ALTERRA WAGENINGEN UR

Stadsklimaat in Rotterdam

Eerste analyse van de meetgegevens van het meteorologische meetnet

Alterra-rapport 2192
ISSN 1566-7197

L.W.A. van Hove, J.A. Elbers, C.M.J. Jacobs, B.G. Heusinkveld en W.W.P. Jans

ALTERRA WAGENINGEN UR

ROTTERDAM.CLIMATE.INITIATIVE

Knowledge for Climate

Stadsklimaat in Rotterdam

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat (www.kennisvoorklimaat.nl), dat wordt medegefinancierd door het ministerie van Infrastructuur en Milieu. Het onderzoek is ook onderdeel van het strategisch onderzoekprogramma Kennisbasis thema IV 'Duurzame ontwikkeling van de groenblauwe ruimte, dat gefinancierd wordt door het ministerie van Economische zaken, Landbouw en Innovatie en uitgevoerd wordt door Wageningen UR.

Stadsklimaat in Rotterdam

Eerste analyse van de meetgegevens van het meteorologische meetnet

L.W.A. van Hove[1,2], J.A. Elbers[3], C.M.J. Jacobs[3], B.G. Heusinkveld[1] en W.W.P. Jans[3]

1 Wageningen University, Meteorology and Air Quality
2 Wageningen University, Earth System Science
3 Wageningen UR, Alterra, Climate Change

Combined Wageningen University and Alterra report

Alterra-rapport 2192

Alterra, onderdeel van Wageningen UR
Wageningen, 2011

Referaat

Hove, L.W.A. van, J.A. Elbers, C.M.J. Jacobs, B.G. Heusinkveld en W.W.P. Jans, 2011. *Stadsklimaat in Rotterdam; Eerste analyse van de meetgegevens van het meteorologische meetnet*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2192. 32 blz.; 10 fig.; 4 tab.; 10 ref.

Op drie locaties in Rotterdam (Centrum, Oost, Zuid) en op één locatie buiten de stad (Referentielocatie) worden sinds augustus 2009 meteorologische metingen uitgevoerd. We rapporteren een eerste analyse van de waargenomen meteorologische verschillen tussen stad en buitengebied (25-08-2009 – 31-03-2011). Conform de verwachting was het in de stad warmer. Op de locaties Centrum en Zuid liepen de verschillen soms op tot 8°C in de nacht na windstille, heldere dagen met een maximumtemperatuur boven 30°C. Deze maximale verschillen zijn vergelijkbaar met die van andere grote Europese steden. Het verschil was duidelijk minder groot voor de minder intensief bebouwde, groene wijk Oost. Globale straling en windsnelheid waren veel lager in de stad (14-19%, respectievelijk ~50%). De waterdampspanning was eveneens iets lager (2-5%). De resultaten suggereren ook dat het door de mens beleefde thermisch comfort in de dichtbebouwde delen van Rotterdam op sommige dagen duidelijk verminderd is.

Trefwoorden: Urban Heat Island, stadsklimaat, thermisch comfort, Rotterdam

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van www.alterra.wur.nl (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra Wageningen UR verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.rapportbestellen.nl.

© 2011 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek)
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; info.alterra@wur.nl

– Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
– Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
– Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra-rapport 2192
Wageningen, december 2011

Inhoud

Samenvatting 7

1 Inleiding 9
1.1 Achtergrond 9
1.2 Doelstellingen en afbakening 9

2 Meetnet 11

3 Resultaten 13
3.1 Overzicht meetresultaten 13
3.2 Jaarlijkse variatie in het ‘stedelijk hitte-eiland’ effect 14
3.3 Dagelijkse variatie in UHI 16
3.4 Invloed van de windsnelheid 17
3.5 Thermisch comfort 18

4 Discussie en conclusies 21
4.1 Conclusies 22

Dankwoord 23

Referenties 25

Bijlage I Urban Climate Zone classificatie (Oke, 2006) 27

Bijlage II Overzicht meetresultaten periode 25 augustus 2009 - 31 maart 2011 29

Samenvatting

Sinds augustus 2009 worden *in situ* meteorologische metingen uitgevoerd op drie locaties in de stad Rotterdam (Centrum, Oost, en Zuid) en op één locatie in het buitengebied ten noorden van Rotterdam. De locatie in het buitengebied dient als referentiestation. Dit meetnet is tot stand gekomen in het kader van het 'Heatstress in the City of Rotterdam' project (HSRR05, 1ste fase Kennis voor Klimaat programma). Dit rapport geeft een eerste analyse van de meetgegevens over de periode 25 augustus 2009 tot 31 maart 2011. Hierbij ligt de nadruk op het zogenoemde hitte-eiland effect (Eng: Urban Heat Island effect, UHI). Dit is het verschil in temperatuur tussen de stad en het omringende buitengebied. Doorgaans is de temperatuur in de stad hoger, zoals ook de in dit rapport geanalyseerde metingen laten zien. Behalve van een gemiddeld hogere etmaalgemiddelde temperatuur (verschil 0.5 - 1.4 °C), minimumtemperatuur (verschil 1.4 - 2.7 °C) en maximumtemperatuur (verschil 0.2 - 1.2 °C) in de meetperiode was in de stad ook sprake van een lagere etmaalgemiddelde globale straling (14-19% minder) dan op de referentielocatie, een beduidend lagere windsnelheid (tot minder dan 50% van die in het buitengebied) en een iets lagere luchtvochtigheid uitgedrukt in waterdampspanning (2-5% minder). De resultaten van de meetlocaties Centrum en Zuid lieten de grootste verschillen met de referentielocatie zien.

De maximale UHI-intensiteit wordt na zonsondergang bereikt omdat de stad 's nachts minder afkoelt dan het buitengebied. De meetgegevens van de weerstations Centrum en Zuid laten een grote maximale intensiteit zien: tussen 6 en 8 °C tijdens windstille, heldere dagen met maximum temperaturen boven 30 °C. De UHI-intensiteit blijft gedurende een groot deel van de nacht min of meer constant. De intensiteit neemt pas na zonsopkomst af, wanneer de temperatuur in het buitengebied sneller toeneemt dan in de stad.

De resultaten van de hier gepresenteerde metingen stemmen overeen met resultaten uit eerdere metingen in 2009 met mobiele platforms en met resultaten verkregen uit gegevens van weeramateurs. De grootte van het maximale UHI-effect in de dichtbebouwde gebieden van Rotterdam (Centrum, Zuid) is vergelijkbaar met dat van andere Europese steden. Bovendien geven de resultaten een indicatie dat in dichtbebouwde plaatsen in Rotterdam het door de mens beleefde thermisch comfort al een probleem is of kan worden. Dit is een belangrijk gegeven tegen de achtergrond van een toekomstig klimaat met meer extreem warme dagen dan in het huidige klimaat, en van verdergaande verstedelijking in de regio.

Momenteel bestaat het meetnet in Rotterdam en omstreken uit veertien weerstations. De huidige analyses van de gegevens van drie stadsstations laten zien dat met de uitbreiding van het meetnet een waardevolle bron van gegevens is aangeboord. Behalve voor verdere analyses van het stadsklimaat, monitoring en regionale weersverwachtingen zullen die gegevens ook bruikbaar blijken te zijn voor processtudie en modelontwikkeling, wat op zijn beurt van belang is voor het verder ontwikkelen van adaptatiemaatregelen en -strategieën.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In steden zijn de gevolgen van een warmer klimaat extra voelbaar door het stedelijk hitte-eiland effect (Eng: Urban Heat Island, UHI). Hieronder wordt verstaan dat de temperatuur in een stedelijk gebied gemiddeld hoger is dan in het omliggende gebied. Overdag leggen steden relatief grote hoeveelheden zonne-energie vast, terwijl ze die opgeslagen warmte 's nachts juist langzamer afstaan. Hierdoor zijn de temperatuurverschillen vooral gedurende de nacht groot. In een stad als Londen kan het temperatuurverschil tussen het stadcentrum en omgeving gedurende de nacht wel meer dan 10 °C bedragen. Bovendien gaan perioden met hoge temperaturen veelal gepaard met verslechterde luchtkwaliteit en droogte.

Dit alles heeft grote gevolgen voor de leefbaarheid en de gezondheid van de bevolking in stedelijke gebieden. In een groot aantal van de ons omringende Europese landen, in Noord- Amerika en in landen zoals Australië, China, Zuid-Korea en Japan is dan ook al decennialang onderzoek gedaan naar het stadsklimaat en de stedelijke luchtkwaliteit. Maar in Nederland stond dit onderwerp tot voor kort nauwelijks in de belangstelling.

Gezien het gematigde klimaat en de ligging van Nederland aan zee werd het hitte-eiland effect voor Nederlandse steden gering geacht. Deze opvatting begint echter te veranderen, mede door de hete zomers van 2003 en 2006, waarin 1000-2200 mensen meer overleden dan gemiddeld in een normale zomer. Deze aantallen zijn relatief hoog in vergelijking met andere Europese landen (EEA, 2008), en de extra sterfte was vooral in de steden hoog. Deze constateringen riepen bij de gemeente Rotterdam de vraag op of het UHI-effect een rol heeft gespeeld bij de oversterfte, en - indien dit het geval is - wat ze hieraan zou kunnen doen. Met de ontwikkeling van adaptatiestrategieën wil Rotterdam anticiperen op de gevolgen van een veranderend klimaat met meer hete zomerse dagen en in combinatie met de verdergaande regionale verstedelijking in de komende decennia. Voor het ontwikkelen van effectieve adaptatiestrategieën zijn kwantitatieve meteorologische gegevens over het stadsklimaat onontbeerlijk. Aangezien zulke gegevens ontbraken heeft de gemeente Rotterdam in 2009 het initiatief genomen om het stedelijk hitte-eiland effect in kaart te brengen. Dit gebeurde in het kader van het 'Hittestress in Rotterdam' project (HSRR05 Kennis voor Klimaat, 1ste fase).

1.2 Doelstellingen en afbakening

In augustus 2009 zijn door Wageningen UR meteorologische metingen uitgevoerd met twee bakfietsen die zijn omgebouwd tot mobiel meetplatform (Heusinkveld et al., 2010). De meetgegevens laten een groot nachtelijk stedelijk hitte-eiland effect zien. Tussen het stadscentrum en het buitengebied bedroeg het gemeten verschil meer dan zeven graden. De mobiele metingen geven vooral een ruimtelijk beeld van de verschillen in microklimaat in de stad tijdens een zomers dag. Maar voor een goed beeld van het stadsklimaat in Rotterdam is ook meer informatie over het verloop van het weer in de tijd nodig. Daarom zijn in Rotterdam in augustus 2009 drie automatische weerstations geplaatst en één referentieweerstation op het platteland ten noorden van Rotterdam.

Met deze stations kan het weer gedurende langere perioden continu gevolgd worden. Daarmee ontstaat de mogelijkheid om gegevens te verzamelen bij uiteenlopende weersomstandigheden in verschillende seizoenen. Ook kan de invloed van de omringende bebouwing op het stadsklimaat in de omgeving van de stations nader geanalyseerd worden. Bovendien zijn de resultaten belangrijk voor validatie en parameterisatie van

simulatiemodellen die voor het stadsklimaat in ontwikkeling zijn (Van Hove et al., 2010). Die modellen zijn bedoeld om de effectiviteit van adaptatiemaatregelen door te rekenen voor het huidige en toekomstige klimaat. (Steeneveld en Van Hove, 2009; Ronda et al., 2010; Van Hove et al., 2010). Ten slotte kunnen de gegevens van meetstations in de nabije toekomst worden gebruikt bij het maken van regionale weersverwachtingen.

De vier weerstations zijn sinds eind augustus 2009 in bedrijf. Dit rapport presenteert een eerste analyse van de resultaten van deze weerstations, voor de periode augustus 2009 tot en met 31 maart 2011. Gezien de vraagstelling van de gemeente Rotterdam, ligt de nadruk op een analyse van het hitte-eiland effect. Met de meetgegevens is het ook mogelijk om het door de mens ervaren thermisch comfort te schatten. Met behulp van deze schattingen gaan we in op de vraag in hoeverre er aanwijzingen zijn dat hittestress in het huidige klimaat al een probleem is, of het dreigt te worden in een toekomstig warmer klimaat.

Het huidige rapport legt de data en de analyses vast die mede ten grondslag lagen aan het in 2011 uitgebrachte rapport over de resultaten van het 'Hittestress in Rotterdam' project (Gemeentewerken Rotterdam, 2011). In dat project konden slechts de resultaten van de in augustus 2009 ingerichte stations geanalyseerd worden. In juli 2010 is het aantal stations echter uitgebreid tot veertien stations die zich in Rotterdam en omliggende gemeenten bevinden. Data van deze tien extra stations zijn nog niet in de huidige analyses betrokken.

2 Meetnet

Sinds eind augustus 2009 worden in Rotterdam *in-situ* metingen verricht met een klein netwerk van vier standaard weerstations (Campbell Scientific, UK) waaraan een 4-componenten stralingsmeter (Hukseflux NR01, NL) en een zwarte-bol thermometer (Sensor Data, NL) is toegevoegd (figuur 2.1).

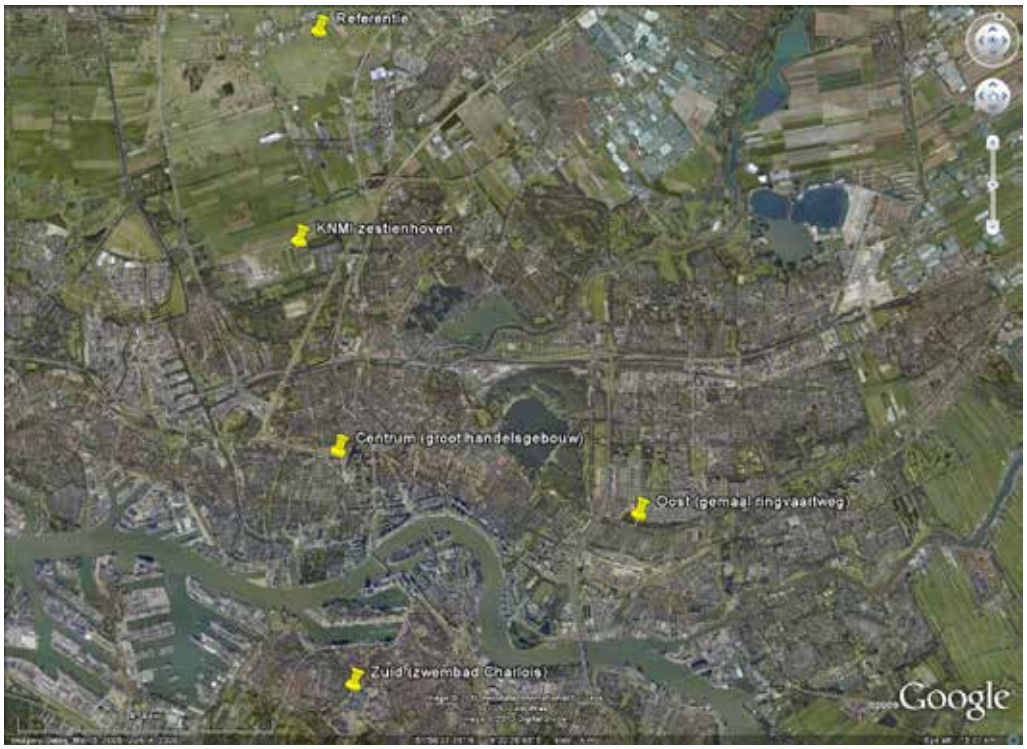
Drie meetlocaties bevinden zich in het stedelijk gebied (Centrum, Oost en Zuid) en één in het landelijk gebied ten noorden van Rotterdam (referentiestation, figuur 2.2). De metingen in het stedelijk gebied staan op locaties met een verschillende wijkclassificatie (Urban Climate Zone, UCZ) volgens Oke (2006), zoals te zien is in tabel 2.1. De classificatie is bedoeld als een eerste indicatie van het effect van een bepaald type wijkopbouw op het UHI. De gevoeligheid voor het UHI neemt normaal gesproken af met een toenemend UCZ-getal.

Op alle stations worden gedurende een langere periode continu metingen verricht aan luchttemperatuur, luchtvochtigheid, windsnelheid, windrichting en zonne- en warmtestraling. Daarnaast wordt de zogenoemde zwarteboltemperatuur bepaald. Deze combinatie van metingen kan gebruikt worden om het door de mens ervaren thermisch comfort te schatten (Höppe, 1999; Matzarakis et al., 2007). Ten slotte wordt ook de neerslag gemeten.

Figuur 2.1

Foto's van de meetlocaties. V.l.n.r.: Referentie, Centrum, Zuid en Oost. In verband met het risico op vandalisme bevindt het weerstation in het centrum zich op de luifel van het Groothandelsgebouw en het weerstation in oost op het dak van een pompgemaal. Bij deze locaties bevinden de stralingssensoren zich op een uithouder die over de luifelrand of dakrand uitsteekt zodat alleen de straling van het grondoppervlak en niet die van de luifel of het dak wordt gemeten.

Alle grootheden worden elke vijf seconden bemeten en het gemiddelde hiervan wordt ieder half uur opgeslagen. Dagelijks worden de meetgegevens via een GSM-verbinding verzameld voor archivering. Vervolgens worden de metingen voor verdere verwerking gescreend op kwaliteit. Ruwe, niet gescreende resultaten van de hier genoemde meetstations over de meest recente 5-daagse periode zijn te volgen op www.climatexchange.nl/sites/rotterdam/index.htm



Figuur 2.2

Geografische ligging van de drie weerstations in Rotterdam en van het referentiestation ten noorden van Rotterdam. De ligging van het KNMI weerstation Zestienhoven (Airport Rotterdam-Haaglanden) is ook weergegeven.

Tabel 2.1

Karakteristieken van de meetlocaties in Rotterdam en van het referentiestation volgens de 'Urban Climate Zone (UCZ)' classificatie van Oke (2006) (zie bijlage I). De gevoeligheid voor het UHI neemt in principe af met oplopend UCZ getal.

Locatie	Lat/Lon	Beschrijving	Ruwheids-klasse	Aspect ratio[1]	% Bebouwing	UCZ
Centrum	51°55'24.18"N 4°28'10.35"O	Intensief ontwikkeld stedelijk gebied met hoge bebouwingsdichtheid bestaande uit hoogbouw	8	>2	>90	1
Zuid	51°53'16.59"N 4°29'17.83"O	Intensief ontwikkeld stedelijk gebied met hoge bebouwingsdichtheid bestaande uit veelal bakstenen gebouwen van twee tot vijf verdiepingen	7	1.0-2.5	>85	2
Oost	51°55'31.41"N 4°32'54.13"O	Hoog ontwikkeld stedelijk gebied met gematigde bebouwingsdichtheid, bestaande uit huizenblokken of dicht op elkaar staande vrijstaande huizen en appartementen	7	0.5-1.5	70-85	3
Referentie	51°58'55.17"N 4°25'45.31"O	Verspreid staande huizen in een landbouwgebied	4	>0.05	<10	7

[1]: verhouding tussen gebouwhoogte en straatbreedte (H/W)

3 Resultaten

3.1 Overzicht meetresultaten

In dit rapport zijn de gegevens van de in hoofdstuk 2 genoemde vier meetlocaties uitgewerkt voor de periode eind augustus 2009 tot en met 31 maart 2011. Om een indruk te krijgen van de belangrijkste meteorologische verschillen tussen de locaties zijn in tabel 3.1 de gemiddelde waarden opgenomen van achtereenvolgens: de globale straling (dit is de inkomende kortgolvige straling van de zon), luchttemperatuur, windsnelheid, dagelijkse minimum relatieve luchtvochtigheid en de waterdampspanning. Het verloop in de tijd van de etmaalgemiddelde waarden of dagelijkse minima of maxima gedurende de meetperiode is opgenomen in bijlage II.

De in de tabel en in bijlage II getoonde waarden zijn berekend voor de dagen dat alle vier de meetstations gedurende de hele dag in bedrijf waren én betrouwbare gegevens produceerden voor de onderzochte grootheid. Dus, als de betreffende sensor van één station uitviel werden ook de meetgegevens van de drie andere stations niet meegenomen in de berekening van het daggemiddelde, en werd deze dag niet meegenomen in de berekening van het periodegemiddelde. Zo kan het aantal dagen waarover de gemiddelden berekend zijn ook verschillen per grootheid. Deze procedure is gekozen om een eerlijke en zinvolle vergelijking tussen de locaties te bewerkstelligen.

In de periode december 2009 tot medio maart 2010 vielen vooral de meetstations op de locaties Oost en Zuid regelmatig uit. Omdat de stations relatief vaak uitvielen in de winter zullen de gemiddelde waarden in tabel 3.1 naar schatting 4-10% hoger zijn dan een representatief gemiddelde over een heel jaar.

Zoals verwacht op grond van het UHI-effect was het in de stad gemiddeld warmer (0.5 - 1.4 °C) dan op het referentiestation in het buitengebied. Het verschil tussen de stadsstations en het referentiestation is groter voor de minimumtemperaturen (1.4 - 2.7 °C) dan voor de maximumtemperaturen (0.2 - 1.2 °C). Omdat de minimumtemperaturen als gevolg van afkoeling door uitstraling meestal rond zonsopkomst bereikt worden is dit resultaat eveneens in overeenstemming met de gangbare theorie over de vorming van het UHI. De globale straling was in de stad gemiddeld lager (14-19%) in vergelijking met de referentielocatie. Dit kan een gevolg zijn van schaduwwerking door de gebouwen in de buurt van de meetstations in de stad. Ook een meer verontreinigde atmosfeer boven het stedelijk zou een deel van het verschil kunnen verklaren. De gemiddelde windsnelheid is op de meetlocaties in de stad meer dan de helft lager dan die op het referentiestation. De minimum relatieve luchtvochtigheid is in de stad 9-15% lager dan in het buitengebied. Dit is echter grotendeels een gevolg van de hogere temperatuur in de stad: de verschillen in de gemiddelde waterdampspanning waren maximaal 5%.

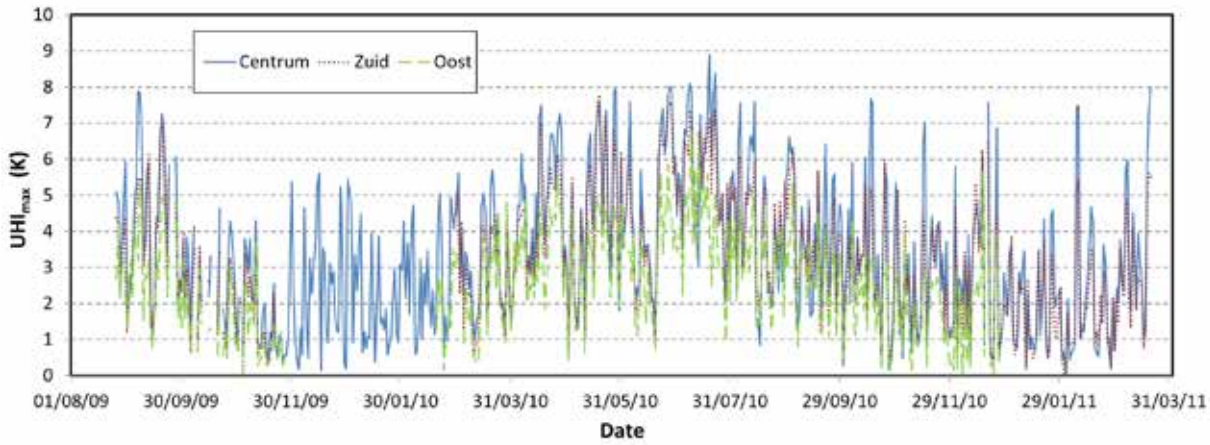
Tabel 3.1

Vergelijking van een aantal meteorologische grootheden tussen de referentielocatie en de stadslocaties (Centrum, Oost en Zuid). De tabel geeft de gemiddelden (Gem) en de standaardafwijking (Std) over de meetperiode eind augustus 2009 tot en met 31 maart 2011, berekend over dagen dat de desbetreffende sensoren gedurende de hele dag (48 halve uren) betrouwbare gegevens produceerden.

Variabele		Referentie	Centrum	Oost	Zuid
Etmaalgemiddelde globale straling (W m^{-2}) (320 dagen)	*Gem*	154	115	133	114
	Std	96	81	85	74
Etmaalgemiddelde luchttemperatuur (°C) (358 dagen)	*Gem*	11.6	13.0	12.1	12.7
	Std	6.1	6.5	6.4	6.5
Minumum luchttemperatuur per etmaal (°C) (358 dagen)	*Gem*	7.3	10.0	8.7	9.7
	Std	5.7	5.9	5.8	5.8
Maximum luchttemperatuur per etmaal (°C) (358 dagen)	*Gem*	15.2	16.4	15.4	16.0
	Std	7.1	7.5	7.5	7.5
Etmaalgemiddelde windsnelheid (m s^{-1}) (328 dagen)	*Gem*	3.03	1.12	1.24	0.90
	Std	1.50	0.54	0.66	0.37
Minimum relatieve luchtvochtigheid per etmaal (%) (358 dag	*Gem*	68.3	57.8	63.4	61.2
	Std	14.5	16.6	16.4	16.7
Etmaalgemiddelde waterdampspanning (hPa) (358 dagen)	*Gem*	12.0	11.4	11.7	11.8
	Std	3.9	3.7	3.8	3.8

3.2 Jaarlijkse variatie in het 'stedelijk hitte-eiland' effect

In deze paragraaf gaan we nader in op het UHI-effect. Figuur 3.1 toont het verloop van het UHI-effect voor de periode eind augustus 2009 tot 1 april 2011. Uitgezet zijn de waarden voor de maximum UHI-intensiteit gedurende een etmaal (aangeduid met UHImax), dus voor het maximale verschil tussen de temperatuur in de stad en op de referentielocatie. Dit maximale verschil wordt gewoonlijk bereikt na zonsondergang (zie §3.3). Tabel 3.2 toont de mediaan samen met de 95- en 98-percentiel waarden en de maximale UHImax waarden voor de winter- en zomerperiode.



Figuur. 3.1

Verloop van de maximale UHI intensiteit (UHI_{max} in K) gedurende een etmaal, voor de stadslocaties Centrum, Zuid en Oost, gedurende de meetperiode 25 augustus 2009 - 31 maart 2011.

De waarden voor de UHI-intensiteit waren het grootst in de zomermaanden (juni, juli, augustus), met 95-percentiel UHImax-waarden van 7.8 en 7.0 K voor respectievelijk de locaties Centrum en Zuid. De UHI intensiteiten op de minder dichtbebouwde, 'groene' locatie Oost zijn duidelijk kleiner (95-percentiel UHImax = 5.3 K). In de wintermaanden zijn de UHI intensiteiten gemiddeld kleiner. Desondanks kan bij gunstige weersomstandigheden (heldere lucht, lage windsnelheid) ook op winterdagen de UHI intensiteit aanzienlijk zijn, zoals ook tabel 3.2 laat zien. Omdat de intensiteit van de zonnestraling in de winter lager is dan in de zomer is het mechanisme achter de vorming van het UHI in de winter anders dan in de zomer. Mogelijk speelt antropogene verwarming hierbij een rol. Daarnaast is enige voorzichtigheid met betrekking tot de (winter)data geboden. Hoewel er geen duidelijk aanwijzingen voor onbetrouwbare data in de getoonde meetreeksen waren kunnen de resultaten toch beïnvloed zijn door specifieke meteorologische omstandigheden, zoals mistvorming en frontpassages. Effecten hiervan worden maar voor een deel opgevangen door gebruik te maken van de percentielen (mediaan, 95P, 98P).

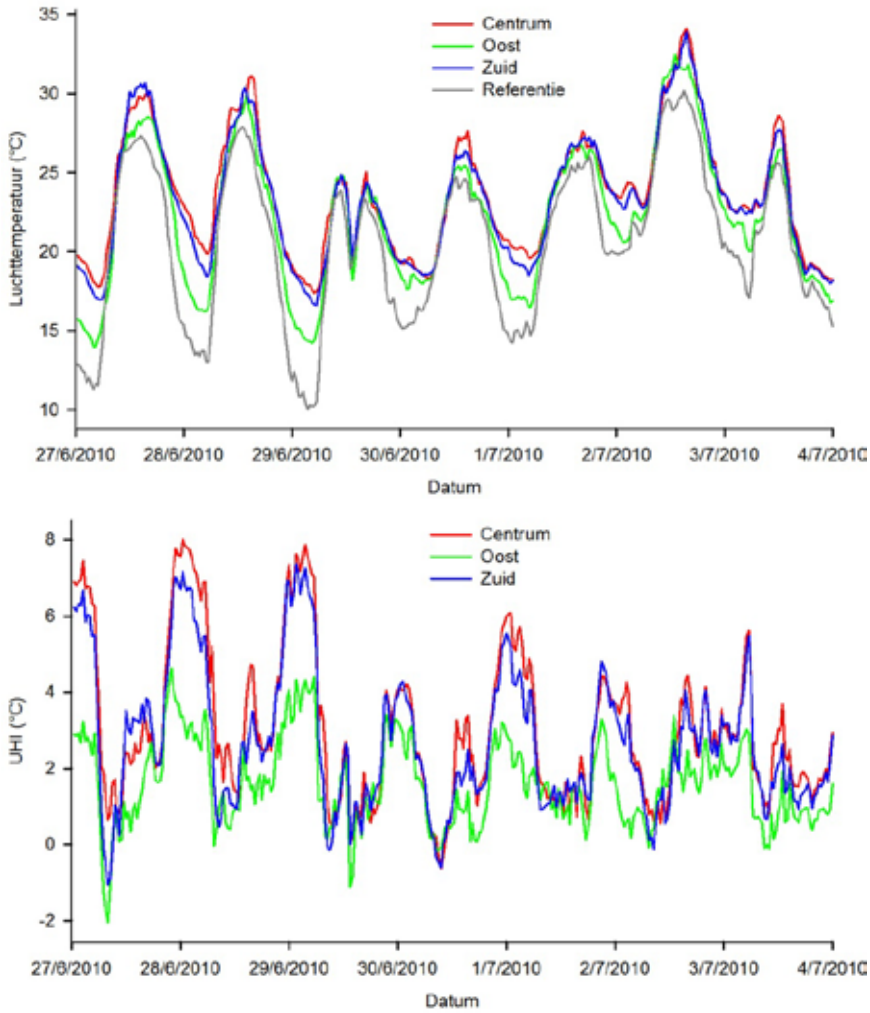
Tabel 3.2

Mediaan, 95 percentiel (95P), 98 percentiel (98P) en maximum (MAX) waarden voor UHI_{max} in de zomerperiode van 2010 (1 April - 30 September 2010), de winterperiode van 2009/2010 en 2010/2011 op de locaties Centrum, Zuid en Oost. UHI_{max} is per dag berekend uit uurgemiddelde temperaturen. N is het aantal dagen in een periode waarvoor UHI_{max} voor het desbetreffende station berekend kon worden.

		Centrum	**Zuid**	**Oost**
	coördinaten	51°55'24.18"N 4°28'10.35"O	51°55'31.41"N 4°32'54.13"O	51°53'16.59"N 4°29'17.83"O
	UCZ[1]	1	2	3
Zomer 2010				
	N	183	183	183
	Mediaan	4.6	4.4	3.4
	95P	7.8	7.0	5.3
	98P	8.0	7.5	5.7
	Max	8.9	7.8	6.7
Winter 2009/2010				
	N	180	81	96
	Median	2.2	2.3	1.4
	95P	5.1	4.5	3.8
	98P	5.4	4.5	4.5
	Max	5.7	5.0	4.8
Winter 2010/2011				
	N	171	171	87
	Median	2.3	2.2	2.0
	95P	6.7	5.2	3.8
	98P	7.5	5.6	4.2
	Max	8.0	6.4	5.7
[1]: Urban Climate Zone classificatie van Oke (2006)				

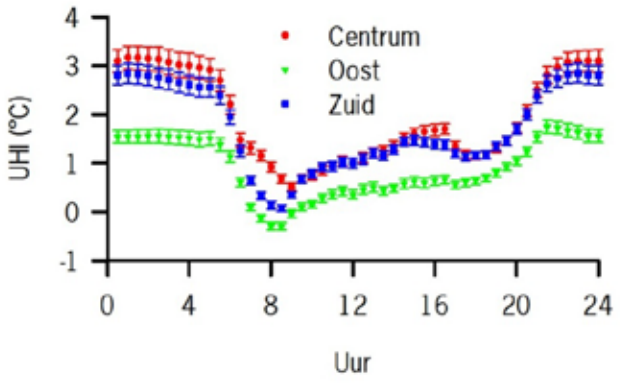
3.3 Dagelijkse variatie in UHI

Figuur 3.3 toont de dagelijkse variatie in luchttemperatuur en in UHI-intensiteit voor een relatief warme periode in de zomer van 2010 (van 27 juni tot 4 juli). Op 27 tot 29 juni daalde de temperatuur in het buitengebied na zonsondergang relatief sterk, waardoor de temperatuurverschillen met de meetlocaties Centrum en Zuid opliepen tot 6 - 8 °C. Maar de UHI-intensiteit is minimaal en soms negatief rondom zonsopkomst door een sterke stijging van de temperatuur in het buitengebied. Deze dagelijkse variatie wordt vaak waargenomen in de zomerperiode. Op 2 en 3 juli was de daling van de temperatuur in het buitengebied na zonsondergang veel minder sterk met als gevolg dat ook UHI_{max} kleiner was dan in de voorgaande nachten.



Figuur 3.2

Halfuurswaarden van de luchttemperatuur (°C) voor de locaties Centrum, Oost en Zuid en voor de referentie locatie (links), en de halfuurs UHI-waarden voor de stadslocaties (rechts) tijdens een periode van extreme warmte (27 juni - 4 juli 2010).



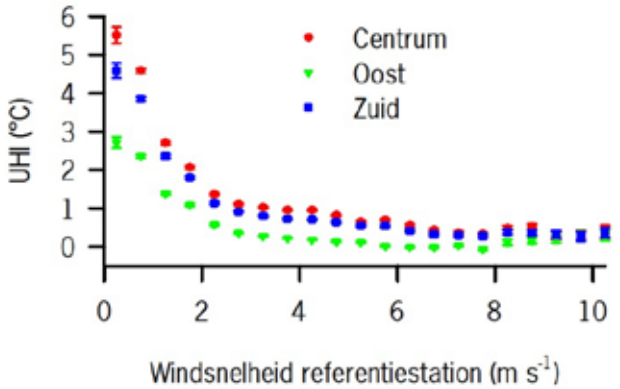
Figuur 3.3

Dagverloop van de gemiddelde halfuurwaarden van het UHI (aangeduid met UHI in °C) met bijbehorende standaardfout van het gemiddelde, voor de locaties Centrum, Oost en Zuid tijdens de zomerperiode (1 juni - 31 augustus 2010).

Figuur 3.3 laat het gemiddelde dagelijks verloop van het UHI zien voor de periode 1 juni tot 31 augustus 2010. Het getoonde verloop is samengesteld uit gemiddelde corresponderende halfuurwaarden voor die periode. Er is een duidelijk patroon waarneembaar: de UHI intensiteit neemt na zonsondergang (na 20:00 uur) snel toe, blijft vervolgens gedurende circa 8 uur, van 22:00 uur tot 6:00 uur, vrijwel constant, gevolgd door een sterke daling rondom zonsopkomst

3.4 Invloed van de windsnelheid

Zoals figuur 3.4 laat zien, is de UHI intensiteit sterk afhankelijk van de windsnelheid. De grootste UHI-intensiteit treedt op bij vrijwel windstil weer, en neemt snel af met toenemende windsnelheid. Bij windsnelheden groter dan 2 ms-1 op de referentielocatie blijven de temperatuurverschillen tussen stad en platteland gemiddeld beperkt tot circa 1 °C of minder.



Figuur 3.4

Gemiddelde UHI-intensiteit (aangeduid met UHI in °C) met bijbehorende standaardfout van het gemiddelde voor de locaties Centrum, Oost en Zuid als functie van de windsnelheid op het referentiestation (1 augustus 2009 tot 1 oktober 2010).

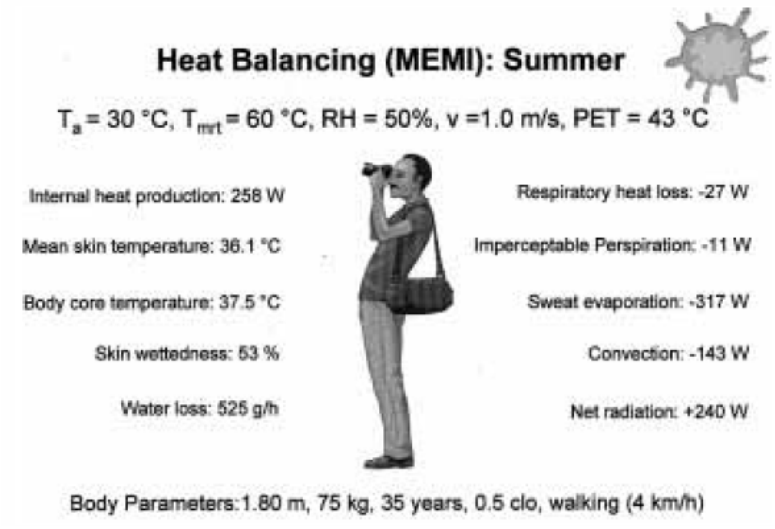
3.5 Thermisch comfort

Een maat voor thermisch comfort (warmte of kou zoals die door de mens wordt ervaren) is de 'Physiologically Equivalent Temperature' (PET) die is gebaseerd op de warmtebalans van het menselijk lichaam (Höppe, 1999):

$$M + W + R + C + E_D + E_{Re} + E_{Sw} + S = 0 \qquad (1)$$

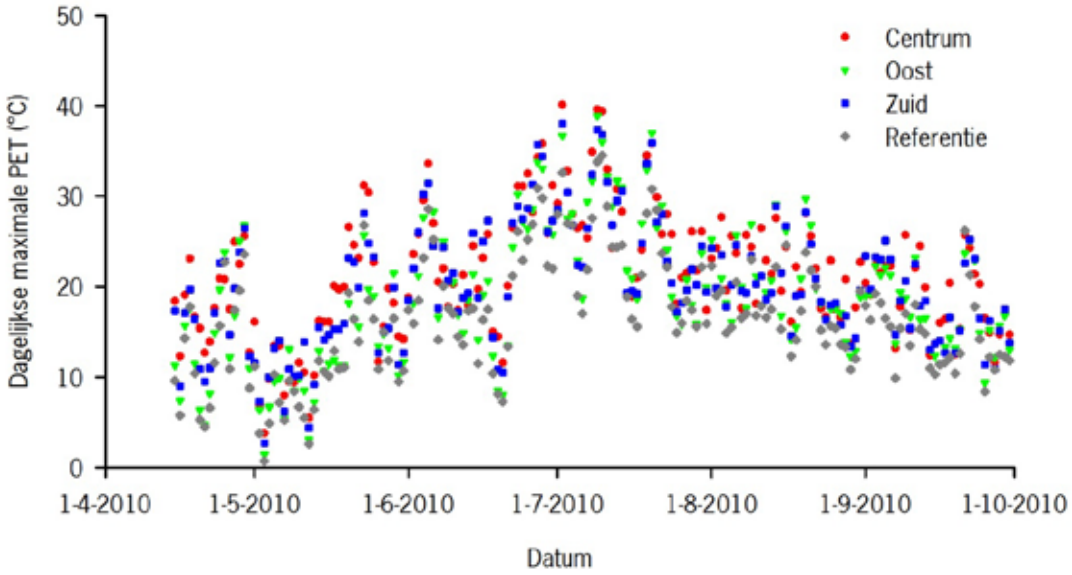
Hierin is M (metabolisme) de interne warmteproductie, W de warmteproductie door fysieke inspanning, R de netto straling op het lichaam (het verschil tussen de door het lichaam opgevangen zonne- plus warmtestraling en de teruggekaatste of weer uitgestraalde zonne- plus warmtestraling), C de voelbare warmtestroom (afvoer van warmte via directe warmteoverdracht) E_D de latente warmtestroom in waterdamp die vervolgens door de huid diffundeert, E_{Re} de warmtestroom gekoppeld aan het verwarmen en bevochtigen van de geïnhaleerde lucht, E_{Sw} de warmtestroom van verdamping door zweten, en S de opslagwarmteflux voor het verwarmen of koelen van de lichaamsmassa. Figuur 3.5 geeft een voorbeeld van een berekening van PET voor een warme en zonnige dag (luchttemperatuur = 30 °C). De berekening is uitgevoerd met het Munich Energy-balance Model for Individuals (MEMI) (Höppe, 1999). Het model gebruikt stralingsgegevens, zwarteboltemperatuur, luchttemperatuur, dampdruk en windsnelheid als invoer evenals enkele parameters die specifiek zijn voor de warmtehuishouding van een mens, zoals informatie over de isolatiewaarde van kleding en de warmteproductie bij een gegeven activiteit.

In deze studie zijn PET waarden uit de stationsgegevens berekend met het RayMan model (Matzarakis et al., 2007), de opvolger van het MEMI-model. De berekeningen hebben betrekking op een in de literatuur gedefinieerde 'standaard' persoon (1.75 m lang, 75 kg, 35 jaar, man) die in de zon staat en zomers gekleed gaat. Ze zijn uitgevoerd voor de periode medio april tot 1 oktober 2010. Figuur 3.6 laat de dagelijkse maximale PET-waarden zien, berekend voor de stadslocaties en de referentielocatie. Daarbij is de zwarteboltemperatuur gebruikt als een schatting voor de gemiddelde stralingstemperatuur (Matzarakis et al., 1999).



Figuur 3.5

Voorbeeldberekening van de warmtebalans van een zomers geklede man, voor warme en zonnige weersomstandigheden (uit Höppe, 1999). Deze berekening, bedoeld als illustratie, is uitgevoerd met het 'Munich Energy-balance Model for Individuals' (MEMI), een voorloper van het in deze studie gebruikte RayMan model (Matzarakis et al., 2007).



Figuur 3.6

Berekende dagelijkse maximale PET-waarden voor de periode 15 april tot 1 oktober 2010.

De gevonden PET-waarden kunnen worden gerelateerd aan de thermische perceptie en de mate van fysiologische koude- of hittestress die een individu ondervindt (Hoppe, 1999). Een veelgebruikte classificatie thermische perceptie en koude- en hittestress is in tabel 3.3 opgenomen.

Tabel 3.3

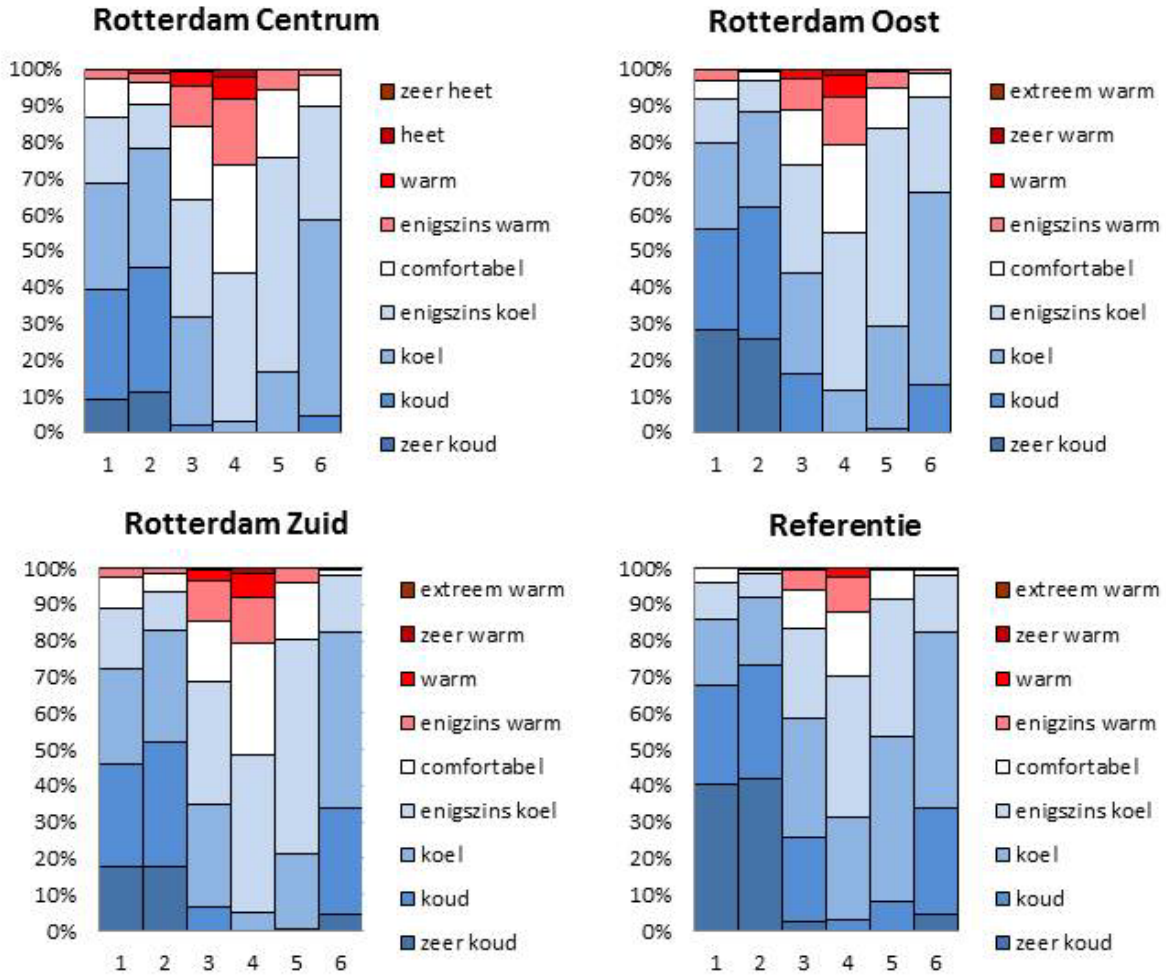
Classificatie voor thermisch comfort gebaseerd op de 'Physiologically Equivalent Temperature' (PET) (Höppe, 1999).

PET (°C)	Thermische perceptie	Mate van fysiologische stress
< 4	Erg koud	Extreme koudestress
4 - 8	Koud	Sterke koude stress
8 - 13	Koel	Matige koudestress
13 - 18	Matig koel	Lichte koudestress
18 - 23	Comfortabel	Geen hittestress
23 - 29	Matig warm	Lichte hittestress
29 - 35	Warm	Matige hittestress
35 - 41	Heet	Sterke hittestress
>41	Erg heet	Extreme hittestress

Uit de berekende PET -waarden werd voor elke maand een frequentieverdeling voor de verschillende comfortklassen gemaakt. De frequentieverdeling is berekend op basis van het totale aantal uren in een maand, waarbij geen onderscheid is gemaakt tussen het aantal uren overdag en na zonsondergang.

Het aantal uren dat kan worden geclassificeerd als uren met matige tot sterke hittestress was groter op de stadslocaties dan op de referentielocatie in het buitengebied. Juni en juli waren de maanden met de hoogste gemiddelde temperaturen in 2010. In juni waren er ongeveer 22 uren met matige en sterke hittestress, in juli

60 uren: d.i. 3% en 8% van het totale aantal uren voor elke maand (respectievelijk 720 en 740). Voor de referentielocatie was dit 0.6% (juni) en 2.7% (juli) of 4 en 20 uren. Aangezien de hoogste PET-waarden tussen 11:00 en 19:00 uur worden gevonden, betekent dit dat er in juni en juli 2010 achtereenvolgens drie en acht dagen met matige en sterke hittestress waren. Uren met extreme hittestress kwamen op grond van de hier gepresenteerde data en berekeningswijze niet voor.



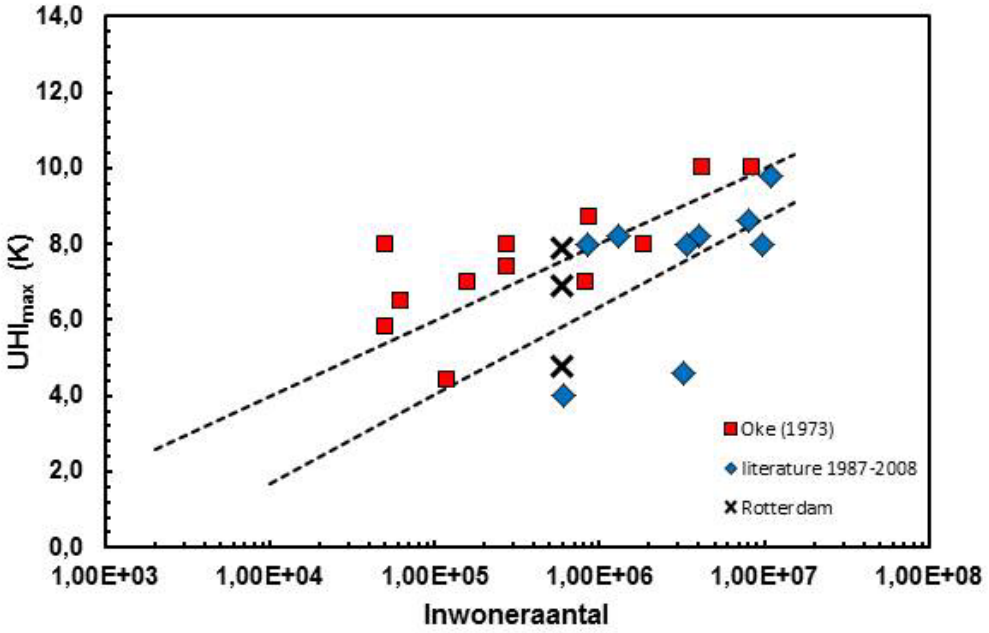
Figuur 3.7

Frequentieverdeling van de verschillende thermisch comfortklassen, voor de periode 15 april - 30 september 2010.

4 Discussie en conclusies

De meetgegevens van de weerstations in het Centrum en in Zuid van de periode eind augustus 2009 - 31 maart 2011 laten een groot nachtelijk stedelijk hitte-eiland zien, tussen 6 en 8 °C, tijdens kalme (windstille) en heldere zomerse dagen. Ondanks de ligging aan zee en de nabijheid van de Maas is het UHI-effect in Rotterdam dus aanzienlijk. De maximale UHI- intensiteit blijft gedurende een groot deel van de nacht gehandhaafd; daling treedt pas op aan het einde van de nacht, rondom zonsopkomst, wanneer de temperatuur in het buitengebied snel stijgt. In vergelijking met het buitengebied blijft het dus 's nachts in de stad relatief warm.

De resultaten van het meetnet bevestigen het beeld dat uit metingen met de mobiele meetplatforms in 2009 is verkregen (Heusinkveld et al., 2010). Ook zijn zij in overeenstemming met analyses van gegevens van weeramateurs (Ronda et al., 2010; Steeneveld et al., 2011). Zoals figuur 4.1 laat zien is de grootte van het UHI-effect van Rotterdam is vergelijkbaar met die van andere Europese steden. Ook in de wintermaanden trad soms een behoorlijk sterk UHI op. In deze periode wordt er in steden meer warmte geproduceerd voor verwarming. Enige voorzichtigheid met de interpretatie van met name de winterdata is echter geboden, omdat specifieke meteorologische omstandigheden (mistvorming, frontpassages) die in de winterperiode relatief vaak voorkomen soms tot een schijnbaar sterk UHI kunnen leiden. Dit is een onderwerp voor verdere studie.



Figuur. 4.1

Relatie tussen UHI (uitgedrukt als UHI_{max} in °C) en stadsgrootte uitgedrukt in inwoneraantal. De UHI_{max} (95 percentiel-waarden) voor Rotterdam is hier vergeleken met maximum UHI intensiteiten gerapporteerd voor andere Europese steden. ■ Resultaten van Oke (1973); ¨ Literatuurresultaten 1987-2006 (Van Hove et al. 2010); x UHI_{max} voor Rotterdam verkregen uit het meetnet voor de zomermaanden (juni, juli, augustus) in 2010. Stippellijnen: lineaire regressielijnen berekend voor de resultaten van Oke (1973) en voor literatuurresultaten 1987-2006 (r^2 = 0.57 en 0.32) (Van Hove et al., 2011).

De resultaten geven een indicatie dat vooral in dichtbebouwde delen van Rotterdam de zomerwarmte door de mens ook al in het huidige klimaat als minder aangenaam of belastend kan worden ervaren op een flink aantal zomerdagen. Omdat de berekeningen op een standaardwijze voor een relatief jonge man in zomerkleding zijn uitgevoerd zal de belasting voor meer gevoelige groepen groter zijn. Denk daarbij aan ouderen of werknemers die in de buitenlucht een grote inspanning moeten leveren. In een toekomstig warmer klimaat zullen zomerse en tropische dagen en de daarmee gepaard gaande belasting door warmte vaker voorkomen. Ook verdergaande verstedelijking in de regio Rotterdam kan een negatief effect hebben door een effect op het regionale achtergrondklimaat.

Een nadere analyse van de meteorologische meetgegevens van het stadsklimaat gecombineerd met modelsimulaties zijn nodig om de werking van het UHI in Rotterdam nader te analyseren. Hoewel de achterliggende factoren van het UHI redelijk goed bekend zijn, is de precieze combinatie van en balans tussen die factoren voor elke stad weer anders. Stadsopbouw, ligging, relatie met de omgeving, en vele ander factoren die voor het UHI effect verantwoordelijk zijn spelen daarbij een rol. Kennis over de precieze werking is nodig om effectieve adaptatiestrategieën en -maatregelen te kunnen ontwikkelen. Dit is onderwerp van thema 4 Climate Proof Cities, van de 2de fase van het Kennis voor Klimaat programma. De huidige veertien weerstations in en om Rotterdam vormen een onschatbare bron van meetgegevens waarmee de in dit rapport gepresenteerde eerste analyses verder uitgebreid en verfijnd kunnen worden. Behalve voor monitoring kan het meetnet in combinatie met andere databronnen worden gebruikt voor processtudies, bij het maken van regionale weersverwachtingen en voor modelontwikkeling.

4.1 Conclusies

- Het hitte-eiland effect is maximaal in de zomermaanden. Maar ook in de wintermaanden kan het effect aanzienlijk zijn. Enige voorzichtigheid met de interpretatie van de winterdata is echter geboden, omdat specifieke meteorologische omstandigheden soms tot een schijnbaar groot UHI-effect kunnen leiden.
- De maxima voor de UHI intensiteit die op kalme, heldere zomerse dagen in Rotterdam worden bereikt, zijn aanzienlijk en vergelijkbaar met andere Europese steden.
- De maximale UHI-intensiteit blijft gedurende een lange tijd (ca. 8 uur) bestaan; de intensiteit neemt pas rond zonsopkomst snel af waarbij een minimum of zelfs een negatieve waarde wordt bereikt. De maximum UHI-intensiteit wordt doorgaans bereikt na zonsondergang, door een geringe afkoeling van de stad in vergelijking met het buitengebied. Dit is in overeenstemming met gegevens uit de literatuur.
- De globale straling (dit is de totale inkomende kortgolvige straling) was in de stad gemiddeld 14-19% lager in vergelijking met de referentielocatie in het buitengebied.
- Alleen in het centrum was de gemiddelde waterdampspanning duidelijk lager (-5%) dan in het buitengebied.
- De windsnelheid is op de drie stadslocaties gemiddeld beduidend lager (>50%) dan op het referentiestation.
- De resultaten zijn in overeenstemming met de resultaten die met de bakfietsen zijn verkregen en uit analyses van gegevens van weeramateurs.
- De resultaten leveren een indicatie dat vooral in dichtbebouwde gebieden van Rotterdam het door de mens beleefde thermisch comfort al een probleem is of kan worden. Het lijkt verstandig te zijn om hiermee rekening te houden, tegen de achtergrond van een toekomstig klimaat met meer extreem warme dagen en verdergaande verstedelijking in de regio.

Dankwoord

De auteurs zijn Willem van Bommel van Gemeentewerken Rotterdam zeer erkentelijk voor zijn inzet bij de realisatie en onderhoud van het meetnet. Verder bedanken we Lissy Nijhuis en Jos Streng van de Gemeente Rotterdam voor de begeleiding van dit project.

Referenties

Heusinkveld, B.G., L.W.A. van Hove, C.M.J. Jacobs, G.J. Steeneveld, J.A. Elbers, E.J. Moors en A.A.M. Holtslag, 2010. Use of Mobile platform for assessing urban heat stress in Rotterdam. Proceedings of the 7the Conference on Biometeorology. Albert-Ludwigs-University of Freiburg, Germany, 12-14 April 2010, 433-438. www.meteo.uni-freiburg.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.

Gemeentewerken Rotterdam, 2011. Hittestress in Rotterdam. Eindrapport. Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat (KvK), rapport KvK/039/2011, ISBN 978-94-90070-44-1, Stichting Kennis voor Klimaat, Utrecht/Wageningen.

Matzarakis, A., F. Rutz en H. Mayer, 2007. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - Application of the RayMan model. International Journal of Biometeorology 51, 323-334.

Oke, T.R., 2006. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Instruments and observing methods, 81, Canada. World Meteorological Organization.

Ronda, R., G.J. Steeneveld en B. van Hove, 2011. *Modelsimulaties van het stadsklimaat van Rotterdam. Rapport Wageningen University in het kader van het Heat Stress in the City of Rotterdam project (HSRR05, KvK 1ste fase). 14 pp.*

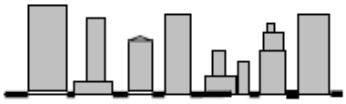
Steeneveld, G.J., S. Koopmans, B.G. Heusinkveld, L.W.A. van Hove en A.A.M. Holtsla*g, 2011. Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands. J. Geophys. Res., 116, doi: 10.1029/2011JD015988.*

Steeneveld, G.J. en L.W.A. van Hove, 2009. *Een eerste inschatting van het Urban Heat Island effect voor Rotterdam en omgeving - een modelstudie.* Rapport Wageningen University in het kader van het Heat Stress in the City of Rotterdam project (HSRR05, KvK 1ste fase). *14 pp.*

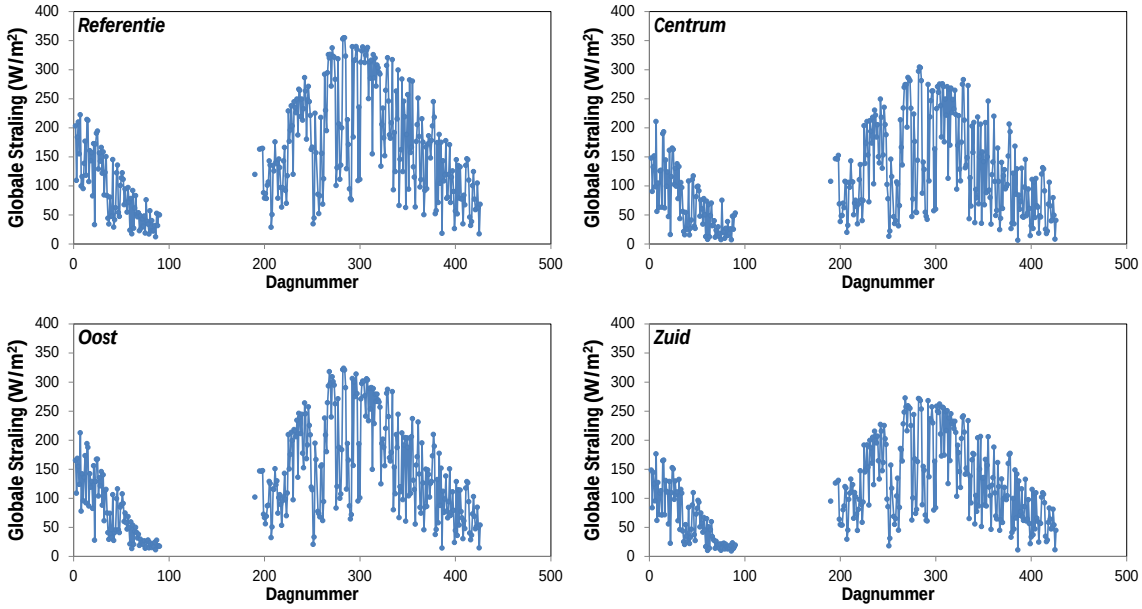
Hove, B. van, G.J. Steeneveld, C. Jacobs, H. ter Maat, B. Heusinkveld, J. Elbers, E. Moors en B. Holtslag, 2010. *Modelling and observing urban climate in the Netherlands. COM29 project.* KvR report number KvR 020/10, ISBN/EAN 978-90-8815-020-3. 60 pp.

Hove, L.W.A. van, G.J. Steeneveld, C.M.J. Jacobs, B.G. Heusinkveld, J.A. Elbers, E.J. Moors en A.A.M. Holtslag, 2011. *Exploring the Urban Heat Island Intensity of Dutch cities; Assessment based on a literature review, recent meteorological observations and datasets provided by hobby meteorologists*. Wageningen, Alterra, Alterra-report 2170, 60 pp.

Bijlage I Urban Climate Zone classificatie (Oke, 2006)

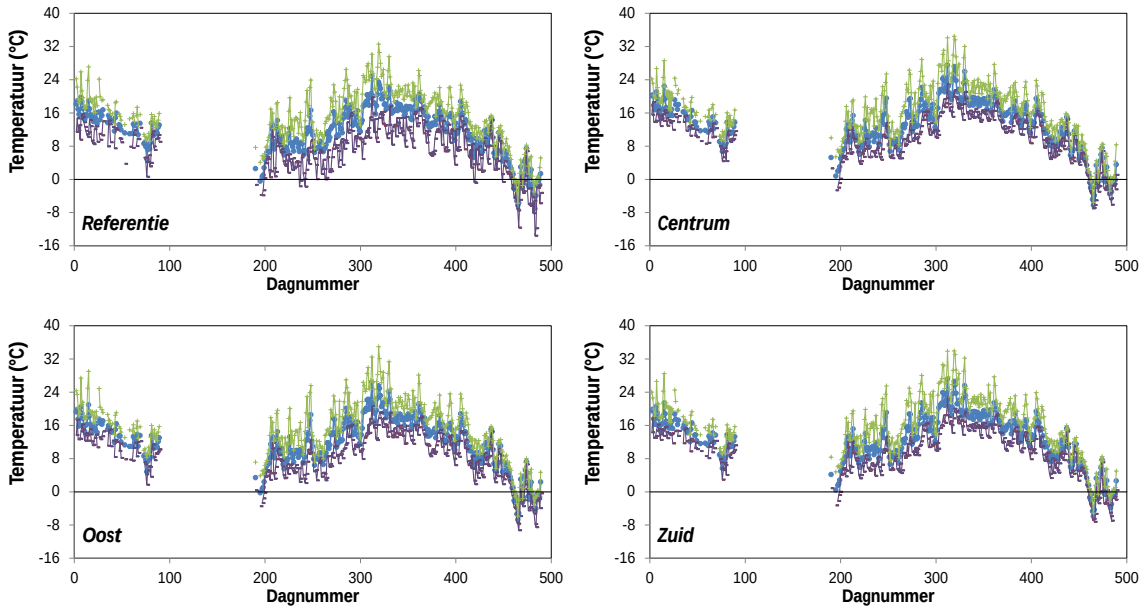
Urban Climate Zone, UCZ[1]	*Image*	*Rough-ness class*[2]	*Aspect ratio*[3]	*% Built (imperm-eable)*[4]
1. *Intensely developed urban with detached close-set high-rise buildings with cladding, e.g. downtown towers*		8	> 2	> 90
2. *Intensely developed high density urban with 2 – 5 storey, attached or very close-set buildings often of brick or stone, e.g. old city core*		7	1.0 – 2.5	> 85
3. *Highly developed, medium density urban with row or detached but close-set houses, stores & apartments e.g. urban housing*		7	0.5 – 1.5	70 - 85
4. *Highly developed, low or medium density urban with large low buildings & paved parking, e.g. shopping mall, warehouses*		5	0.05 – 0.2	70 - 95
5. *Medium development, low density suburban with 1 or 2 storey houses, e.g. suburban housing*		6	0.2 – 0.6, up to >1 with trees	35 - 65
6. *Mixed use with large buildings in open landscape, e.g. institutions such as hospital, university, airport*		5	0.1 – 0.5, depends on trees	< 40
7. *Semi-rural development, scattered houses in natural or agricultural area, e.g. farms, estates*		4	> 0.05, depends on trees	< 10

Bijlage II Overzicht meetresultaten periode 25 augustus 2009 - 31 maart 2011



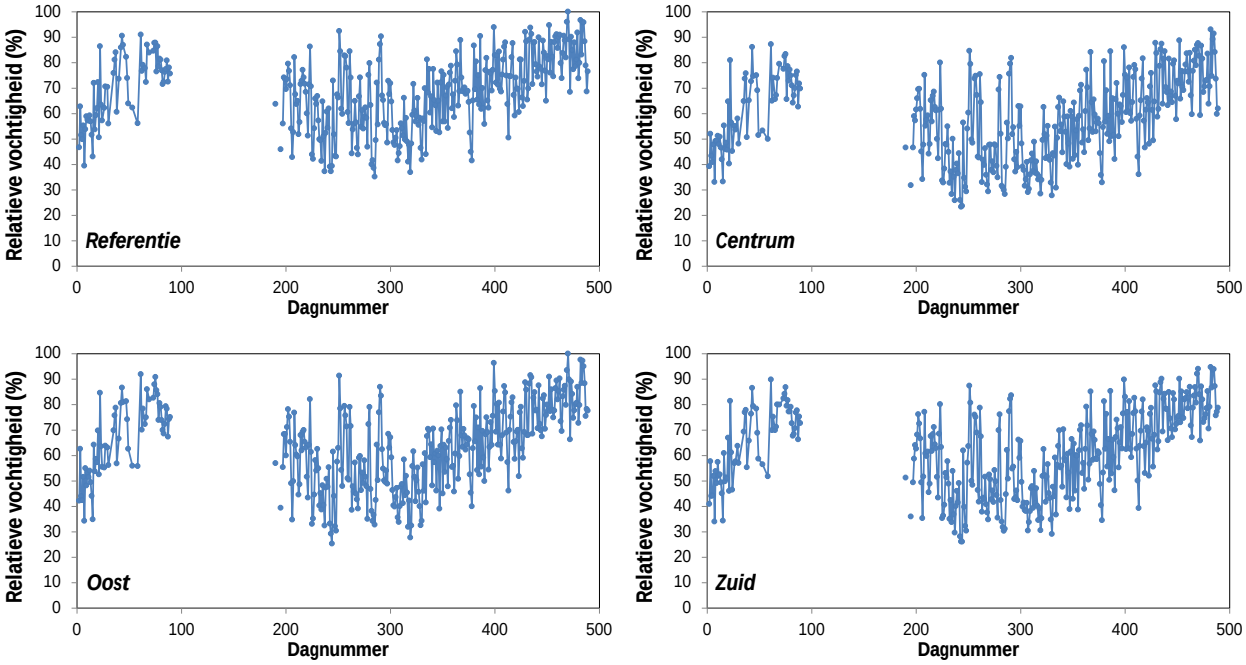
Figuur II.1

Etmaalgemiddelde globale straling (in W m^{2}) voor de drie meetlocaties in de stad Rotterdam (Centrum, Oost, Zuid) en voor de referentielocatie ten noorden van Rotterdam. Alleen dagen met een volledige reeks betrouwbare stralingswaarnemingen (48 halve uren) zijn opgenomen (320 dagen). Zie ook de hoofdtekst. Dag 1 markeert de start van de metingen op 25 augustus 2009.



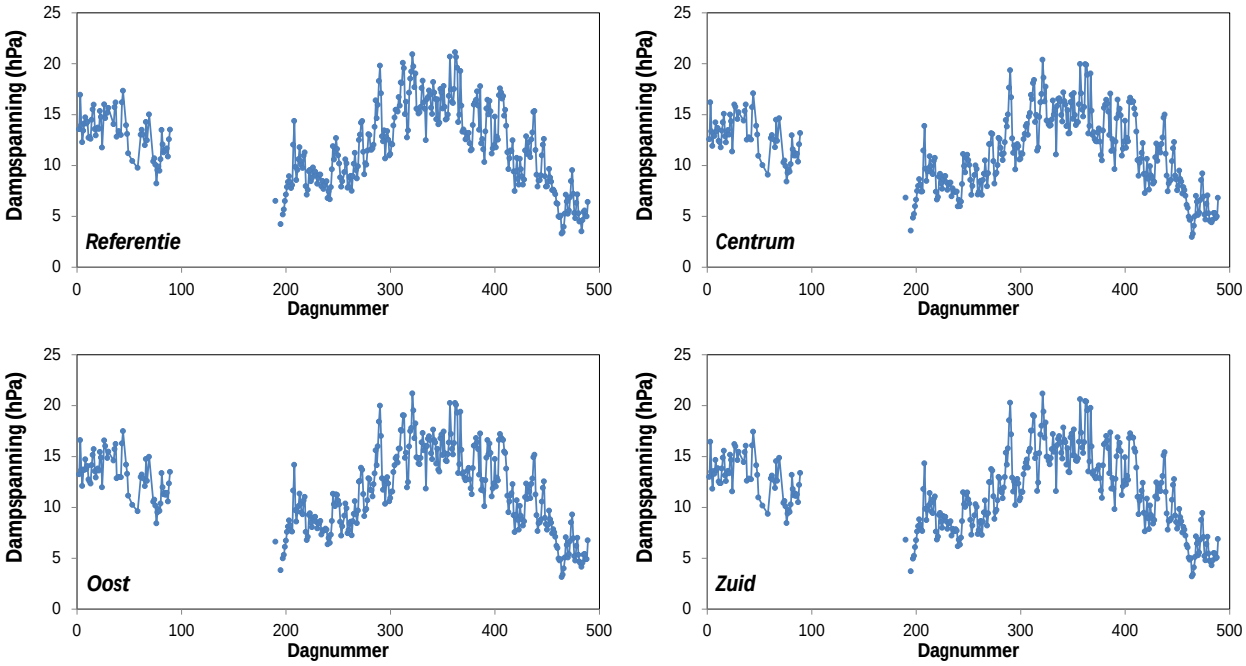
Figuur II.2

Etmaalgemiddelde (·), minimum (−) en maximum (+) luchttemperatuur (°C) voor de drie meetlocaties in de stad Rotterdam (Centrum, Oost, Zuid) en voor de referentielocatie ten noorden van Rotterdam. Alleen dagen met een volledige reeks betrouwbare temperatuurwaarnemingen (48 halve uren) zijn opgenomen (358 dagen). Zie ook de hoofdtekst. Dag 1 markeert de start van de metingen op 25 augustus 2009.



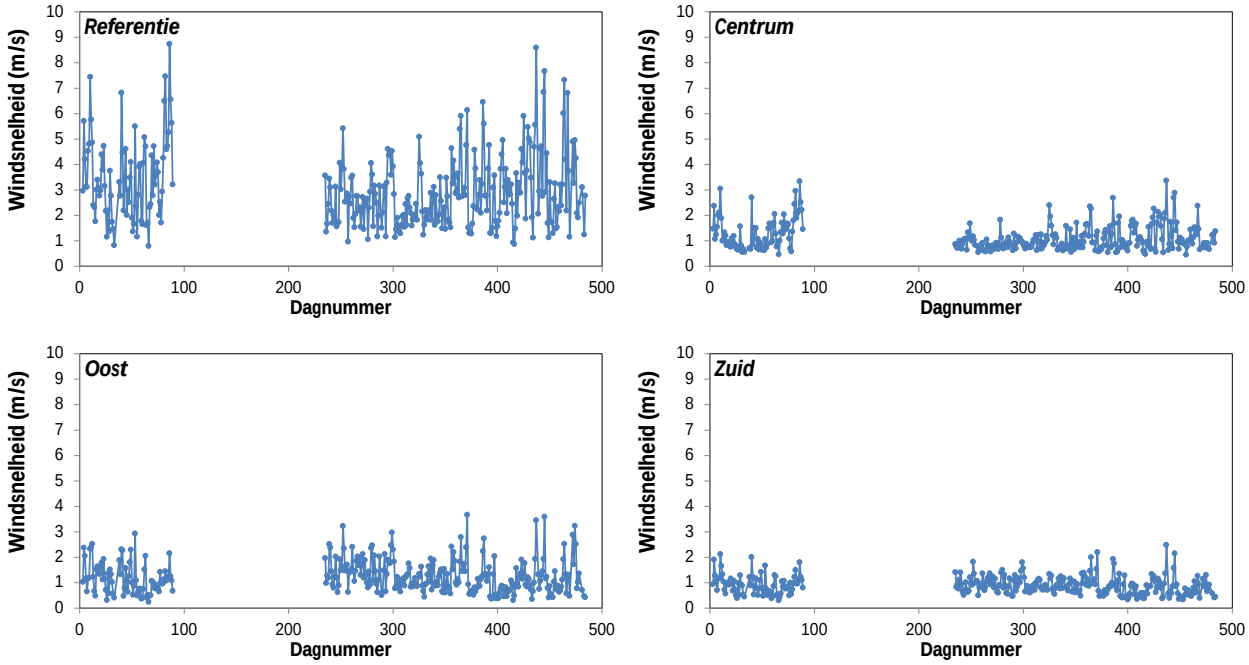
Figuur II.3

Minimum relatieve luchtvochtigheid (%) gedurende een etmaal voor de drie meetlocaties in de stad Rotterdam (Centrum, Oost, Zuid) en voor de referentielocatie ten noorden van Rotterdam. Alleen dagen met een volledige reeks betrouwbare luchtvochtigheidswaarnemingen (48 halve uren) zijn opgenomen (358 dagen). Zie ook hoofdtekst. Dag 1 markeert de start van de metingen op 25 augustus 2009.



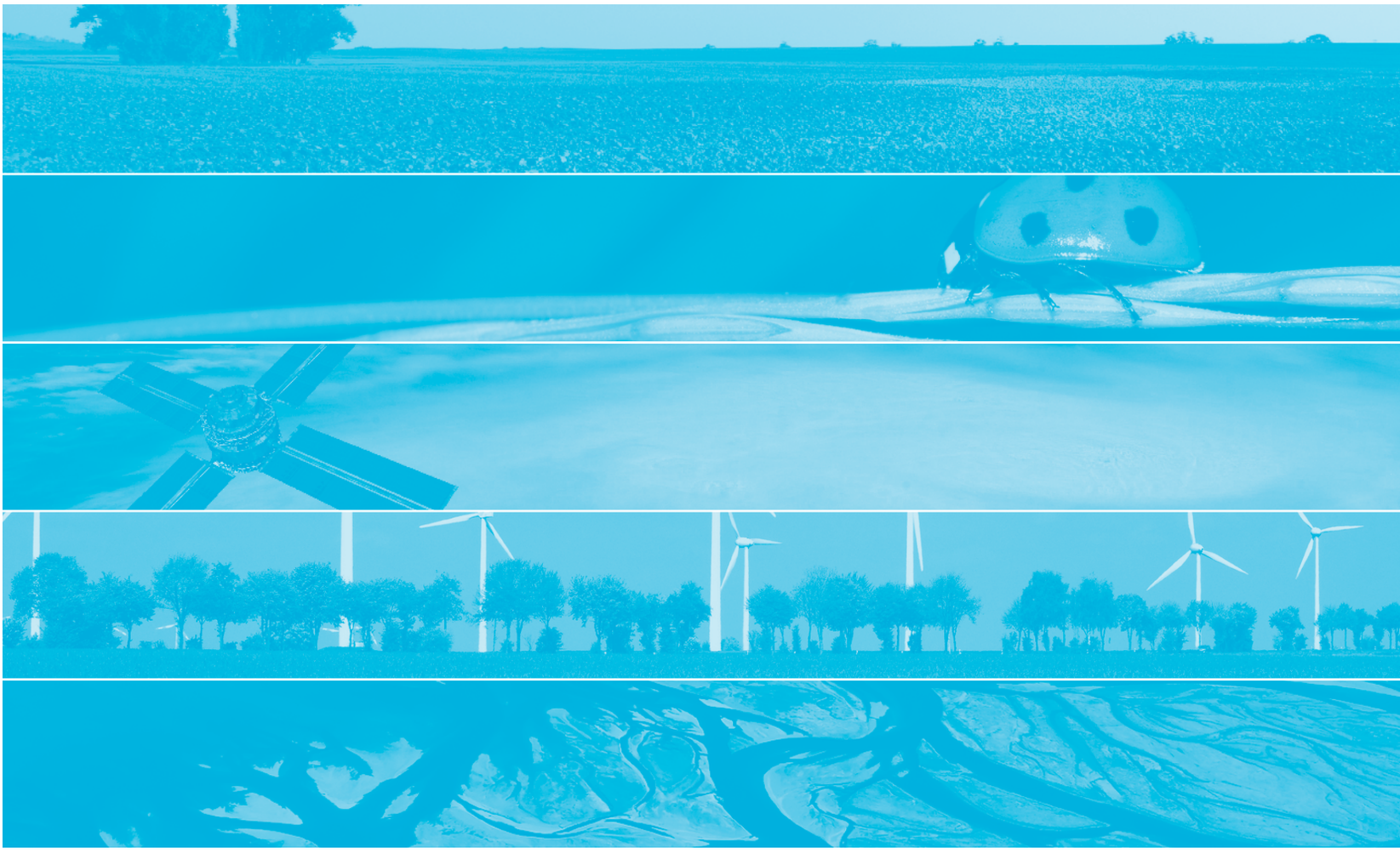
Figuur II.4

Etmaalgemiddelde waterdampspanning (hPa) voor de drie meetlocaties in de stad Rotterdam (Centrum, Oost, Zuid) en voor de referentielocatie ten noorden van Rotterdam. Alleen dagen met een volledige reeks betrouwbare luchtvochtigheidswaarnemingen (48 halve uren) zijn opgenomen (358 dagen). Zie ook hoofdtekst. Dag 1 markeert de start van de metingen op 25 augustus 2009.



Figuur II.5

Etmaalgemiddelde windsnelheid (m/s) voor de drie meetlocaties in de stad Rotterdam (Centrum, Oost, Zuid) en voor de referentielocatie ten noorden van Rotterdam. Alleen dagen met een volledige reeks betrouwbare windwaarnemingen (48 halve uren) zijn opgenomen (328 dagen). Zie ook hoofdtekst. Dag 1 markeert de start van de metingen op 25 augustus 2009.



Alterra is onderdeel van de internationale kennisorganisatie Wageningen UR (University & Research centre). De missie is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen negen gespecialiseerde en meer toegepaste onderzoeksinstituten, Wageningen University en hogeschool Van Hall Larenstein hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 40 vestigingen (in Nederland, Brazilië en China), 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de vooraanstaande kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen natuurwetenschappelijke, technologische en maatschappijwetenschappelijke disciplines vormen het hart van de Wageningen Aanpak.

Alterra Wageningen UR is hèt kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.