. Elke rit begon met het oost-westprofiel gevolgd door het noord-zuidprofiel. Het rijden van de twee profielen nam per rit ongeveer anderhalf uur in beslag. Voor de metingen in dit artikel heeft de auteur in de periode maart 2006 – januari 2009 mobiele metingen verricht op zijn fiets voor het 14 kilometer lange dwarsprofiel Nieuwegein-Utrecht-De Bilt (zie figuur 1). De metingen kunnen gezien worden als een aanvulling op de metingen van Conrads.



Foto 2

Voor het meten is gebruik gemaakt van een Elpro-datalogger (Ecolog TH1) gecombineerd met een Hygroclip-sensor (temperatuur en relatieve vochtigheid) en een snel reagerende temperatuursensor. De sensorwaarden werden voor dit experiment iedere seconde gelogd. De sensoren zijn ingebouwd in een schotelhutje en met een speciaal daarvoor gemaakte constructie op de fiets geplaatst, inclusief de datalogger (zie foto). De sensoren bevonden zich op 1.14 meter hoogte boven het wegdek en zijn voor en na het experiment geijkt in het KNMI-ijklab. De verschillen bleken verwaarloosbaar. Met een Garmin-fiets GPS (Edge 205) werd iedere seconde de locatie van de meting bepaald.

De metingen vonden plaats tijdens woonwerkverkeer 's ochtends vroeg en in de namiddag. De ochtendmetingen (in het geheel voor zonsopgang) zijn het belangrijkste omdat dan in principe de temperatuurverschillen tussen stad en platteland het grootst zijn. Met een totale fietstijd van ongeveer 40 minuten ligt het vroegste tijdstip van vertrek op 04:40 uur in de maand juni. In totaal zijn 106 profielen beschikbaar voor de ochtendmetingen en 77 voor de namiddag.

Methode

De metingen van de datalogger en de GPS zijn achteraf samengevoegd. Vervolgens is, aan de hand van de GPS-metingen, voor zowel het ochtendprofiel als het middagprofiel, een representatieve route bepaald met op iedere 10 meter een vast punt. Het verschil tussen beide routes is klein en is het gevolg van het rijden aan de juiste kant van de straat. De metingen (gemiddeld 1.7 metingen per 10 meter) zijn daarna zo gesampled dat op ieder punt van de route een meting terecht komt. Op deze manier zijn de profielen onderling vergelijkbaar. De operationele waarnemingen van windrichting, snelheid en bewolking op het KNMI-terrein in De Bilt zijn gebruikt om de invloed van de weersomstandigheden op de profielen te bepalen. Tijdens omstandigheden met veel regen werd niet gemeten. De temperatuurprofielen zijn gecorrigeerd voor de dagelijkse gang met behulp van de gelijktijdige temperatuurmetingen op de drie nabij gelegen KNMI-stations Cabauw, Herwijnen en Deelen. Elk van deze gemiddelde reeksen is daarna gereduceerd met het ritgemiddelde. Het resultaat daarvan is vervolgens afgetrokken van de met de fiets gemeten profielen.

Gemiddelde en extreme temperatuurprofielen

De metingen van de datalogger, de GPS en de instrumenten op het KNMI-terrein bieden de mogelijkheid onderzoek te doen naar de vorm en grootte van de temperatuurprofielen. Zoals verwacht laten de gemiddelde profielen in figuur 3 voor de ochtendmetingen (voor zonsopkomst) een duidelijker verschil zien tussen het centrum van Utrecht en het omringende gebied dan de metingen in de namiddag. Gemiddeld lopen de verschillen tussen het centrum van Utrecht en het KNMI in De Bilt op tot ongeveer 1.5°C voor ochtendprofielen en ongeveer 0.6°C voor de namiddagprofielen. De vorm van de gemiddelde temperatuurprofielen verandert niet zichtbaar bij opsplitsing in zomer- en winterhalfjaar (niet in de figuur opgenomen). De hoogste temperaturen werden gemeten tussen Vredenburg en het Neude (foto 4) tussen

kilometerpunten 9 en 9½. In de rest van de tekst gaan we vooral in op de ochtendmetingen.

De maximale temperatuurverschillen tussen het centrum van Utrecht en het omringende platteland zijn veel groter dan de gemiddelde verschillen. Hier definiëren we het maximale temperatuurverschil UHI_{max} voor een bepaald temperatuurprofiel, als het verschil tussen de mediaan van de twintig hoogste temperaturen en de mediaan van de twintig laagste temperaturen langs het profiel. In de praktijk komt dit er op neer dat we de warmste 200 meter van de route vergelijken met de koudste 200 meter. Door het gebruik van de mediaan filteren we toevallig optredende spikes uit (bijvoorbeeld door het op korte afstand passeren van een bus). Figuur 5 geeft de drie dagen met de grootste UHI_{max} . Voor 13 en 15 maart 2007 en 15 februari 2008 was UHI_{max} respectievelijk 5.1, 5.2 en 5.4°C. Dit is kleiner dan de ongeveer 6.5°C die we op basis van de literatuur mogen verwachten voor steden met een omvang van Utrecht. We hebben in dit experiment echter te maken met een beperkte set van 106 profielen voor één vastgestelde route. Voor alle drie profielen geldt dat de gemiddelde windsnelheid tijdens de rit (in De Bilt op 1.5 meter hoogte) kleiner was dan 0.4 meter per seconde. Op 13 maart 2007 en 12 februari 2008 was het onbewolkt tijdens de rit, terwijl op 15 maart 2007 de bewolking in De Bilt tijdens de rit veranderde van bewolkt tot onbewolkt. De windrichting was noordwest op 13 maart 2007, zuidoost op 15 maart 2007 en noordoost op 12 februari 2008.

Effect van windrichting op de temperatuurprofielen

Horizontaal transport (advectie) van stadswarmte kan ervoor zorgen dat de vorm van de temperatuurprofielen afhangt van de windrichting. Om dit effect te onderzoeken hebben we de ochtendprofielen opgesplitst in vier windrichtingsklassen: noord, oost, zuid en west. Figuur 6 geeft de gemiddelde profielen voor deze klassen. Het blijkt dat profielen voor de windrichtingen west en zuid een vergelijkbare vorm hebben en ook de profielen voor oost en noord. Opvallend is

dat voor de windrichtingen west en zuid de temperatuur buiten de stad Utrecht (tussen kilometerpunten 11 en 14) blijft dalen, terwijl voor de richtingen noord en oost de temperatuurdaling stopt rond kilometerpunt 12. Verder valt op dat de temperatuurverschillen tussen het eerste stuk in Nieuwegein (tussen kilometerpunten 0 en 2) en het laatste stuk bij De Bilt (tussen kilometer 13 en 14) voor west- en zuidrichtingen ongeveer 0.7°C kleiner zijn dan voor de noord- en oostrichtingen. In het geval van westelijke wind kunnen deze aspecten een indicatie zijn van de advection van stadswarmte van Utrecht naar De Bilt.

Advection van stadswarmte van Utrecht naar het KNMI-terrein in De Bilt

Voor een nadere analyse van de advection van stadswarmte van Utrecht naar het KNMI in De Bilt, kijken we naar het gemiddelde profiel voor westelijke wind (figuur 6). In het geval van advection verwachten we voor het eerste stuk in Nieuwegein (tussen kilometerpunt 0 en 2) een lagere temperatuur dan voor het laatste stuk bij De Bilt (tussen kilometer 13 en 14). Dit verschil blijkt verwaarloosbaar klein. Het eerste stuk van de route wordt echter beïnvloed door stadswarmte van Nieuwegein, hoewel de strijklengte over de bebouwing voor westelijke wind slechts ongeveer 700 meter bedraagt. Om een schatting van dit effect te kunnen maken, hebben we 51 keer het verschil gemeten tussen de gemiddelde temperatuur op de eerste 330 meter van de route en een stuk landweg van 240 meter juist ten westen van Nieuwegein (met in westelijke richting alleen weilanden). De metingen vonden plaats tussen zonsondergang en zonsopkomst in de periode van 12 augustus tot 12 september 2009. Voor westenwind (13 van de 51 waarnemingen) is de temperatuur 's nachts op het eerste deel van de route ongeveer 0.5°C hoger dan de temperatuur stroomopwaarts buiten de stad. Deze waarde is mogelijk iets te hoog omdat tijdens de waarnemingen de bewolgingsgraad relatief laag was.

Uit de literatuur weten we dat de sterkte van het warmte-eiland redelijk constant is gedurende de

nacht. We gaan er daarom vanuit dat de hier gepresenteerde metingen representatief zijn voor de hele nacht. Als we daarnaast een mogelijke variatie over de seizoenen verwaarlozen, dan is de voorzichtige conclusie dat nachts en voor westelijke wind ($1/3$ van de dagen), advection van stadswarmte van Utrecht zorgt voor een verhoging van de temperatuur op het KNMI-terrein in De Bilt van ongeveer 0.5°C .

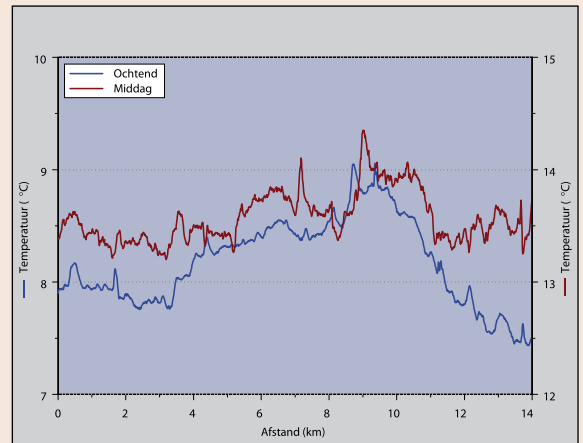
Om dit getal nader te verifiëren hebben we de metingen van het oost-westprofiel van Conrads (1975) opnieuw geanalyseerd. De begin- en eindpunten van dit profiel lagen in (het toen nog) landelijke gebied buiten de stad, met het beginpunt gelegen op 1.3 kilometer ten zuiden van het waarneemterrein van het KNMI en ongeveer 2 kilometer ten oosten van de bebouwde kom van Utrecht en het eindpunt ongeveer 1 kilometer ten westen van de bebouwde kom van Utrecht. Het beginpunt beschouwen we als representatief voor het KNMI-terrein in De Bilt. Voor westenwind bleek het beginpunt 0.4°C warmer dan het eindpunt, voor oostenwind bleek het eindpunt van de route 0.6°C warmer. Hoewel door het geringe aantal waarnemingen de statistische significantie van deze getallen niet hoog is, onderbouwen ze wel de 0.5°C uit de voorgaande alinea.

Effect windsnelheid en bewolking op de maximale temperatuurverschillen

De maximale temperatuurverschillen (UHI_{max}) tussen het centrum van Utrecht en het omringende platteland zijn afhankelijk van windsnelheid en bewolking. Figuur 7 laat het verband zien tussen UHI_{max} en windsnelheid voor twee bewolgingscategorieën. De figuur laat duidelijk zien dat de grootste verschillen optreden bij lage windsnelheden (< 1 meter per seconde) en weinig bewolking.

Gemiddelde dampdichtheidprofielen

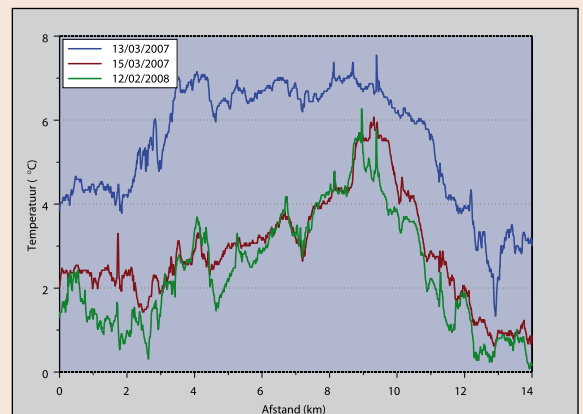
Het is interessant om te weten of er verschillen zijn tussen de hoeveelheid vocht in de stad en daarbuiten. Daarvoor zijn de



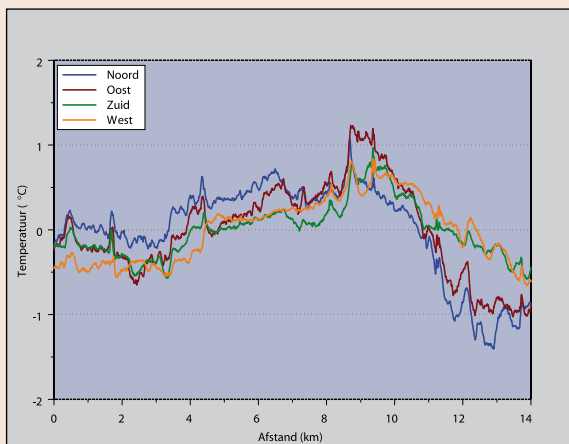
Figuur 3: de gemiddelde profielen voor de ochtendmetingen laten een duidelijker verschil zien tussen het centrum van Utrecht en het omliggende gebied ten opzichte van de middagmetingen.



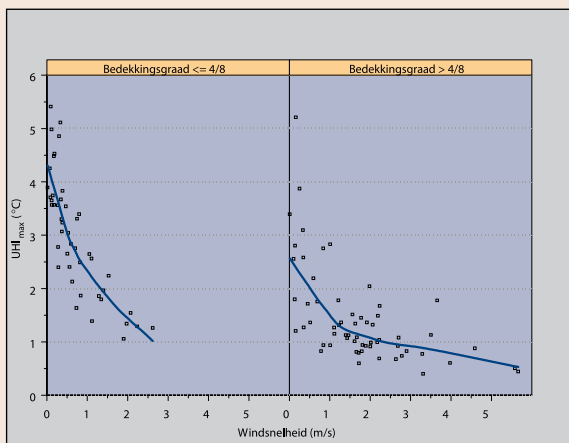
Foto 4: tussen het Neude en Vredenburg werd de hoogste temperatuur gemeten.



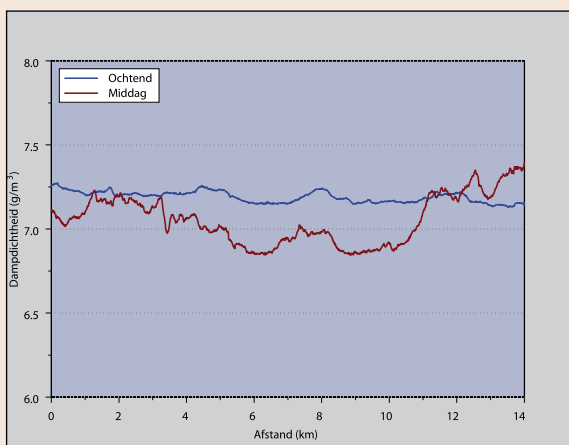
Figuur 5: de drie dagen met de hoogste UHI_{max} .



Figuur 6: de gemiddelde profielen voor vier windrichtingklassen (ieder profiel geeft de afwijking van zijn gemiddelde).



Figuur 7: het verband tussen UHI_{max} en windsnelheid voor twee bewolgingscategorieën.



Figuur 8: de gemiddelde ochtend- en namiddagprofielen voor de dampdichtheid.

relatieve vochtigheid waarnemingen omgerekend naar dampdichtheid. Figuur 8 geeft de gemiddelde ochtend- en namiddagprofielen voor de dampdichtheid. De figuur laat zien dat de gemiddelden van beide profielen dicht bij elkaar liggen, maar dat de vorm verschilt. In het namiddagprofiel is duidelijk zichtbaar dat de stad Utrecht voor een daling zorgt van de hoeveelheid vocht ten opzichte van het omringende gebied, wat waarschijnlijk het gevolg is van de kleinere verdamping in de stad. Zoals we op basis van de literatuur mochten verwachten zijn de verschillen gering.

Discussie en conclusie

Stadsklimaat staat op dit moment in de belangstelling in Nederland. Verschillende projecten zijn of worden opgestart, gericht op het in kaart brengen van het klimaat in steden, het modelleren daarvan en het zo goed mogelijk omgaan met de verschillen tussen stad en platteland. De relatie met klimaatverandering en luchtverontreiniging speelt daarbij ook een belangrijke rol. De hier opgebouwde hoge resolutie-dataset kan dienen als basis voor het toetsen van hypothesen en het valideren van modellen. De metingen laten zien dat er 's nachts belangrijke temperatuurverschillen ($> 5^{\circ}\text{C}$) kunnen optreden tussen de stad Utrecht en het omringende gebied. De temperatuurverschillen kunnen daarbij over korte afstanden sterk variëren. Voor een gegeven stad is de sterkte van het warmte-eiland voor een groot deel afhankelijk van de windsnelheid en de bewolking. We hebben laten zien dat dit ook voor Utrecht geldt.

De huidige bijdrage van advectie van stadswarmte van de stad Utrecht op de temperatuurmetingen van het KNMI in De Bilt hebben we geschat op 0.5°C voor westelijke wind en nachtelijke omstandigheden. Voor een volledige schatting van verstedelijking op de temperatuurtrend in De Bilt, moeten we ook kijken naar de advectie overdag en moeten we eigenlijk ook de beschikking hebben over profielmetingen die De Bilt, Zeist en de Utrechtse Universiteitswijk De Uithof omvatten. Daarnaast moet ook de groei van het stedelijk gebied over de afgelopen eeuw

meegenomen worden.

Brandsma e.a. (2003) schatten de bijdrage van de advectie van stadswarmte op de temperatuurtrend in De Bilt in de 20^{ste} eeuw op $0.10/0.06^{\circ}\text{C}$. Deze schatting is gebaseerd op windrichtingafhankelijke temperatuurverschillen tussen De Bilt en Soesterberg, waarbij Soesterberg als landelijke referentie gebruikt is. De schatting houdt rekening met al het stedelijk gebied rondom het KNMI-terrein in De Bilt en de groei daarvan in de 20^{ste} eeuw. Nadere analyse van de in Brandsma e.a. (2003) gebruikte waarnemingen, laat zien dat aan het eind van de 20ste eeuw, voor nachten met westelijke wind, de bijdrage van advectie van stadswarmte van de stad Utrecht op de temperatuurmetingen van het KNMI in De Bilt 0.35°C bedraagt. Dit is lager dan de hier gevonden 0.5°C . Als we deze 0.5°C schalen met de resultaten in Brandsma e.a. (2003), dan vinden we een bijdrage van de advectie van stadswarmte op de temperatuurtrend in De Bilt over de periode 1901-2008 van ongeveer 0.14°C . Deze op alternatieve wijze afgeleide nieuwe schatting valt binnen de door Brandsma e.a. (2003) gegeven onzekerheidsband. De totale temperatuurtrend in De Bilt over de periode 1901-2008 bedraagt 1.8°C (hier gedefinieerd als het verschil tussen de gemiddelde temperatuur over de laatste en eerste tien jaar van de reeks). Uitgaande van de hier gevonden schatting van 0.14°C , heeft verstedelijking daar ongeveer 8% aan bijgedragen.

Literatuur

1. Brandsma, T., G.P. Können en H.R.A. Wessels, 2003. *Empirical estimation of the effect of urban heat advection on the temperature series of De Bilt (The Netherlands)*. International Journal of Climatology, 23, 829-845.
2. Conrads, L.A., 1975. *Observations of meteorological urban effects: the heat island of Utrecht*. Proefschrift Universiteit van Utrecht, 84 pp.
3. Oke, T.R., 1987. *Boundary layer climates*. Methuen, New York, 435 pp.

De auteur bedankt Janette Bessembinder, Rob van Dorland en Geert Jan van Oldenborgh voor hun commentaar op een eerdere versie van het manuscript.