

Ruimtelijke analyse van het stadsklimaat in Rotterdam

Bert Heusinkveld, Bert van Hove, Cor Jacobs



Dit onderzoekproject werd uitgevoerd in het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat (www.kennisvoorklimaat.nl). Dit onderzoekprogramma wordt medegefinancierd door het Ministerie van VROM.

WUR publicatie, 27 februari 2011

Copyright @ 2011

National Research Programme Knowledge for Climate (KfC)/Kennis voor Klimaat. All rights reserved. Nothing in this publication may be copied, stored in automated databases or published without prior written consent of the National Research Programme Knowledge for Climate/ Kennis voor Klimaat. In agreement with Article 15a of the Dutch Law on authorship is allowed to quote sections of this publication using a clear reference to this publication.

Liability

The National Research Programme Knowledge for Climate and the authors of this publication have exercised due caution in preparing this publication. However, it cannot be expelled that this publication includes mistakes or is incomplete. Any use of the content of this publication is for the own responsibility of the user. The Foundation Knowledge for Climate (Kennis voor Klimaat), its organisation members, the authors of this publication and their organisations cannot be held liable for any damages resulting from the use of this publication.

Inhoudsopgave

Samenvatting

1 Inleiding	1
2 Hittebelasting meten met een mobiel meetplatform	7
3 Metingen en analyse	11
4 Conclusies	20
5 Referenties	22

Samenvatting

Stedelijk gebied is vaak warmer dan het omringende rurale gebied. We noemen dit het stedelijk hitte-eiland effect en wordt veroorzaakt doordat stedelijk gebied meer zonlicht invangt en veel warmte kan opslaan en maar moeilijk weer kan kwijtraken in de avonduren. Om een inzicht te verkrijgen in de opwarming van stedelijk gebied zijn ruimtelijk veel metingen nodig. Een mobiel meetplatform werd toegepast om langs verschillende trajecten de hitte overdag en 's nachts in kaart te brengen. Belangrijkste resultaten uit de eerste verkenningen laten zien dat Rotterdam 's nachts een aanzienlijk stedelijk hitte-eiland effect ontwikkelt gedurende zonnige dagen met weinig wind (verschil luchttemperatuur en buitengebied $>7\text{ }^{\circ}\text{C}$). Overdag was het verschil in luchttemperatuur veel minder groot. 's Ochtends werden zelfs lagere luchttemperaturen gemeten dan in het buitengebied. In de middag bleef de opwarming beperkt tot $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en met name groene wijken blijven dan koeler. Opvallend was dat tijdens het warmste moment van de dag een park zelfs $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ koeler bleek dan het buitengebied. De koelste wijken waren de wat oudere laagbouwwijken met veel groen (zoals Kralingen). Voor het thermisch comfort in de stad kan echter die 2 graden verhoging al leiden tot hitteklachten als er ook in de schaduw geen comfortabele temperaturen te vinden zijn. Het comfort verslechtert verder als er ook geen schaduw plekken te vinden zijn. Tijdens onze meting op 6 augustus 2009 was er sprake van matige hittestress 's middags in de schaduw (luchttemperatuur 32°C). In de zon echter was sprake van extreme hittestress condities als men daar lang zou verblijven. Dit is iets om rekening mee te houden in stedelijk ontwerp (toepassing schaduwelementen op straatniveau) en ook al voor de huidige Nederlandse zomers relevant. Water heeft niet een eenduidig verkoelend of verwarmend effect. Het wordt voor een groot deel bepaald door het temperatuursverschil tussen water en luchttemperatuur. Tijdens metingen op 20-21 juli 2010 bleek dat water overdag wat verkoeling gaf ook al was de watertemperatuur behoorlijk hoog ($26\text{ }^{\circ}\text{C}$), echter al snel na zonsondergang ontstond een verwarmend effect van het water omdat water nog veel langzamer afkoelt dan stedelijk gebied. De additionele verdamping van open water kan verder het thermisch comfort nadelig beïnvloeden. Het omslagpunt waarbij verkoeling overgaat naar verwarming zal dus sterk afhangen van de watertemperatuur. Echter,

tijdens hete zomers wordt dit moment al vroeg en rond zonsondergang bereikt en is nog onderwerp van een vervolgstudie.

1 Inleiding

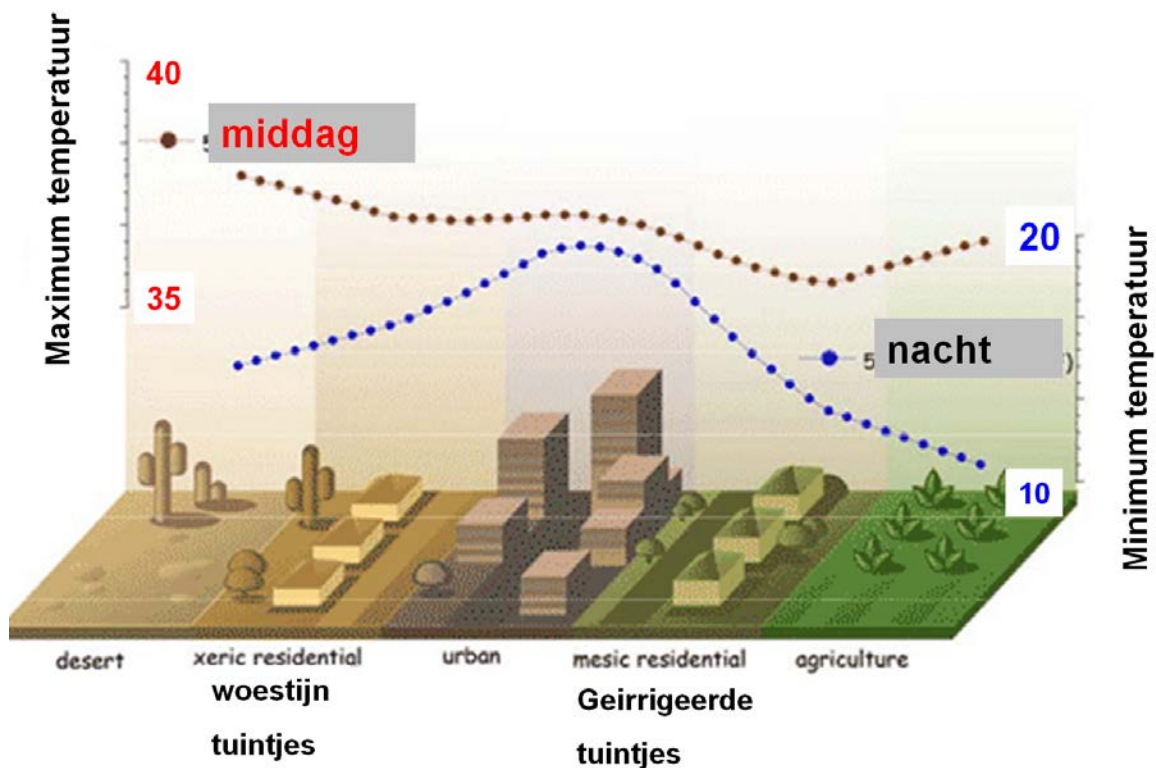
Stedelijk gebied is gemiddeld warmer dan het buitengebied, dit noemen we het stedelijk hitte-eiland effect (SHE). Hiernaar was tot nu toe weinig onderzoek verricht omdat het SHE in ons gematigde maritieme klimaat niet zo belangrijk leek. Recente hittegolven in 2003 en 2006 maakten duidelijk dat ook hitte in de stad een probleem kan zijn. Er zijn een aantal redenen te noemen dat het SHE probleem zal verergeren. Klimaat projecties voor de nabije toekomst laten bijvoorbeeld zien dat we te maken zullen krijgen met meer en heviger hittegolven. Aangezien stedelijk gebied vanwege het SHE een versterkend effect heeft op de temperatuur in de stad is het relevant nader uit te zoeken in hoeverre dit significant is voor Nederland. De motivatie voor dit onderzoek wordt des te belangrijker als we kijken naar de al maar groeiende verstedelijking. Op dit moment is ongeveer 12% van het grondoppervlak in Nederland bebouwd of geasfalteerd en de verwachting is dat dit in de komende 30 jaar gaat toenemen naar 20% (Nijs, T et al., 2003). Het is aannemelijk dat er een versterkend effect van het SHE gaat optreden door het naar elkaar toegroeien van stedelijke conglomeraties. Tevens wordt verwacht dat de verdichting van steden zal toenemen en studies in Japan laten al zien dat verdichting een versterking van het SHE tot gevolg heeft. Het is dan ook noodzakelijk om bij stedelijke renovatie/nieuwbouw/uitbreiding rekening te gaan houden met het SHE. In Duitsland bijvoorbeeld wordt bij toekenning van energielabels voor zeer energiezuinige woningen al rekening gehouden met het effect van de woning (indien aanwezig met tuin) op het SHE.

Ter verduidelijking van het SHE effect eerst een kort overzicht van de factoren die bijdragen aan de hogere temperatuur in stedelijk gebied:

- Absorptie en invangen van zonnestraling door donkere oppervlakken
- Obstructie van hemelzicht houdt warmtestraling gevangen
- Antropogene warmteproductie
- Wind reductie

- Toename warmteopslag vanwege thermische eigenschappen bouwmaterialen

Ons onderzoek beperkt zich tot Rotterdam en bovenstaand lijstje maakt duidelijk dat bovenstaande factoren ook voor Nederlandse steden zullen gelden. Het is de uitdaging om bovenstaande factoren te kunnen kwantificeren. Figuur 1 geeft een mooi overzicht van de consensus op SHE gebied. Het betreft SHE onderzoek van steden in Arizona en California.



Figuur 1 Stedelijk hitte-eiland effect (Bron: Arizona State University)

De nederlandse situatie van het buitengebied sluit goed aan bij de rechter kant van de grafiek waar goed van vocht voorzien landbouwgrond zichtbaar is. De nachtelijke temperaturen in het stedelijk gebied laten een hele duidelijke piek zien van meer dan 8 K SHE effect terwijl tijdens het tijdstip van de hoogste temperatuur (in de loop van de middag) het maar een klein beetje warmer wordt in de stad. Opvallend is dat de ruim opgezette en van veel groen voorziene voorsteden overdag zelfs wat koeler zijn en dat het SHE maximum sterk gereduceerd is. De voorsteden gaan echter veel warmer worden zo gauw tuinen verhard worden hetgeen voor stedelijke tuintjes in Nederland een opgaande

trend lijkt te zijn. De vraag is dus in hoeverre figuur 1 past bij de Nederlandse situatie. De aanpak die daarvoor gekozen is bestaat uit monitoring van het stedelijk microklimaat met vaste stations en met mobiele platforms om de ruimtelijke verdeling in kaart te kunnen brengen. Dat laatste waar we hier verder op ingaan is nodig omdat het ondoenlijk zou zijn om op leefniveau honderden meetstations te installeren. De mobiele metingen geven tevens de mogelijkheid om veel gedetailleerder de factoren die bijdragen aan hittebeleving van de mens in kaart te brengen (Heusinkveld, et al., 2010).

2 Hittebelasting meten met een mobiel meetplatform

Hittestress treedt op zo gauw warmte productie, afgifte en opname resulteren in een verhoogde kerntemperatuur. Hierbij kunnen de volgende factoren onderscheiden worden:

- Temperatuur
- luchtvochtigheid
- kortgolvlige straling (zonnestraling direct of gereflecteerd)
- thermische straling (van wegdek, gebouwen en open hemel)
- wind snelheid

De mate van thermische belasting kan op vele manieren uitgedrukt worden en verschillen van mens tot mens. Om tot een vergelijking van verschillende microklimaten te komen wordt in deze studie gekozen voor de Fysiologisch Equivalente Temperatuur (PET) en kan ook geïnterpreteerd worden als gevoelstemperatuur (Höppe, 1999). De term gevoelstemperatuur is ook heel goed communiceerbaar en maakt een objectieve vergelijking van stedelijke locaties mogelijk. Aan de hand van feedback van proefpersonen kan een mate van warmtebeleving of hittestress gekoppeld worden aan PET temperaturen.

PET (°C)	Human sensation	Thermal stress level
4	very cold	extreme cold stress
8	cold	strong cold stress
13	cool	moderate cold stress
18	slightly cool	slight cold stress
23	comfortable	no thermal stress
29	slightly warm	slight heat stress
35	warm	moderate heat stress
41	hot	strong heat stress
	very hot	extreme heat stress

Tabel 1 Vergelijking tussen PET en menselijke warmtesensatie en thermische stress niveaus voor een gezond persoon, 35 jaar, interne warmteproductie 80 W, kledingfactor 0.9 clo (Matzarakis et al., 1999)

Aan de hand van een energiebalansmodel van een standaard staand persoon van 35 jaar, 1.75 m lengte en normaal gekleed (pak) wordt de warmtebelasting omgerekend naar een binnenklimaat met een windsnelheid van 0.3 m/s en een relatieve vochtigheid van 50% waarbij de wanden dezelfde temperatuur hebben als de PET temperatuur (Matzarakis et al., 1999 en 2007). Vanwege de wind reductie in stedelijk gebied wordt vooral de stralingsgrootheid zeer belangrijk en wordt daarom heel gedetailleerd gemeten op de mobiele platforms. De stralingsmetingen worden gewogen voor een staand persoon (met kortgolvige reflectiewaarde: 0.3, thermische emissiviteit: 0.97). Weegfactoren: 0.22 voor de 4 zijwaartse richtingen, 0.06 voor de straling van onderen en van boven.



Figuur 2: Mobiel meetplatform

De meetinstrumenten zijn zodanig opgesteld dat minimale verstoring optreedt. Daartoe werd gekozen voor een bakfiets omdat zo een redelijk horizontaal platform ontstaat. Naar voren gericht zijn 10 stralingsmeters waarvan de ene helft kortgolvlige en andere helft thermische straling meet. De bak van de fiets is zodanig opengewerkt dat schaduwwerking beperkt blijft. Naar achteren gericht staan de laatste 2 stralingsmeters. De windmeter staat wat verder naar voren om stuwdruk effecten te minimaliseren. De locatie wordt middels satelliet navigatie bijgehouden waarbij ook snelheid geregistreerd wordt. De snelheidsberekening van de satelliet navigatie vertoont wat ruis in stedelijk gebied en daarom is tevens toegevoegd een wielsensor die exact de wielomwenteling meet (8 pulsen per wiel omwenteling). De windsnelheid wordt gemeten met een ultrasone anemometer waarbij de snelheid in de fietsrichting en dwars daarop gemeten wordt. Achteraf wordt de windsnelheid teruggerekend naar stilstand. Meetinstrumenten specificaties:

- 2 Pyranometers: Hukseflux, Delft, type: LP02 (spectrale range: 305-2800nm, response tijd: 5 s, offset <7 W/m², field of view 180°, temperatuur afhankelijkheid <0.1 % /K
- 2 Pyrgeometers: Hukseflux, Delft, type: IR02 (spectrale range: 4500-50000 nm, response tijd: 5 s, offset <15 W/m², field of view 150°, temperatuur afhankelijkheid <0.1 % /K
- 2 4-componenten netto-stralingsmeter: Hukseflux, Delft, type: NR01 (elk bestaande uit 2 LP02 en 2 IR02, specificaties zie boven).
- 1 ultrasonic 2D anemometer: Gill (windsnelheid nauwkeurigheid < +/-2%, windrichting < +/-3%, output interval 1 s)
- Satelliet navigatie: type: 60CSX, Garmin, U.S.A.
- Meetcomputer: type: CR1000, Campbell Scientific U.S.A.
- Thermometer-hygrometer: CS215L met stralingsscherm 41003-5, nauwkeurigheid: relatieve vochtigheid +/-2% (10-90%, daarbuiten +/-4%), response tijd <10 s bij 1 m/s windsnelheid. Temperatuur nauwkeurigheid: +/- 0.4K, response tijd <120 s bij 1 m/s windsnelheid

Met een interval van 1 s worden alle meetinstrument gegevens geregistreerd.

3 Metingen en analyse

Aan de hand van geografische informatie werden een aantal routes uitgezet door Rotterdam en omgeving. De wijken die geselecteerd werden bestonden uit o.a.:

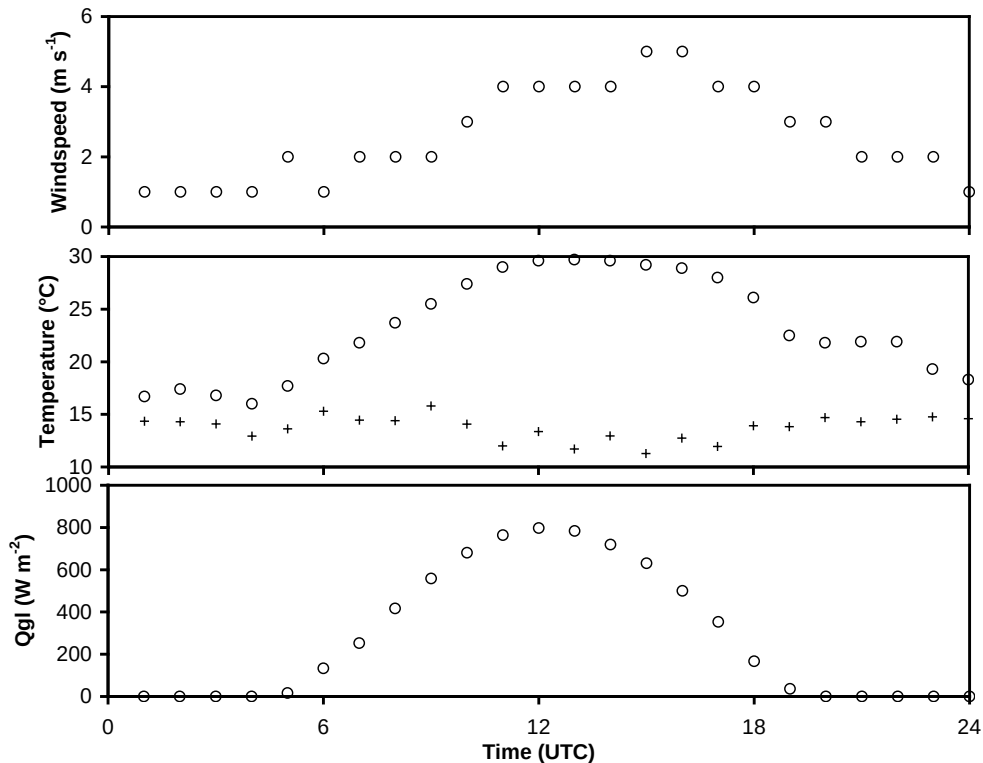
- Laagbouw industrie (Noord-West en Spaanse Polder)
- Hoogbouw centrum
- 2 laags rijtjeswoningen (Vreewijk, Schiebroek)
- Oude groene wijken laagbouw (Kralingen)

In 2009 is gewacht op een hete periode met lage windsnelheid en wolkenloze lucht. Bij deze omstandigheden wordt het SHE het grootst. Bij heldere hemel vindt namelijk verhoogde stralingsafkoeling plaats. Verder zal een lage windsnelheid de afkoeling vertragen en de stad kan zo overdag meer warmte opslaan. Er werden 3 meettrajecten uitgezet. De 2 grote lussen (Fig. 3, rood en groen) werden een aantal keren gereden op 6 augustus 2009, een dag met wolkenloze luchten en weinig wind en temperaturen tot 30°C (Fig. 4).



Figuur 3: 3 Routes door de stad Rotterdam, een noordelijke (rood) en zuidelijke lus (groen) van beide 20 km en een zwarte lus door het centrum van 12 km.

De zwarte lus is 4x gereden op 20 en 21 juni 2010 waarbij de nadruk lag op de binnenstad en de invloed van groen en water.

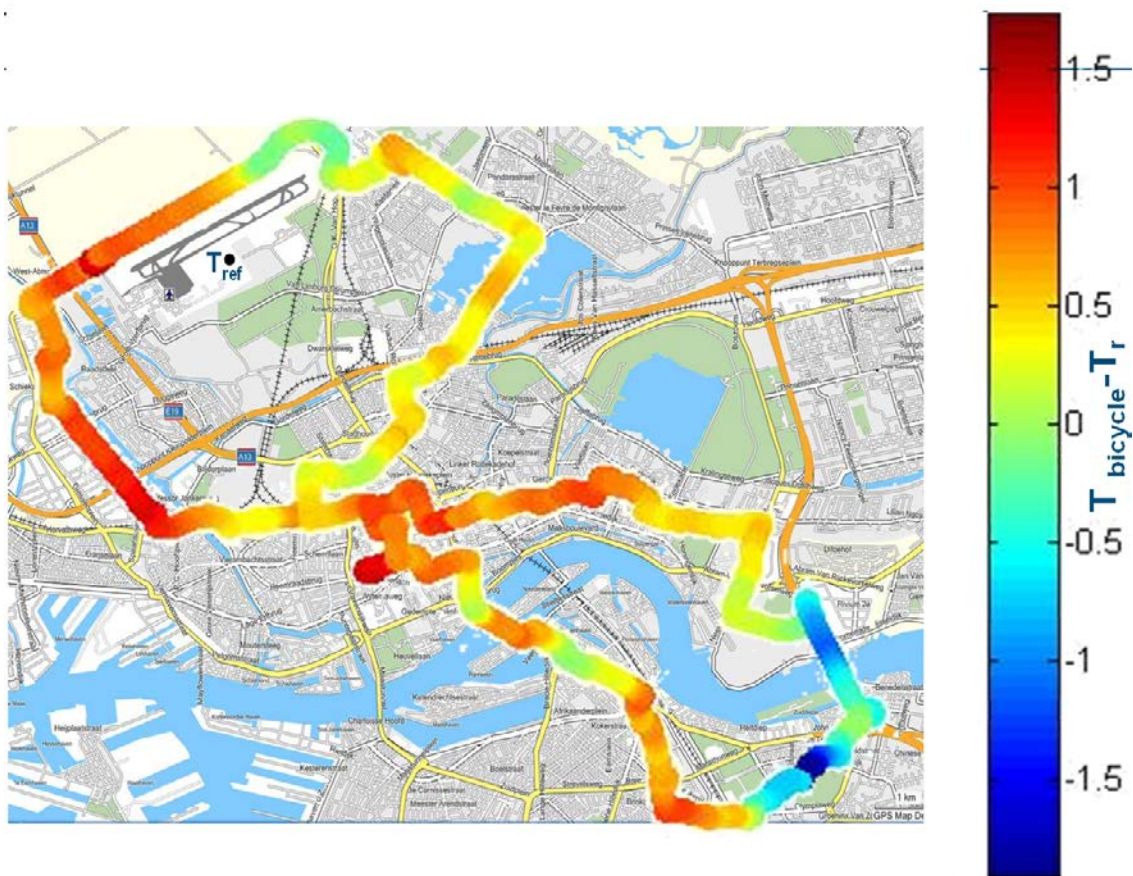


Figuur 4: Weercondities station Zestienhoven (6 August 2009). Onderaan: Globale straling, middelste grafiek: 1.5 m lucht temperatuur en dauwpunt temperatuur (op moment van observatie, bovenste grafiek: gemiddelde 10 m windsnelheid gedurende de 10 minuut periode voorafgaand aan waarnemingstijdstip (KNMI, The Netherlands).

Metingen 2009

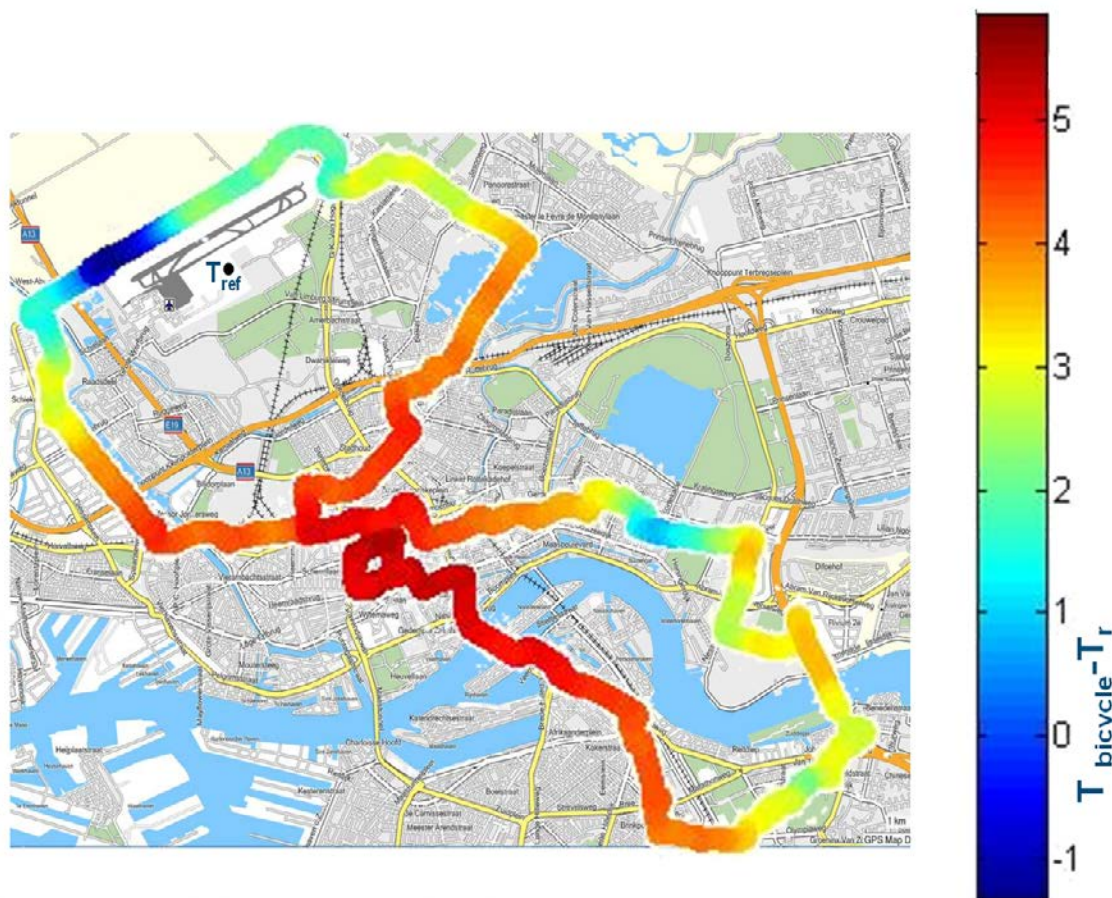
De metingen van 6 augustus 2009 laten in de ochtend zien dat veel straten in het centrum koeler zijn dan het buitengebied. Dat komt vooral doordat de zonnestraling nog niet goed is doorgedrongen in de nauwe straten maar al wel het buitengebied verwarmt. Dit effect is natuurlijk afhankelijk van de oriëntatie van de straat. Nadat de zon de hoogste stand gepasseerd heeft wordt het wel warmer in de meeste wijken (Fig. 5. Echter rond de 2

heuvelen blijft de temperatuur achter doordat de bomen veel schaduw geven en er weinig straling doordringt tot de bodem.



Figuur 5: Temperatuurverschillen tussen mobiele metingen en het weerstation van het KNMI op vliegveld Zestienhoven (14:00-16:00 u, 6 augustus 2009)

De temperatuurverschillen linksboven zijn ook interessant, hier hadden we zeer waarschijnlijk te maken met wind vanaf grote parkeerplaatsen van Zestienhoven. Het is verder belangrijk te realiseren dat er enige ruis ontstaat doordat Zestienhoven alleen uurlijkse waarden geeft.



Figuur 6: Temperatuurverschillen tussen mobiele metingen en de achtergrond meting van het KNMI op Zestienhoven (22:00-24:00 u, 6 augustus 2009)

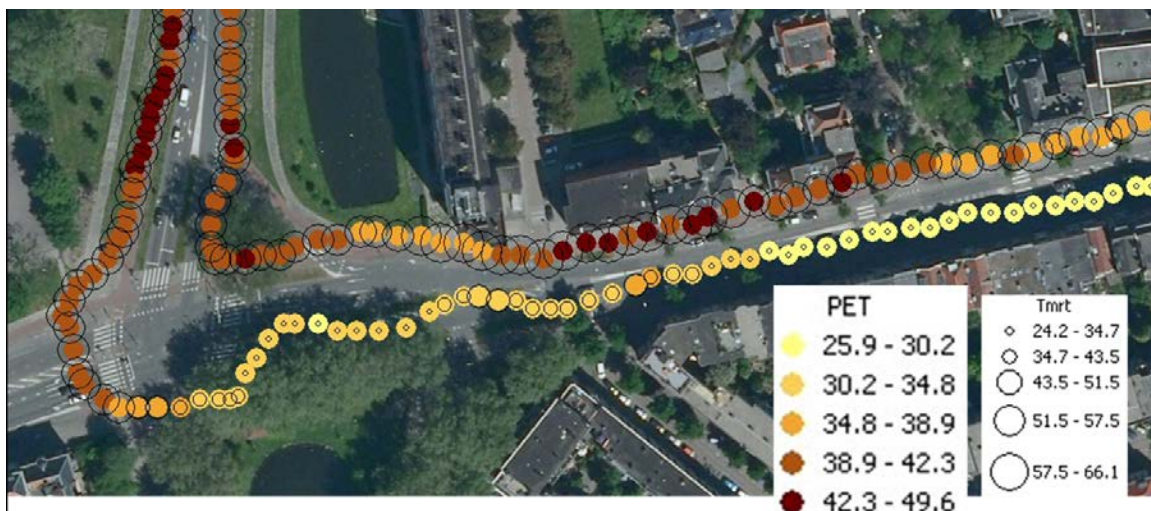
In de avonduren worden de verschillen opeens veel groter (let op de andere schaal!). Zestienhoven lijkt zelfs beïnvloed door het SHE. Het donkerblauwe deel laat zien dat de polder (NW) koeler was. Het fietstraject was daar wat lager gelegen. Door de ruime opzet van industriegebied Spaansepolder gaat de afkoeling blijkbaar efficiënter ondanks dat het overdag er bijna net zo warm werd als in de binnenstad. De nachtelijke afkoeling vanaf straatniveau vindt plaats via stralingsafkoeling (percentage open hemelzicht) en wind. Beide factoren scoren hier hoger dan in het centrum van de stad. Verder kan de nachtelijke afkoelsnelheid van platte daken best groot zijn omdat de thermische massa laag is. Wijk Kralingen is 'avonds al gauw bijna net zo koel als het buitengebied. De combinatie van laagbouw en aanwezigheid van veel schaduwelementen dragen bij aan

dit lage temperatuurverschil. Zonnestraling die het asfalt of de gevel overdag niet bereikt (schaduwwerking groen) zal de warmteopslag overdag beperken.

We zien dus meer dan 7 graden temperatuurverschil in de avonduren. Ook lijkt er veel minder variatie (binnen een km) in de temperatuur te zitten dan overdag. Dat komt ook omdat overdag de directe straling een grote factor is (zon/schaduw).

Gevoelstemperatuur overdag

Volgens figuur 5 lijkt het alsof het temperatuurverschil tussen de wijken overdag niet zo belangrijk is als 's avonds. Echter overdag heeft de globale straling (zon) een hele grote bijdrage aan de hittebeleving en in dezelfde straat kunnen verschillen van 15 graden in gevoelstemperatuur PET optreden. Figuur 7 laat dit mooi zien, waarbij de zuidelijke straatzijde schaduw gaf (bomen en huizen) en de noordzijde vol in de zon zat. Wind kan verkoelend werken maar op deze dag was wind geen significante term in de PET reductie. Verder is de wind vaak gereduceerd in de stad.

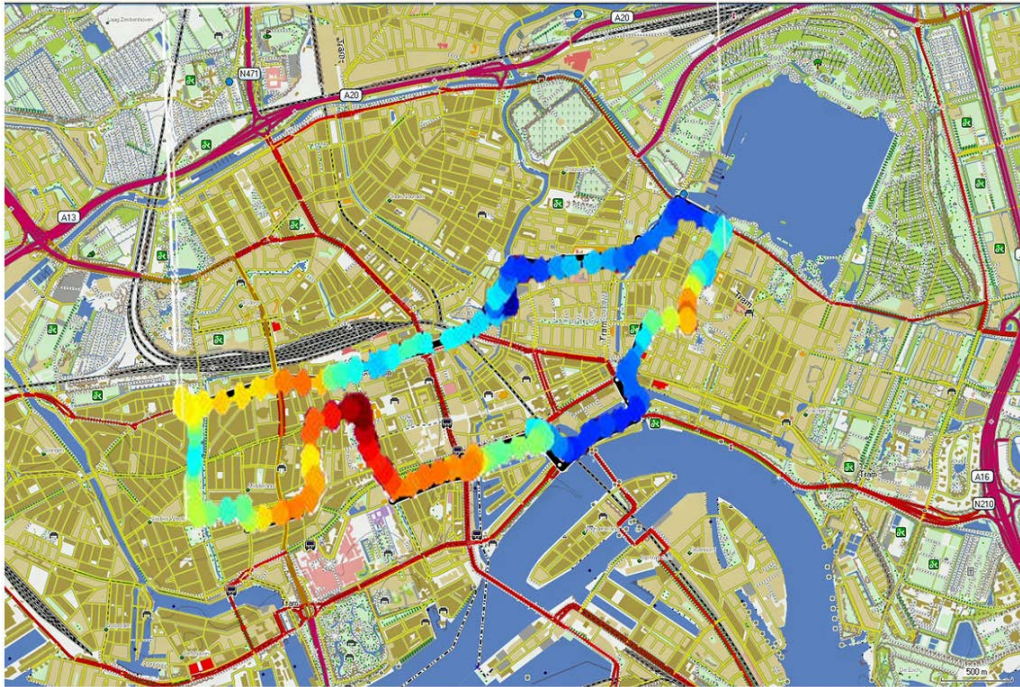


Figuur 7: PET (kleuren) en stralingsbelasting (cirkels) 's middags 6 augustus 2009

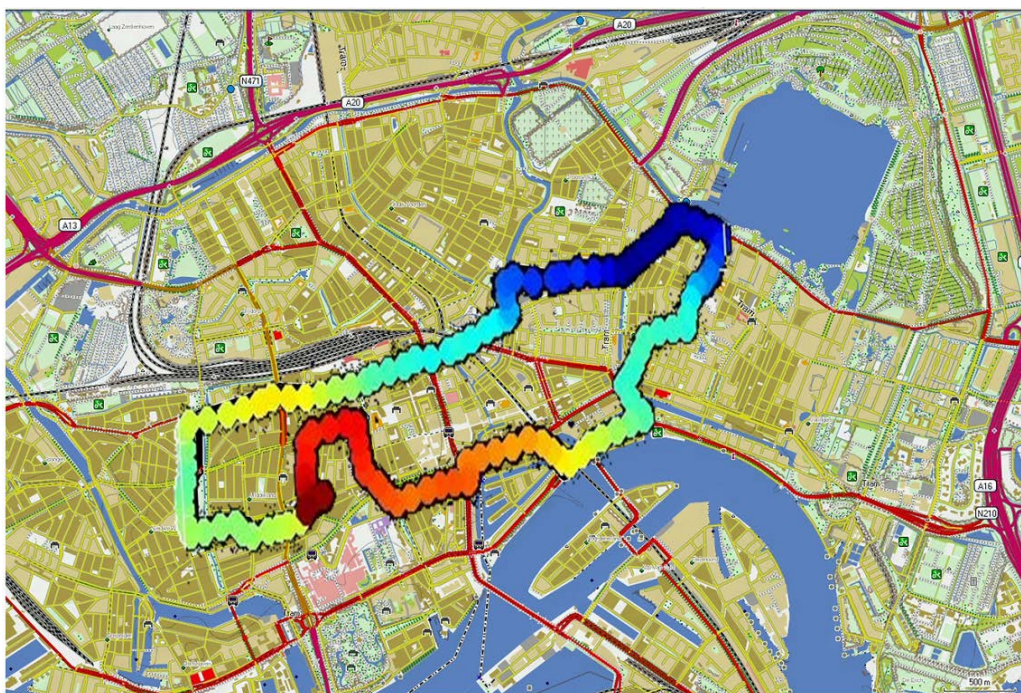
Schaduw is dus een belangrijke factor om thermisch comfort op straat te verbeteren. Daarnaast zorgt schaduw ervoor dat asfalt en gevels niet zo opwarmen hetgeen de luchttemperatuur in de avonduren ook verlaagt.

Nachtelijke metingen 2010

De metingen op 20 en 21 juli 2010 waren gericht op water en het centrum. De verschillen tussen de stad en het buitengebied bleven helaas beperkt doordat hoge bewolking eind van de middag binnen kwam drijven. Toch zijn de verschillen tussen de wijken en straten goed te zien. Geschat wordt dat deze verschillen minstens een factor 2 hoger zijn bij vergelijkbare condities echter met heldere hemel.



Figuur 8: Temperaturen mobiele metingen (range 29.87 – 30.9 °C) op 17:47 – 19:47, 20 juli 2010



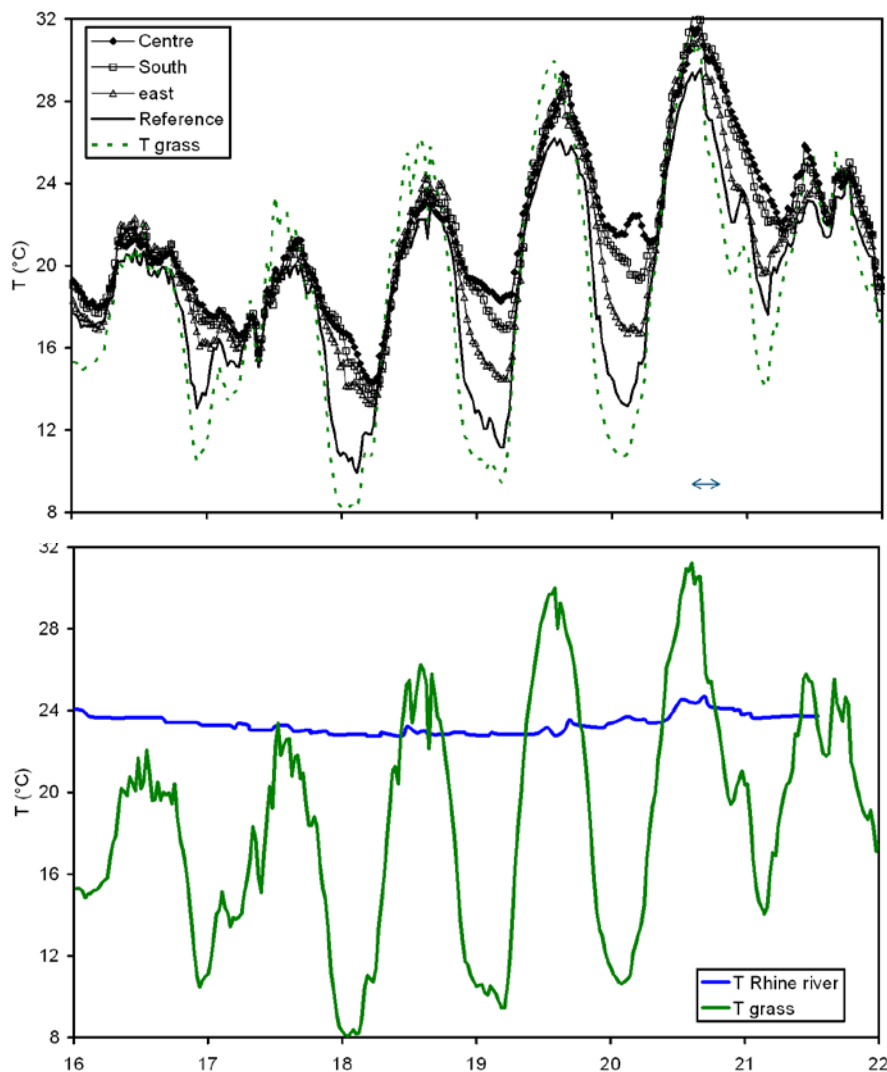
Figuur 9: Temperaturen mobiele metingen (range 24.7 – 26.5 °C) op 00:46 – 01:50, 21 juli 2010

Opvallend is dat de nauwe straten in het centrum 's avonds warmer blijven (Fig. 9). Duidelijk te zien in Figuur 8 is de verkoeling van de zuidwestelijke wind op de maaskade (voor zonsondergang). Na zonsondergang ontstaat een verwarmend effect, zie figuur 9.

Afhankelijk van de watertemperatuur kan water een verkoelende of verwarmende werking hebben. De thermische processen die hier o.a. een rol spelen zijn de volgende: Overdag loopt de temperatuur in de stad snel op, het maaswater blijft koeler dan de oppervlaktetemperaturen van vooral zon beschenen stenen oppervlakken.

Water heeft een hoge warmtecapaciteit en doormenging waardoor het heel lang duurt om water af te koelen. Vroeger in het jaar zal de Maas echter een stuk koeler zijn waardoor het verkoelende effect langer door kan gaan na zonsondergang. Het is nog niet eenduidig vast te stellen waar en wanneer zo'n omslagpunt plaatsvindt en additioneel onderzoek is nodig. De afkoeling die te zien is in de route tegen de klok in vanaf Kralingen naar centrum komt hoofdzakelijk door het vele groen. Ter verduidelijking is de gras oppervlaktetemperatuur van het referentiestation toegevoegd en die laat zien dat het grasoppervlak snel afkoelt in de avonduren en aanzienlijke verkoeling kan geven. Bomen

koelen overigens ook veel sneller af dan water en de bomen aldaar beperkten ook de opwarming overdag van het onderliggende oppervlak (Fig. 8) De aanwezige gracht zal echter ook een kleine bijdrage geleverd kunnen hebben hetgeen nog onderwerp van vervolgonderzoek is. Maas of gracht watertemperaturen waren helaas niet voorhanden, echter de Rijn temperatuur zal niet veel afwijken van de Maas (vergelijkbare meteorologische condities in stroomgebied). We zien hier duidelijk dat op 16 en 17 juli de rivier dag en nacht warmte afgeeft. Hierna geeft het water in de avonduren warmte af.



Figuur 10 4 referentie stations (boven) en in onderpanel de Temperatuur van het gras oppervlak (Referentie station) en Rijnwater (RWS) 16-21 juli 2010

4 Conclusies

De mobiele metingen van 6 augustus 2009 laten duidelijk zien dat ook de stad Rotterdam een aanzienlijk SHE heeft. In de avonduren loopt het temperatuursverschil met het buitengebied en het centrum makkelijk op tot boven de 7 °C. Overdag zijn de verschillen kleiner maar in de middag worden juist de hoogste temperaturen gemeten en dan is het risico op hittestress groter vooral op schaduwloze en windluwe zones in de stad. De verschillen in gevoelstemperatuur kunnen in de stad oplopen tot meer dan 15 °C en ver boven de PET 35°C grenswaarde waarboven het thermisch comfort overgaat naar serieuze hittestress voor een gezond persoon. Het verdient dan ook de aanbeveling om hiermee rekening te houden bij de inrichting van de straten (schaduw elementen). Stedelijk groen zorgt voor afkoeling zoals te zien is rond het park de 2 heuvelen. Aldaar blijft het 's middags zelfs koeler dan in het buitengebied. Nadere studies zijn echter nodig om het effect op een groter stadsdeel te kunnen bepalen. Verder zien we ook dat oude wijken zoals Kralingen goed presteren. De laagbouw, ruime opzet van zulke wijken en de vele groenelementen (gras, bomen) zijn hier de verkoelende elementen. Metingen van afgelopen zomer laten zien dat open water geen eenduidig verkoelend effect heeft. De mate van verkoeling wordt sterk bepaald door de watertemperatuur wat bepaald of verkoeling in de avonduren nog mogelijk is. Aan het begin van een hitteperiode als water nog niet zo opgewarmd is zijn koelmogelijkheden effectiever. In de avonduren gaat water uiteindelijk warmte leveren door de enorme warmteopslag die ook goed beschikbaar blijft gedurende de nacht. Hierdoor blijft in de avonduren de afkoeling achter bij stedelijk groen en verharde oppervlakken. Het moment in de nacht waarop dit gebeurt en hoe sterk de verkoeling wordt is nog niet eenduidig te bepalen en vervolgonderzoek is nodig.

Dankwoord

De auteurs willen de volgende personen danken voor hun inzet bij de mobiele metingen: Henk Pietersen, Joel Schröter, Marina Sterk, Suzanne Visser. De gemeentewerken Rotterdam zijn we zeer erkentelijk voor hun inzet bij de realisatie en onderhoud van het meetnet. Verder bedanken we Lissy Nijhuis en Jos Streng van Gemeente Rotterdam voor de begeleiding van dit project.

5 Referenties

Heusinkveld, B.G., L.W.A. van Hove, C.M.J. Jacobs, G.J. Steeneveld, J.A. Elbers, E.J. Moors, A.A.M. Holtslag, 2010. Use of Mobile platform for assessing urban heat stress in Rotterdam. Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology. Albert-Ludwigs-University of Freiburg, Germany, 12-14 April 2010, 433-438.
<http://www.meteo.unifreiburg.de/forschung/publikatione/berichte/index.html>

Höppe, P., 1999, The physiological equivalent temperature – a Universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. Int. Biometeorol., 43, 71-75.

Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H., 2007. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments – Application of the RayMan model. Int J of Biometeorol 51, 323-334.

Matzarakis A., Mayer, H., Iziomin, G., 1999, Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. Int J Biometeorol 43: 76-84.

Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, F., 2007: Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan Model. Int J Biometeorol (2007) 51:323–334, DOI 10.1007/s00484-006-0061-8

Nijs, T. de, Crommentuijn L., Farjon H., Leneman, H., Ligtoet, W., De Niet, W., Schotten, K., 2002: *Vier scenario's van het Landgebruik in 2030, Achtergrondrapport bij de Nationale Natuurverkenning 2*, RIVM rapport 408764 003, RIVM, Bilthoven.

.