

# Ontwikkeling van een standaard hittekaart voor klimaatstresstesten

SYTSE KOOPMANS, BERT HEUSINKVELD, GERT-JAN STEENEVELD (WUR)

In de toekomst zullen hittegolven vaker voorkomen, met nadelige gevolgen voor de menselijke gezondheid, arbeidsproductiviteit, en kritieke infrastructuur. Vooral de stedelijke omgeving is hiervoor gevoelig. In het kader van het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie (DPRA) moeten alle overheden (gemeentes, provincies en waterschappen) in Nederland de komende twee jaar een klimaatstresstest doen om knelpunten omtrent hitte (en ook wateroverlast, droogte en overstromingen) in beeld te brengen. Hittekaarten zijn hierbij een cruciaal gereedschap. Op dit moment zijn er veel hittekaarten in omloop, gebaseerd op verschillende indicatoren. Sommige kaarten geven het aantal tropische nachten (minimumtemperatuur >20 °C) weer, andere gebruiken oppervlaktetemperaturen op basis van remote sensing. Daarom was de wens vanuit het DPRA om te beschikken over een standaardrecept waarmee een eenduidige hittekaart gemaakt kan worden. Met dit standaardrecept kunnen gebruikers (gemeenten, ingenieursbureaus) zelf een hittekaart voor een stad of gebied bepalen.

Wij hebben met een breed consortium van kennisinstellingen voorgesteld om hittekaarten te ontwikkelen op basis van de zogenaamde Physiological Equivalent Temperature (PET), de temperatuur die rekening houdt met de energiebalans van de mens. Drie componenten zijn belangrijk in de bepaling van deze temperatuur, namelijk luchttemperatuur, wind en straling. De waarde van de PET buiten is per definitie gelijk aan hoe de luchttemperatuur binnenshuis ervaren wordt bij afwezigheid van globale - en thermische straling en wind. PET is een gevoelstemperatuur die rekening houdt met de energiebalans van een mens. Voor de PET bestaan grenswaarden die samenhangen met thermofysiologische stress (zie Tabel 1) (Matzarakis et al., 2009).

Om de lokale omstandigheden zoals schaduw en wind zo goed mogelijk te representeren, en om maatwerk te kunnen leveren, is de kaart ontwikkeld op 1 m resolutie. De kaart is gemaakt op basis van geografische informatiebestanden op deze resolutie en routinematig beschikbare weergegevens. De stad Wageningen is als testbed gebruikt, omdat hiervoor waarnemingen ter validatie beschikbaar zijn. Dit heeft geresulteerd in een standaardhittekaart (voor overdag) voor een 1:1000 hittekaart over het zomerhalfjaar april-september (kans van 1:5.5 jaar) en een PET-overschrijdingskaart voor een representatief zomerhalfjaar.

## Afleiding empirisch PET-model

De volledige energiebalans voor een stedelijke omgeving is

| PET (°C) | Perceptie   | Fysiologisch stressniveau |
|----------|-------------|---------------------------|
| 0-4      | Heel koud   | Extreme koudstress        |
| 4-8      | Koud        | Sterke koudstress         |
| 8-13     | Koel        | Matige koudstress         |
| 13-18    | Fris        | Lichte koudstress         |
| 18-23    | Comfortabel | Geen stress               |
| 23-29    | Beetje warm | Lichte hittestress        |
| 29-35    | Warm        | Matige hittestress        |
| 35-41    | Heet        | Grote hittestress         |
| >41      | Zeer heet   | Extreme hittestress       |

Tabel 1. Overzicht van PET-klassen en bijbehorende grenswaarden van het fysiologische stressniveau (Matzarakis et al., 2009).

niet eenvoudig en bovendien te kostbaar om voor elke vierkante meter te berekenen. Stralingsintensiteiten zijn namelijk complex, en heel variabel in alle richtingen. Daarom is er gebruik gemaakt van een energiebalansmodel voor een mens, Rayman, dat straling in een complexe driedimensionale omgeving kan uitrekenen (Matzarakis et al., 2010). Met dit model zijn tien typische straatconfiguraties met een variërende sky-view factor (fractie open hemelgewelf) doorgerekend en gevoed met drie jaar aan meteorologische metingen van het nabijgelegen weerstation De Veenkampen van de WUR (Wageningen Universiteit). Met een regressie-analyse tussen een collectie van meteorologische en geografische invoergegevens en de PET-uitkomsten uit Rayman is een empirische benaderingsformule voor de PET afgeleid, die vervolgens kan worden toegepast voor het hele domein van de hittekaart. Dit empirisch PET-model heeft voor zon- en schaduwlocaties een  $R^2$  van 0.98. Voornamelijk de inkomende straling en de wind zijn belangrijke termen. Dit PET-model kan toegepast worden voor alle steden in Nederland (vergelijkbaar klimaat) met een nabijgelegen KNMI weerstation.

## Berekenen PET-kaart met meteorologische en geografische invoervariabelen

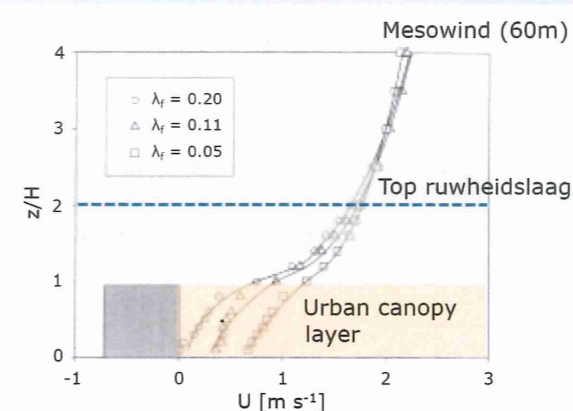
De meteorologische gegevens (windsnelheid en -richting, globale straling, relatieve vochtigheid en luchttemperatuur) zijn afkomstig van een naburig KNMI-referentieweerstation (hier Herwijnen). Voor gebruikers worden alleen KNMI-waarnemingen aanbevolen omdat het praktischer is data in één formaat te gebruiken en omdat deze een goede dekking hebben. Voor de validatie van de methode is echter gekozen om het nabijgelegen WUR-station de Veenkampen te gebruiken, om de achtergrondmeteorologie zo goed mogelijk te representeren. De luchttemperatuur in de stad is doorgaans hoger door het stedelijk warmte-eiland effect. Het maximale stedelijk warmte-eiland effect ( $UHI_{max}$ ) wordt geschat met een diagnostische vergelijking bestaande uit een stadsmorfologisch deel en een meteorologisch deel, zie vergelijking (1) (Theeuwes et al., 2017; Koopmans et al., 2018).

$$UHI_{max} = (2 - S_{vf} - F_{veg}) \sqrt[4]{\frac{S(T_{max} - T_{min})^3}{U}} \quad (1)$$

## Kader 1 – Wind in de stad

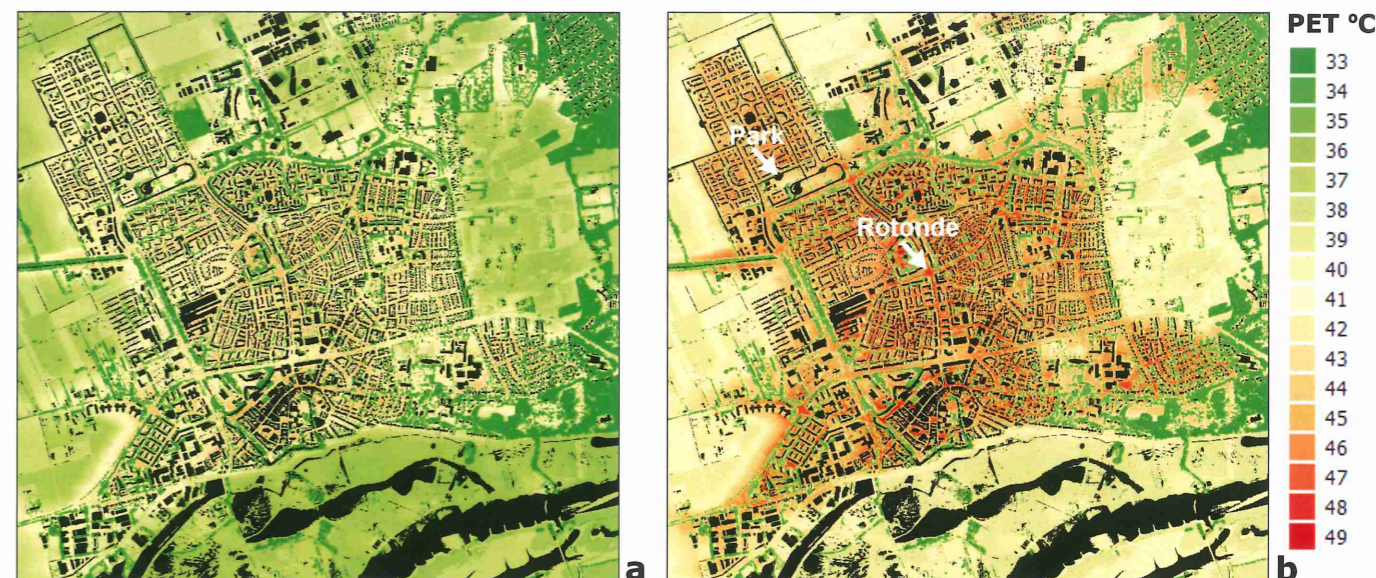
Op de meeste plaatsen in de stad waait het minder dan op het landelijke referentiestation, doordat het oppervlak door gebouwen ruwer is. De wind op leefniveau in de stad ( $u_{1,2}$ ) wordt met de MacDonald-methode bepaald door de dichtheid aan dwarsoppervlakken van gebouwen in de richting van de wind ( $\lambda$ ), de gebouwhoogte ( $H$ ) en de wind op gebouwhoogte ( $u_H$ ), zie vergelijking 2. De wind in straten ('urban canopy layer' in Figuur 1) neemt exponentieel af als men dichterbij de grond komt. In de ruweidslaag boven het dakniveau wordt het gebruikelijke logaritmische windprofiel aangesloten op het exponentiele windprofiel. Als uitbreiding op de MacDonald-methode is ook het dwarsoppervlak van bomen met een transparantiefactor meegeenomen in de windberekening.

$$u_{1,2} = u_H \exp\left(9.8\lambda\left(\frac{1.2}{H} - 1\right)\right) \quad (2)$$



Figuur 1. Schema van de windsnelheid in en boven de stad (figuur aangepast uit MacDonald, 2000). De hoogte op de y-as is genormaliseerd ten opzichte van de gebouwhoogte. Het grijze gebied geeft de spreiding aan van de top van de ruweidslaag. Deze is afhankelijk van de dichtheid van de dwarsoppervlakken in de richting van de wind ( $\lambda$ ).

$S$  is de inkomende straling in  $K m s^{-1}$ , ( $T_{max} - T_{min}$ ) de dagelijkse gang in temperatuur ( $^{\circ}C$ ) en  $U$  de gemiddelde windsnelheid ( $m s^{-1}$ ), allen gemeten op het referentiestation.  $S_{vf}$  is de sky-view factor en  $F_{veg}$  de vegetatiefraction. Beiden zijn ruim-



Figuur 2. PET-hittekaarten voor 1 juli 2015 10-16 UTC (12:00-18:00 lokale tijd) bepaald met de meteorologie van het referentiestation Herwijnen. a) huidig klimaat, b) toekomstig klimaat (2050), translatie naar het WH-scenario. De rotonde en het park (Wageningen Noordwest) zijn voorbeelden van respectievelijk warme en koele locaties.

telijk bepaald voor ruimtelijke brongebieden (footprints) in de vier hoofdwindrichtingen. Het maximale UHI wordt over het algemeen 4 uur na zonsondergang waargenomen (Landsberg; 1981). Op de andere uren is het stedelijk warmte-eiland geïnterpoleerd met behulp van de karakteristieke dagelijkse gang van het UHI (Oke, 1982), rekening houdend met verschillende daglengten. De temperatuur in de stad wordt vervolgens uitgerekend door het UHI op te tellen bij de temperatuur van het achtergrondstation.

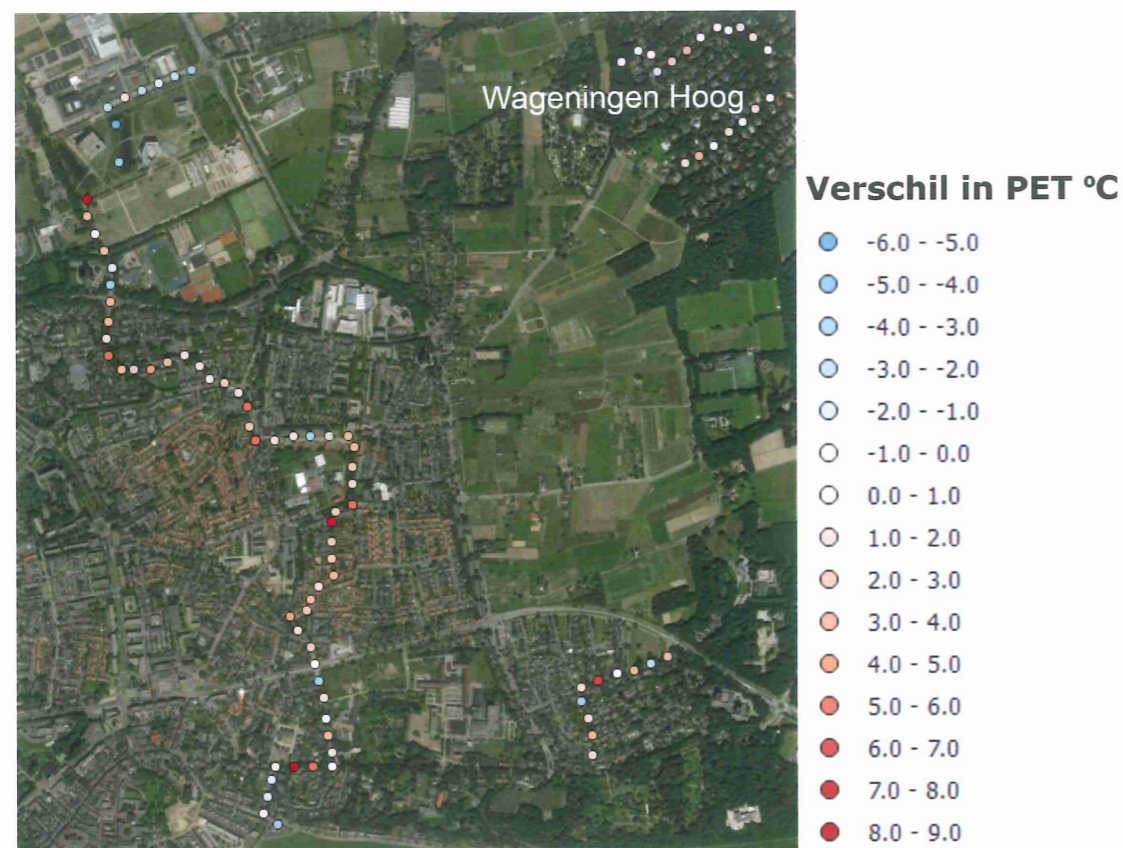
Vergeleken met het referentiestation is de wind op leefniveau op veel plaatsen in de stad en op locaties met veel bomen gereduceerd. De windsnelheid in de stad wordt geschat met een methode die rekening houdt met de 'urban canopy layer', die niet logaritmisch van aard is. (MacDonald, 2000, zie Kader 1). Ook de windsnelheid in de stad is berekend voor vier hoofdwindrichtingen met bijbehorende brongebieden. Een ander belangrijk aspect van de PET-vergelijking is of er op een bepaalde locatie zon of schaduw is. Dit wordt uurlijks bepaald met zonnekaarten, die worden gemaakt met informatie van zonnehoeken en hoogteinformatie uit het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN), met de GIS-module UMEP (Lindberg et al., 2019).

De PET-kaart is niet alleen berekend voor het huidige klimaat, maar ook voor het warmste klimaatsscenario (WH) in 2050. Hiervoor is de temperatuur en straling op uurwaarden bepaald volgens een uitbreiding op de methode van Molenaar et al. (2016) met gegevens van het KNMI (2015). Details over deze transformatie zijn te vinden in Koopmans et al. (2018).

## PET-hittekaart overdag

De PET-hittekaart overdag is ontwikkeld voor de warme zomerdag van 1 juli 2015 waarbij de PET-waarden tussen 10.00 – 16.00 UTC zijn gemiddeld voor Wageningen, zie Figuur 2. Door de uren voor de gehele middag mee te nemen representeert de kaart een gemiddelde hittebelasting en doet zij recht aan uurlijkse zon/schaduw-verschillen. De maximale PET-waarden, tot 46 °C in het huidige klimaat en 49 °C in 2050, worden gevonden op locaties met veel uren zon en waar de wind flink wordt afgeremd door een groot dwarsoppervlak van bebouwing. Deze plekken zijn voornamelijk te vinden bij hogere appartementen, rotondes en pleinen. Het koelst zijn de





Figuur 3. Verificatie van berekende PET-waarden in Wageningen op 2 augustus 2013 12 UTC.

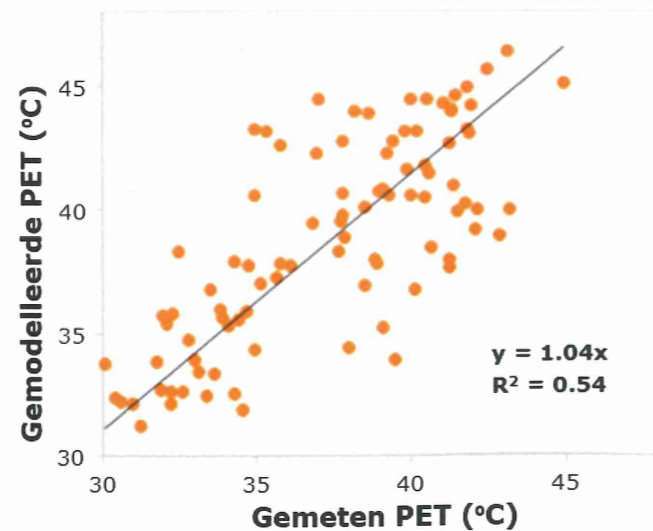
locaties onder bomen. Andere koele gebieden zijn open parken waar de wind niet teveel wordt afgeremd (park in de wijk Wageningen-Noordwest). Gemiddeld is de toename in PET in het WH-scenario 3.2 °C, waarbij de PET-toename op onbeschaduwde plekken circa 0.5 °C hoger is dan op beschaduwde plekken. Aan de warmte aan de westzijde van Wageningen is te zien dat de wind uit het oosten kwam. De wind is hier nog gereduceerd ten opzichte van het platteland wat tot een verhoging van de PET leidt.

De methode is geëvalueerd tegen bakfietsmetingen die op 2 augustus 2013 op een traject van circa 12 km door Wageningen zijn verzameld. De bakfiets is uitgerust met een weerstation inclusief stralingssensoren zodat de PET kan worden berekend uit de metingen (Heusinkveld et al., 2014). Deze zomerdag is qua warmte vergelijkbaar met 1 juli 2015. Voor de berekeningen zijn weergegevens van het nabij gelegen weerstation De Veenkampen (van de WUR) als invoer gebruikt. Figuur 3 laat op buurtniveau een goed beeld zien van de verschillen tussen de gemodelleerde en gemeten PET-waarden. De relatief koele gebieden van Wageningen Hoog – in het noordoosten van de stad – worden goed gemodelleerd. In de stad vertonen de gemodelleerde PET-waarden een licht positieve bias met enkele uitschieters naar boven. Op deze plekken werd er een hogere windsnelheid gemeten dan werd gemodelleerd, wat mogelijk verband houdt met windvlagen in de onstabiele atmosfeer die de MacDonald methode niet meeneemt. De wind in de stad is niet statisch en het is aannemelijk dat overdag de wind op deze locaties lager kan zijn. Ten slotte laat het spreidingsdiagram (Figuur 4) een goed verband zien en de reikwijdte van de gemodelleerde en gemeten PET-waarden komen ook goed overeen. De grote afwijkingen op bepaalde locaties lijken voornamelijk gerelateerd aan windsnelheidsverschillen. Er zullen dus meer validaties, bijvoorbeeld op andere warme dagen, gedaan moeten worden voor definitieve conclusies. Bij homogeen zonnig

weer, zoals tijdens deze validatie, is de stralingsbelasting vrij goed te simuleren. Straling kan nauwkeurig worden geschat met zonnekaarten die uit het AHN worden afgeleid.

#### PET-overschrijdingskaart boven de 29 °C

Vanuit klimatologisch perspectief is de PET-overschrijdingskaart interessanter dan een PET kaart voor één geselecteerde hittedag (Figuur 5), omdat dit probleemgebieden kwantitatiever in beeld brengt en een representatie geeft van accumulatie van hitte. Een analoge benadering wordt gehanteerd voor luchtkwaliteit, waar grenswaarden worden gehanteerd die per jaar een aantal keer overschreden mogen worden. Hier is het zomerhalfjaar 2013 gebruikt om het aantal uren op te tellen dat een PET-grenswaarde van 29 °C wordt overschreden. Vanaf deze grenswaarde wordt gesproken van matige hit-



Figuur 4. Spreidingsdiagram van gemodelleerde en gemeten PET-waarden.



Figuur 5. PET-overschrijdingskaarten. Aantal uurlijkse PET-overschrijdingen boven de 29 °C in 2013 (april tot en met september) bepaald met de meteorologie van het referentiestation Herwijnen. a) huidig klimaat, b) toekomstig klimaat (2050) via translatie naar het WH-scenario.

testress en kunnen er gezondheidsproblemen ontstaan, waaronder een verhoogde kans op overlijden (Nastos et al., 2012; Sharafkhani et al., 2018). Het jaar 2013 is representatief voor het huidige klimaat omdat de gemiddelde temperatuur en het aantal zomerse dagen dicht bij het klimatologisch gemiddelde liggen.

In het buitengebied vinden we circa 150 uur per jaar een PET > 29 °C overschrijding, tot 450 uren op windluwe en meestentijds onbeschaduwde plaatsen. Voor het WH-scenario wordt voor overwegend onbeschaduwde locaties een toename van 90-110 PET overschrijdingsuren verwacht. Voor plaatsen met veel schaduw en/of windrijke plaatsen is de toename duidelijk lager, namelijk tot circa 30 uren toename in beschutte locaties onder bomen.

#### Conclusies en perspectief

De gepresenteerde hittekaarten tonen de gevoelstemperatuur PET voor een hete zomerdag en het jaarlijkse aantal overschrijdingen (PET > 29 °C) op een resolutie van 1 meter. Hierbij zijn de weergegevens van een referentiestation met geografische data en gevalideerde methodes omgerekend naar een stedelijke omgeving. De PET-kaarten zijn voor één warme zomerdag gevalideerd. De reikwijdte van de gemodelleerde en gemeten PET komt goed overeen. De grootste onzekerheid ligt in de windbepaling in de stad. Enerzijds is de wind erg variabel in ruimte en tijd, wat een onzekere factor is in de validatie met instantane bakfietsmetingen. Anderzijds kan de windreductiemethode geen windstromingen of windschaduw rondom individuele gebouwen of bomen bepalen, maar alleen een gemiddelde reductie. Een logische vervolgstap is de ontwikkeling van een landelijke PET-hittekaart op basis van dit recept. Verdere ontwikkeling is mogelijk door rekening te houden met antropogene warmteproductie, albedo en droogte. Ook is de tijdsafhankelijke invloed van het langzaam opwarmen van waterpartijen op de omgevingstemperatuur gedurende een hitteperiode nog niet meegenomen. Hittekaarten zijn een middel om warmtegevoelige plekken in beeld te brengen en daarmee kan een risicodialoog gestart worden met relevante partijen.

#### Dankwoord

Wij danken Cor Jacobs (WEnR), Jeroen Kluck (HvA), Reinder Ronda (KNMI), Arjan Droste (WUR), Ellen Brand en Ton de Nijs (beiden RIVM) voor hun inbreng. Dit artikel is ontleend aan: Koopmans, Sytse; Heusinkveld, Bert; Steeneveld, Gert-Jan - Hoofdstuk 3: Recept ontwikkeling standaard hittestresskaart. In RIVM Brieffrapport 2019-0008: Ontwikkeling Standaard Stresstest Hitte, De Nijs, A.C.M et al., doi: 10.21945/RIVM-2019-0008.

#### Referenties

- Heusinkveld, B.G., Steeneveld, G.J., van Hove, L.W.A., Jacobs, C.M.J and A.A.M. Holtslag, 2017: Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by urban land use. *J. Geophys. Res. Atmos.* 119, 677–692.
- KNMI, 2015: Toelichting Transformatie tijdreeksen. [http://www.klimaatsscenario.nl/toekomstig\\_weer/transformatie/Toelichting\\_TP.pdf](http://www.klimaatsscenario.nl/toekomstig_weer/transformatie/Toelichting_TP.pdf)
- Koopmans S., Ronda R.J., Steeneveld G.J., Holtslag A.A.M. and A. Klein-Tank A, 2018: Quantifying the effect of different urban planning strategies on heat stress in current and future climates in the Netherlands, *Atmosphere*, 9, 353.
- Landsberg H.E., 1981: The urban climate. International Geophysics Series, 28, Academic Press, New York.
- Lindberg F., Grimmond C.S.B., Gabey A., Huang B., Kent C.W., Sun T., Theeuwes N., Jarvi L., Ward H., Capel-Timms I., Chang Y.Y., Jonsson P., Krave N., Liu D., Meyer D., Olofson F., Tan J.G., Wastberg D., Xue L., Zhang Z., 2018: Urban Multi-scale Environmental Predictor (Ump) - an integrated tool for city-based climate services. *Environmental Modelling and Software*, 99, 70-89.
- Matzarakis, A., De Rocco, M. and G. Najjar, 2009: Thermal bioclimate in Strasbourg – the 2003 heat wave. *Theor. Appl. Climatol.*, 98, 209-220.
- Matzarakis A., Rutz F. and H. Mayer, 2010: Modelling Radiation fluxes in simple and complex environments – Basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology* 54, 131-139.
- Molenaar R.E., Heusinkveld B.G., Steeneveld G.J., (2016): Projection of rural and urban human thermal comfort in the Netherlands for 2050. *Int. J. Climatol.*, 36, 1708–1723.
- MacDonald R.W., 2000: Modelling the mean velocity profile in the urban canopy layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 97, 25–45.
- Nastos, T.P. and A. Matzarakis, 2012: The effect of air temperature and human thermal indices on mortality in Athens, Greece. *Theor. Appl. Climatol.* 108:591–599.
- Oke T.R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 108(455): 1–24.
- Sharafkhani, R., Khanjani, N., Bakhtiari B., Jahani Y. and J.S. Tabrizi, 2018: Physiological Equivalent Temperature Index and mortality in Tabriz (The northwest of Iran). *Journal of Thermal Biology*, 71, 195-201.
- Theeuwes N.E., Steeneveld G.J., Ronda R.J. and A.A.M. Holtslag, 2017: A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in northwestern Europe. *Int. J. Climatol.*, 37, 443–454