

Het warmte-eiland effect en thermisch comfort in Nederlandse steden

Gert-Jan Steeneveld, Sytse Koopmans, Bert van Hove, Bert Heusinkveld, Bert Holtslag.(Wageningen Universiteit)

In de afgelopen decennia is de verstedelijking in Nederland toegenomen en 90% van de bevolking woont nu in stedelijke gebieden. De urbanisatie veroorzaakt een toename in de interesse voor het 'weer' in de stad, dit in relatie tot onder andere de effecten op het menselijk thermisch comfort. De stadsmeteorologie richt zich voornamelijk op warme zomerdagen met mogelijke negatieve effecten op gezondheid en arbeidsproductiviteit. Stedenbouwers en ruimtelijke planners houden in hun ontwerp van nieuwe wijken steeds meer rekening met het stadsklimaat. In dit artikel kwantificeren we het warmte-eiland effect en het thermisch comfort voor Nederlandse steden.

In Nederland is in vergelijking tot de ons omringende landen het onderzoek naar het stadsklimaat beperkt (Heusinkveld et al 2010; Brandsma, 2010). Een bekende wetenschappelijke publicatie dateert uit de jaren zeventig, en rapporteert observaties door het IMAU met de "weerbus" voor Utrecht. De focus van het onderzoek lag op de

invloed van het stadsklimaat op de verspreiding van zwavelhoudende luchtverontreinigingen (Conrads, 1975). Op winterochtenden werden er trajecten door de stad gereden voor het bepalen van het warmte-eiland effect (hierna WEE, gedefinieerd als het verschil in 2 m temperatuur tussen de stad en een referentiestation buiten de stad). Hierbij werden

WEE waarden tot ongeveer 7 K gevonden. De resultaten werden vervolgens statistisch gerelateerd aan zonshoogte, windsnelheid, daggemiddelde temperatuur en inkomende zonnestraling. Onze studie breidt dit onderzoek uit naar langere reeksen met de nadruk op zomerse warme periodes.

De meteorologie van een stad

Steden verschillen meteorologisch in een aantal aspecten van hun omgeving (Oke, 1982), waardoor de temperatuur in de stad vooral 's nachts hoger kan uitpakken dan in het buitengebied. Ten eerste zijn steden erg efficiënt in het absorberen van zonnestraling door de herhaalde reflecties tegen gebouwen. Bij een hogere aspect ratio (hoogte van gebouwen gedeeld door straatbreedte) is het albedo van een stad als geheel relatief laag. Daarentegen wordt emissie van langgolvlige straling juist belemmerd bij een hoge aspect ratio doordat gebouwen een deel van hemel afdekken. Ten tweede is door de hogere temperaturen in de stad, de uitgaande warmtestraling daar hoger dan in het buitengebied. Verdamping is in de stad in het algemeen veel kleiner dan in het buitengebied, maar recente studies vonden ook een hoge



Figuur 1. Overzicht van stations van amateurmeteorologen en bijbehorende referentiestationen.

temporele variabiliteit in verdamping, mede door de irrigatie van tuinen en parken. Bij het modelleren van het weer in de stad is de verdamping dan ook de moeilijkste grootheid gebleken (Grimmond et al., 2010). Ten derde is er, afhankelijk van de omstandigheden, nog een bijdrage aan antropogene warmte, die typisch 25 Wm⁻² bedraagt, maar die sterk per stad en per seizoen kan verschillen. Bovendien kan deze waarde binnen de stad ruimtelijk en in de tijd erg variëren door de heterogene structuur van de stad en is de warmtecapaciteit van bebouwd terrein duidelijk hoger dan van vegetatie. Dit alles betekent dat een belangrijk deel van de warmte die overdag door gebouwen wordt opgenomen, 's nachts langzaam afgegeven wordt aan de atmosfeer. In het algemeen koelen steden daarom in de avond trager af dan het platteland, en wordt de maximale waarde van het WEE gemeten in de vroege avond, net na de avondtransitie.

Om de invloed van de stadsarchitectuur op het WEE en het thermisch comfort (zie kader) te evalueren, moet eerst een kwantitatief inzicht in het mechanisme van het WEE worden verkregen, dus: hoe groot is het WEE en wat is de invloed van stads grootte en stadsconfiguratie en –structuur? Hiervoor gebruiken we in deze studie observaties verzameld door een netwerk van amateurmeteorologen in Nederland en schatten we de middelwaarde en hogere percentielwaarden van het dagelijks maximale WEE. Ook schatten we de mate van overschrijding van advieswaardes voor menselijk thermisch comfort. Enerzijds biedt deze studie dus een referentie voor het WEE in het huidige klimaat, waartegen verschillen met een toekomstig klimaat kunnen worden vergeleken. Anderzijds biedt onderlinge vergelijking van het WEE in steden een mogelijkheid om de fysica achter het WEE te documenteren, te kwantificeren,

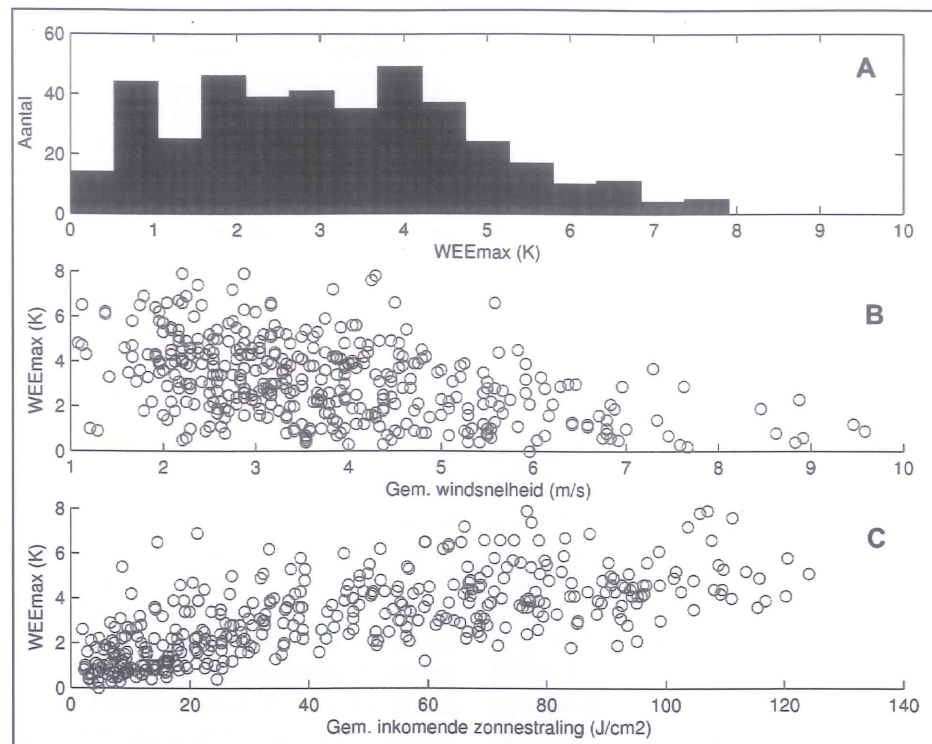
en te relateren aan aspect ratio, verhouding groen en wateroppervlak, inwoneraantal etc. Bovendien krijgen stedenbouwkundigen gereedschap in handen voor adaptatie-strategieën in bijvoorbeeld de hoeveelheid vegetatie, gekozen bouwmaterialen, en de verhouding van gebouwhoogtes en straatbreedtes.

Beschikbare data

Omdat metingen van het weer in de stad niet routinematig plaatsvinden, is er in Nederland een gebrek aan langdurige professionele waarnemingen in de stad. We gebruiken daarom de uurlijkse waarnemingen verzameld door een netwerk van 28 amateurmeteorologen verspreid over Nederland, en verdeeld over verschillende dorps- en stadsgroottes (tabel 1 en figuur 1). Om het WEE te bepalen zijn de stadstations gekoppeld aan het dichtstbijzijnde KNMI referentiestation, of een nabijgelegen KNMI referentiestation met het meest gelijkend landgebruik (tabel1). Bovendien zijn waarnemingen gefilterd op situaties met mist of neerslag. Beiden kunnen aanleiding geven tot hoge WEE als ze niet gelijktijdig plaatsvinden op het stads- en referentiestation. Verder zijn de temperaturen gecorrigeerd voor hoogteverschillen tussen het stads- en referentiestation volgens de droogadiabaat, maar in Nederland is deze correctie klein (maximaal 0.3 K in deze dataset). Naast de meteostations van amateurmeteorologen, gebruiken we ook observaties van een recent opgezet professioneel meteorologisch meetnet in Rotterdam (Van Hove et al., 2010). Eén station staat opgesteld in het centrum, nabij het Weena, en twee andere stations in Rotterdam-Zuid (nabij Ahoy) en –Oost (in de Wijk Prins Alexander). Hiermee verkrijgen we inzicht in de ruimtelijke variatie van het stadsklimaat.

Om meer grip te krijgen op mechanismes achter het stadsklimaat op verschillende ruimtelijke schalen, volgen we het conceptuele model van Oke (1976) die de atmosfeer boven de stad indeelt in een "grenslaag", een

#	Stad	Aantal inwoners /1000	Start metingen	Einde metingen	Aantal dagen	Ventilatie (Y/N)	Referentie station	Afstand referentie (km)	Vegetatieoppervl a (%)	Wateroppervlak (%)	Locale klimaatzone volgens Steward and Oke, 2010
1	Rotterdam	588	12/2007	03/2009	254	N	Rotterdam	4.1	8.3	9.0	COMPACT HOOG
2	Rotterdam-Centrum	588	09/2009	09/2010	309	N	Oude Leede	7.5	4.9	1.0	COMPACT HOOG
3	Rotterdam-Oost	588	09/2009	09/2010	226	N	Oude Leede	10.3	12.8	8.5	OPEN LAAG
4	Rotterdam-Zuid	588	09/2009	09/2010	211	N	Oude Leede	11.7	5.5	1.0	COMPACT MIDDENHOOG
5	Den Haag	483	07/2007	04/2009	600	Y	Valkenburg (B)	17.3	22.8	2.7	OPEN LAAG
6	Delft	97	01/2007	03/2009	806	-	Rotterdam (A)	8.2	31.7	2.1	OPEN LAAG
7	Haarlem	149	12/2005	02/2008	249	Y	Schiphol (C)	9.4	17.2	3.2	COMPACT LAAG
8	Purmerend	79	01/2008	03/2009	708	N	Berkhout (D)	15.9	40.0	1.3	OPEN LAAG
9	Leeuwarden	94	01/2007	03/2009	747	Y	Leeuwarden (E)	2.3	33.7	0.9	EXTENSIVE LAAG
10	Apeldoorn	136	01/2008	06/2009	522	-	Deelen (F)	18.7	23.6	0.3	OPEN LAAG
11	Wageningen	35	01/2008	07/2010	826	N	Wageningen Univ. (G)	1.5	20.6	2.6	COMPACT LAAG
12	Heemskerk	39	01/2005	12/2008	1437	Y	Schiphol (C)	17.8	32.5	1.7	COMPACT LAAG
13	Heerhugowaard	50	01/2005	04/2009	1535	Y	Berkhout (D)	11.3	32.1	1.9	OPEN LAAG
14	Leiden	117	03/2004	03/2009	1978	Y	Schiphol (C)	26.7	3.6	4.5	COMPACT LAAG
15	Doornenburg	2.7	06/2007	06/2009	737	N	Deelen (F)	20.3	43.8	0.7	OPEN LAAG
16	Losser	23	01/2003	12/2008	2167	N	Twente (H)	8.0	21.0	0.1	OPEN LAAG
17	Damwoude	5.5	01/2005	04/2009	1536	Y	Leeuwarden (E)	18.3	56.1	0.6	EXTENSIVE LAAG
18	IJsselmuiden	12	07/2005	07/2009	1417	Y	Heino (I)	24.3	15.3	10.4	OPEN LAAG
19	Groningen	198	01/1999	03/2009	1823	N	Eelde (J)	13.1	23.4	2.2	OPEN LAAG
20	IJsselmonde	61	02/2008	10/2010	728	N	Rotterdam (A)	11.1	13.0	6.5	COMPACT MIDDENHOOG
21	Tilburg	204	08/2009	10/2010	435	Y	Gilze-Rijen (K)	10.1	46.6	0.5	COMPACT LAAG
22	Houten	47	07/2006	04/2009	959	Y	De Bilt (L)	7.6	33.2	-	OPEN LAAG
23	Voorburg	40	01/2006	12/2008	1072	Y	Rotterdam (A)	13.8	15.7	-	COMPACT LAAG
24	Assen	65	01/2007	03/2009	769	N	Eelde (J)	13.8	17.7	-	OPEN MIDDEL-HOOG
25	Gouda	71	06/2006	11/2009	1214	Y	Cabauw (M)	15.9	9.5	-	COMPACT LAAG
26	Rijnmond	12	05/2006	10/2010	1631	N	Rotterdam (A)	9.9	20.1	-	OPEN HOOG
27	Capelle a/d IJssel	65	02/2008	10/2010	966	Y	Rotterdam (A)	7.9	7.7	-	COMPACT LAAG



Figuur 2. Verdeling van het warmte-eiland effect voor de stad Apeldoorn (a), dagelijkse maximale WEE als functie van gemiddelde windsnelheid (b) en de dagelijks gemiddelde inkomende zonnestraling (c).

“oppervlaktelaag” en “canyonlaag”. De eerste omvat de hele turbulente laag boven de stad, terwijl de oppervlaktelaag bestaat uit dat deel waar de fluxen constant zijn met de hoogte. De canyonlaag bevindt zich onder het dakniveau van de straat. Deze indeling is van belang bij de interpretatie van de waarnemingen, omdat waarnemingen op straat- en dakniveau elk verschillend gedrag vertonen. Dakstations bemonsteren vooral eigenschappen van de oppervlaktelaag, terwijl straatstations zich in de canyon bevinden, en daarom meer representatief zijn voor onderzoeksvragen die zich richten op voetgangersniveau. Dakstations worden daarom apart geanalyseerd.

Rood, blauw en groen

Om de eigenschappen van het gemeten stadsklimaat te relateren aan het landgebruik in de stad, schatten we de hoeveelheid groene vegetatie en oppervlaktewater in de nabijheid van de stadstations door gebruik te maken van Googlemaps™ luchtfoto's in een gebied van circa 600x600 m. Omdat groene vegetatie en water elk een erg karakteristiek reflectiespectrum in het zichtbaar licht

hebben, kan uit de RGB waarden van de luchtfoto's een goede schatting gemaakt worden van deze fracties. Groene vegetatie reflecteert sterk in de groene band, en minder in de rode en blauwe band, terwijl de rode band meer reflecteert dan de blauwe band. Belangrijk om op te merken is dat dit goed werkt voor gezonde, groene vegetatie. Voor luchtfoto's buiten het zomerseizoen en in eventuele droge zomerperiodes kan een systematische afwijking ontstaan. Voor de 28 geselecteerde stations zijn echter altijd geschikte luchtfoto's beschikbaar. Deze methode is gevalideerd op een aantal luchtfoto's waarvoor de fracties groen en water exact bekend zijn. Voor groene vegetatie leverde dit een kleine bias van ~8% op, maar met een hoge correlatiecoëfficiënt. Voor de waterfractie bleek de bias slechts 2%, bij een correlatiecoëfficiënt van 0.99. Dus de methode om vegetatie- en waterfracties te schatten is geschikt voor het onderzoek.

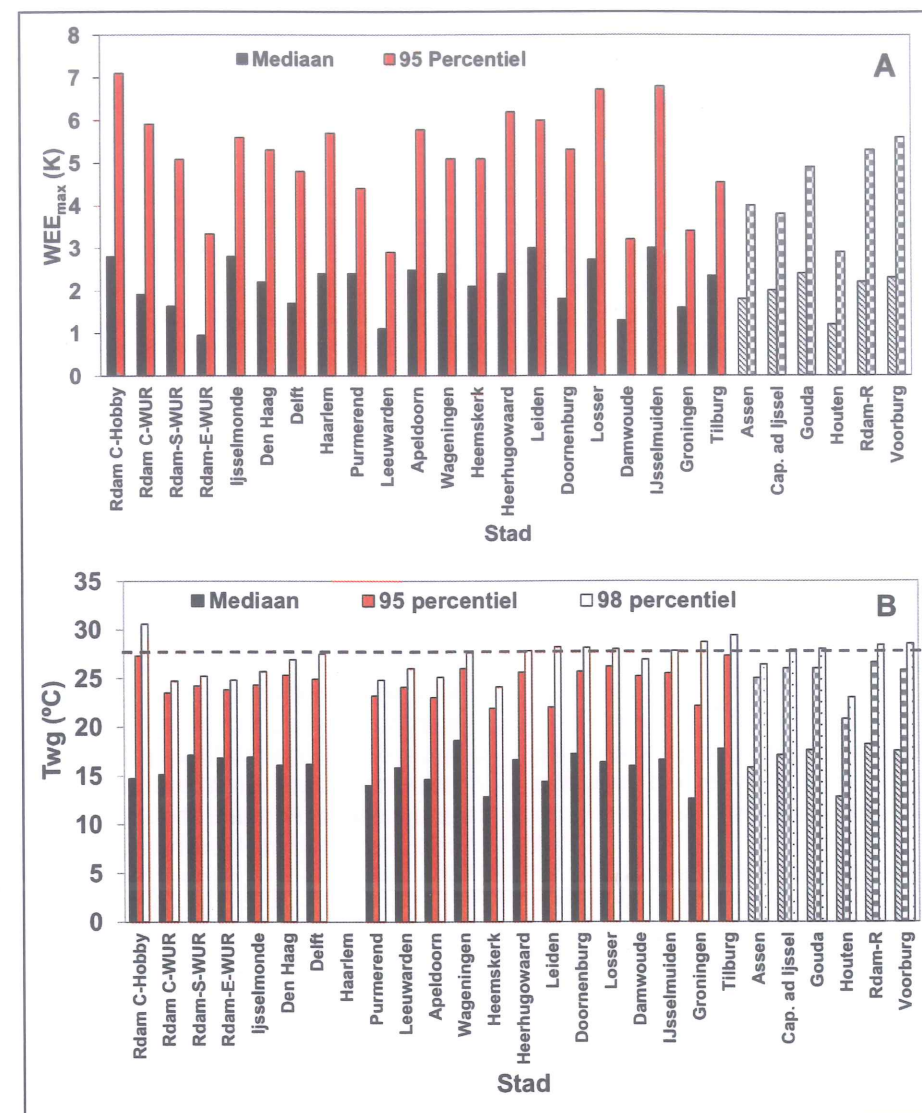
Warmte-eiland effect

We starten met Apeldoorn als typisch voorbeeld van een middelgrote stad in het midden van het land, voordat we de resultaten van de

verschillende steden samenvatten. Het amateurstation ligt op ongeveer 3 km afstand van het centrum. Figuur 2a geeft een histogram van de maximale dagelijkse waarden van het stadseffect (hierna WEE_{max}). We hebben gekozen voor deze piekwaarde omdat deze het grootste signaal in de dagelijkse gang geeft, en deze waarde dus met de minste ruis kan worden gerelateerd aan fysieke eigenschappen van de stad. Het is duidelijk dat WEE_{max} een scheve verdeling vertoont. WEE_{max} waarden kleiner dan 0.5 K komen relatief weinig voor, de mediaan bedraagt ongeveer 2.8 K en de staart van de verdeling is lang, en bereikt waarden tot bijna 8 K. Het 95 percentiel van WEE_{max} voor Apeldoorn bedraagt 5.8 K. Figuren 2b en 2c tonen dat de WEE_{max} exponentieel afneemt met de windsnelheid ($WEE_{max} \sim e^{-0.56U}$) en lineair toeneemt met de hoeveelheid inkomende zonnestraling (beiden bepaald op het referentiestation omdat deze een betere maat zijn voor de externe aandrijvers van de WEE dan de gemeten wind en zonnestraling in de stad zelf).

Als we de mediaan en het 95 percentiel van het WEE voor de verschillende steden vergelijken zien we dat er verschillen zijn tussen de steden. Opvallend is dat relatief kleine steden en dorpen als Damwoude (Friesland) en Doornenburg (bij Nijmegen) ook al een behoorlijk stadseffect laten zien (figuur 3a). Daarnaast vertonen de noordelijke stations in Leeuwarden, Groningen en Damwoude een opvallend gedrag met een lagere WEE, met name voor het hoge percentiel. De drie genoemde stations vertonen in de zomer een klimatologisch hogere windsnelheid die wordt veroorzaakt door de nabijheid van IJsselmeer en Waddenzee en de relatief lage oppervlakteruimte in Friesland. De sterkere wind kan het WEE substantieel verlagen. In Rotterdam bedraagt de mediaan WEE_{max} 2.8 K en het 95 percentiel 7.1 K.

Verder is opvallend dat er binnen Rotterdam relatief grote verschillen voorkomen. Het amateur



Figuur 3. Mediaan en 95 percentiel van de dagelijkse maximale WEE (panel a), en mediaan, 95- en 98-percentiel van de dagelijkse maximale T_{wg} (panel b). De zwarte gestreepte lijn geeft $T_{wg} = 27.7^\circ\text{C}$ aan, ondergrens het stressgebied. Dakstations zijn aangegeven met arcering.

meteorologisch station en het WUR station geven de hoogste en vergelijkbare waarden in het centrum. Het zuid- en ooststation laten lagere waarden voor de WEE_{max} zien. Dit wordt veroorzaakt door het opener terrein en ook doordat de wijk in het oosten veel groener is. Verschillen tussen het WUR station en het amateur meteorologisch station kunnen worden verklaard doordat de twee reeksen niet dezelfde jaren bevatten, en de WUR reeks nog kort is.

Ook komt duidelijk naar voren dat het 95 percentiel van de dakstations lager ligt dan voor de straatstations. De mediaan van de straatstations komt namelijk uit op 2.3 K en het 95

percentiel op 5.6 K. De dakstations komen lager uit met respectievelijk 2.1 en 4.5 K.

Thermisch comfort

Uit figuur 3b blijkt dat voor het thermisch comfort (zie kader) de typische waarden voor de mediaan van de dagelijkse maximale T_{wg} tussen de 15 en 18°C liggen, dus duidelijk buiten de gevarenzone. Echter, het 95 percentiel bereikt de grenswaarde al voor een aantal steden, met name Rotterdam en Tilburg. De grenswaarde wordt voor de helft van de straatstations bereikt of overschreden als we naar het 98 percentiel kijken. Behalve de grotere steden en steden in het binnenland, doen ook een aantal plaatsen relatief

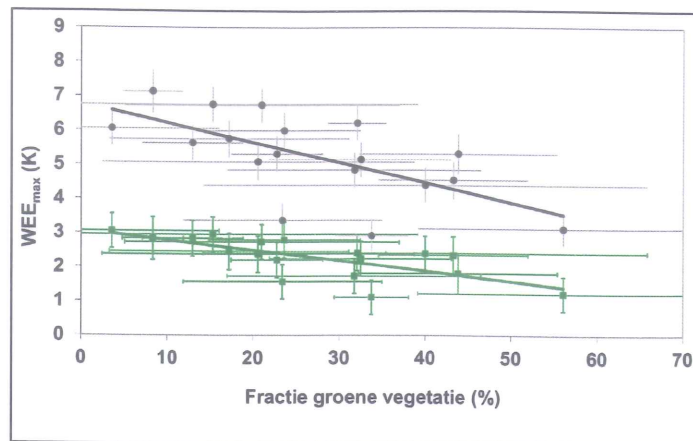
dichtbij de kust mee. De bijdrage van de vochtterm in vergelijking 1 speelt hier blijkbaar een niet onbelangrijke rol. De hogere percentielwaarden in de analyse voor Rotterdam komen geheel voor rekening van de zomermaanden (mei t/m september), en de mediaan, 95- en 98-percentiel bedragen respectievelijk 14.3°C, 27.3°C en 30.6°C. We kunnen dus stellen dat op 4.1% van de dagen de ondergrens van 27.7°C wordt overschreden, ofwel op ruim 15 dagen per jaar. Op een half procent van de zomerdagen in de dataset is $T_{wg} > 32.2^\circ\text{C}$. De dataset is echter te kort om harde uitspraken te kunnen doen over dergelijke zeer hoge percentielen. Verder valt op dat de WUR stations een hogere mediaan maar een lager 95- en 98- percentiel voor Rotterdam vertonen.

Groen en water

Figuur 4 laat het verband zien tussen de hoeveelheid groene vegetatie en de WEE_{max} . Het verband is sterker voor de 95 percentielwaarde, maar beide verbanden zijn significant voor een 95% betrouwbaarheidsinterval. Hierbij dient te worden opgemerkt dat we een redelijk grote foutenmarge voor de geschatte vegetatiefractie hebben gehanteerd. Redenen hiervoor zijn:

- 1) de vegetatiefractie is deels afhankelijk van de schaal waarin men geïnteresseerd is,
- 2) de vegetatiefractie maakt geen onderscheid tussen lage (gras) en hoge vegetatie (bomen), terwijl deze wel een verschillend effect op het microklimaat hebben. Immers, behalve door verdamping bieden bomen ook verkoeling door beschaduwing.

Ook open water in de stad zou verkoeling kunnen geven. Verdampend water kan in de middag een reductie van de voelbare warmtestroom geven, wat verkoelend werkt. Het verkoelende effect is echter sterk afhankelijk van de watertemperatuur. Gedurende een lange warme periode warmt het water op, waardoor het verkoelende effect afneemt. Water heeft een hoge warmtecapaciteit waardoor



Figuur 4. Mediaan en 95 percentiel van de dagelijks maximale WEE als functie van de hoeveelheid groen vegetatieoppervlak in de stad.

de temperatuur in de avond maar langzaam daalt. Na een lange warme periode kan de watertemperatuur dan zelfs hoger zijn dan de temperatuur in het aangrenzende stedelijk gebied. In deze dataset konden we geen duidelijk relatie tussen wateroppervlakte en WEE_{max} aantonen.

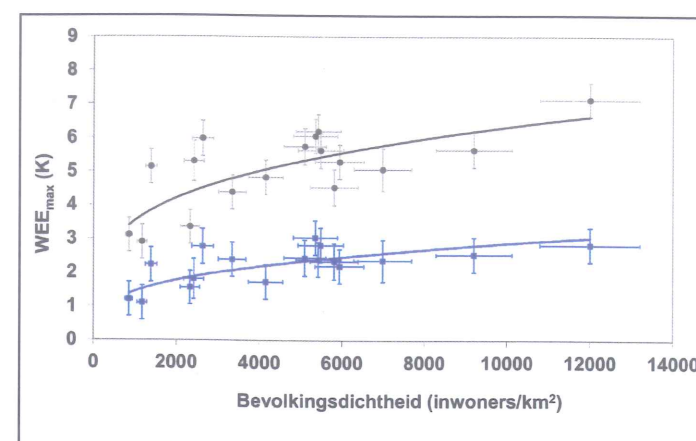
Bevolkingsdichtheid

Figuur 5 toont het verband tussen de bevolkingsdichtheid (CBS, 2009) en het WEE_{max} in de wijken waar deze werd gemeten. Hierbij moeten we bedenken dat de bevolkingsdichtheid een redelijke benadering is voor de gebouwendichtheid. WEE_{max} volgt voor de mediaan en 95 percentiel een machtsfunctie met een exponent respectievelijk rond de 0.33 ± 0.05 en 0.25 ± 0.04 . Deze waarnemingen

staan in contrast met eerdere bevindingen van Oke (1976) die een verband tussen WEE_{max} en de logaritme van het totale inwonertal vond. Voor onze dataset werd dit verband niet gevonden, en dit suggereert dat WEE ook sterk wordt beïnvloed door andere factoren als aspect ratio, hoeveelheid vegetatie, sky-view factor etc.

Extreme waarde statistiek

In veel studies naar het thermisch comfort in de stad zijn de waarnemingen beperkt tot korte episodes met warm zomerweer. Dergelijke data zijn vanwege de korte tijdseries echter niet a priori representatief. Als we ons realiseren dat WEE_{max} of thermisch comfort extreme waarden zijn in een lange continue reeks, opent dat nieuwe



Figuur 5. Mediaan en 95 percentiel van de dagelijks maximale WEE als functie van de bevolkingsdichtheid.

domein van extreme-neerslag studies en rivierafvoeren, en we exploreren hier of gebruik voor stadsklimaat ook kan. Na het fitten van de GEV verdeling kunnen terugkeertijden van extreme WEE gebeurtenissen worden geschat. Bovendien schatten we in de huidige studie ook de onzekerheid van de waarde van de terugkeertijd. Figuur 6 toont aan dat voor Apeldoorn de waarnemingen van WEE_{max} en T_{wg} allebei goed voldoen aan de GEV verdeling. Dit is bevestigd voor de andere steden in de dataset. De onzekerheidsmarge voor de terugkeertijd voor beide extreme waarden bedraagt circa een dag voor lage terugkeertijden, maar neemt sterk toe voor grotere terugkeertijden. Als voorbeeld is de terugkeertijd van de WEE_{max} van 7.8 K 100 dagen, maar de onzekerheid hierin is ongeveer 200 dagen. De onzekerheid is nog iets sterker voor T_{wg} . Dit maakt duidelijk dat er nog steeds behoefte is aan langere meetreeksen om zodoende de onzekerheid van deze terugkeertijden te beperken.

Conclusie

In deze studie is het warmte-eiland effect in Nederland gekwantificeerd met behulp van waarnemingen van amateurmeteorologen. Gemiddeld over de bestudeerde Nederlandse steden en dorpen bedraagt het dagelijkse maximale warmte-eiland effect 2.3 K, en het 95 percentiel 5.3 K. Beide nemen significant af met de hoeveelheid vegetatie in de stad. Hiervan kunnen stedenbouwers gebruik maken bij het ontwerp van nieuwe wijken. Een verband tussen

het warmte-eiland effect en de hoeveelheid wateroppervlak in de stad kon niet worden aangetoond.

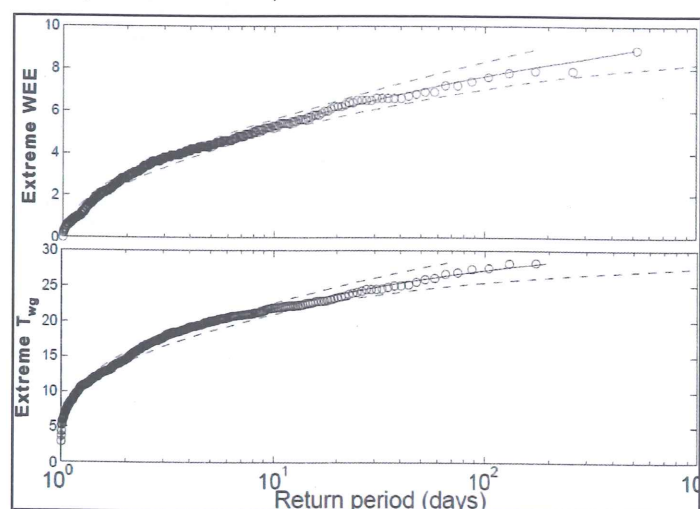
Graag bedanken wij de amateurmeteorologen voor het aanleveren van de gebruikte waarnemingen in de stad, en het KNMI voor de waarnemingen op de referentiestations. Bovendien zijn wij het Kennis voor Klimaat onderzoeksprogramma erkentelijk voor de financiële ondersteuning.

Het **thermisch comfort** wordt uitgedrukt in de door het Australische Bureau of Meteorology ontwikkelde approximated wet bulb globe temperature (T_{wg}) die de effecten van temperatuur en vochtigheid combineert:

$$T_{wg} = 0.567 T_a + 0.393 e + 3.94 \quad (1)$$

Hierin is T_a de luchttemperatuur (in °C) en e de waterdampdruk (in hPa). Er zijn voor Nederland geen algemene richtlijnen bij welke T_{wg} waarden preventieve acties moeten worden ondernomen. Uit Amerikaanse studies blijkt dat richtlijnen moeten afhangen van de kleding en activiteiten. Zo blijkt dat men bij licht werk voorzichtig moet zijn bij $T_{wg} > 30^\circ\text{C}$. Het algemene publiek blijft stressvrij bij $T_{wg} < 27.7^\circ\text{C}$. De stress neemt toe bij $27.7 < T_{wg} < 32.2^\circ\text{C}$, en $T_{wg} > 32.2^\circ\text{C}$ is ronduit gevaarlijk. Lichamelijke training dient vermeden te worden als $T_{wg} > 29.4^\circ\text{C}$.

Figuur 6. Extreme waarde verdeling als functie van de terugkeertijd van de dagelijkse maximale WEE (boven) en dagelijks maximale T_{wg} (onder). De gestreepte lijnen geven de onzekerheidsmarge voor de gefitte GEV verdeling, zoals afgeleid met de bootstraphmethode.



wegen voor de data-analyse. Om de mate van extremiteit van deze maximale WEE_{max} te schatten, en om te onderzoeken of deze grootheden ook voldoen aan de reguliere extreme waarde-statistiek, fitten we onze data in een zogenaamde Generalized Extreme Value (GEV) verdeling. Dit is een veelgebruikte techniek in het

Literatuur

- Brandsma, Th., 2010: Warmte-eiland effect van de stad Utrecht, Zenith nov. 2010.
- Centraal Bureau voor de Statistiek (2009): Buurtkaart met cijfers 2008, Den Haag/Heerlen, The Netherlands, 9p.
- Conrads, L.A., 1975: Observations of meteorological urban effects. The Heat Island of Utrecht. PhD Thesis University of Utrecht, Utrecht, Netherlands, 83 p.
- Grimmond, C.S.B., en co-auteurs, 2010: The international urban energy balance models comparison project: first results from phase 1, J. Appl. Meteor. Clim., 49, 1268-1292.
- 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 a mobile platform for assessing urban heat stress in Rotterdam. Proc. 7th Conf. Biometeorol. 12-14 April 2010 Freiburg, Germany, p 433- 438.
- Hove, B. van, J. Elbers, C. Jacobs, B. Heusinkveld, W. Jans, 2010: Het stadsklimaat in Rotterdam-Een eerste analyse van de meetgegevens van het meteorologische meetnet, WUR rapport, 29pp, http://promise.klimaatvoorruijme.nl/pro1/publications/show_publication.asp?documentid=5125&GUID=575196a0-0397-4b2e-9a0b-7d1d3e733774.
- Oke, T.R., 1976: The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands, Atmosphere, 14, 269-77.
- Oke, T.R., 1982: The energetic basis of the urban heat island, Q. J. Roy. Meteor. Soc., 108, 1-24.
- Stewart I.D., and T.R. Oke, (2010), Thermal differentiation of local climate zones using temperature observations from urban and rural field sites. In Preprints, Ninth Symposium on Urban Environment, August 2-6, Keystone, CO, U.S.A.
- Steeneveld, G. J., S. Koopmans, B. G. Heusinkveld, L. W. A. van Hove, and A. A. M. Holtslag (2011), Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands, J. Geophys. Res., 116, D20129, doi:10.1029/2011JD015988.