

Hitte in de stad: belang van variabele windsnelheid in PET Hittekaarten

Quin Nieuwendijk (Wageningen University), Dorus Vlierboom (Witteveen+Bos), Gert-Jan Steeneveld (Wageningen University & Research), Srinidhi Gadde (ITC, Universiteit Twente) & Xuan Chen (Technische Universiteit Delft)

Hittekaarten zijn belangrijke instrumenten om 'hotspots' in steden aan te wijzen bij klimaat-stresstesten. Daarvoor wordt vaak gevoelstemperatuur gebruikt in plaats van luchttemperatuur. Voor het bepalen van accurate gevoelstemperaturen (PET) is windsnelheid een belangrijke factor. Op dit moment wordt er voor de landelijke hittekaart een vaste, lage windsnelheid aangenomen van 0,5 m/s om de gevoelstemperatuur te berekenen (Nelen & Schuurmans, 2024). Het resultaat is een extremere weergave van de gevoelstemperatuur die niet overeenkomt met metingen en andere modellen.

Het bepalen van gevoelstemperatuur met PET

Door klimaatverandering neemt hittestress toe in Nederland. Dit heeft grote maatschappelijke impact op gezondheid, infrastructuur, leefbaarheid, watergebruik en -kwaliteit en buitenruimte. Dit bleek al in afgelopen juni waarbij het KNMI met temperaturen richting de 40 °C voor het eerst weeralarm code rood afgaf vanwege de hitte. Daarnaast bereikte de 'hittekracht' (zie kader) een 10 op de schaal van 10. Om hittestress in de buitenruimte te kwantificeren wordt vaak gevoelstemperatuur gebruikt. De meest gebruikte metriek voor gevoelstemperatuur is de 'Physiological Equivalent Temperature' (PET).

Hittekracht & Wet Bulb Globe Temperature (WBGT)

Hittekracht is de nieuwe hittestress indicator van KNMI, die bepaald wordt door de Wet Bulb Globe Temperature. In tegenstelling tot PET neemt WBGT geen fysiologische aspecten van mensen mee. WBGT is een puur meteorologische indicator voor hittestress. Een ander voorbeeld is dat WBGT alleen een hittestress indicator is in direct zonlicht, dus niet in schaduwen. Hierdoor neemt PET beter lokale ruimtelijke factoren mee dan WBGT.

PET of gevoelstemperatuur beschrijft de balans tussen warmteafgifte en warmteproductie van het menselijk lichaam, uitgedrukt in temperatuur (Höppe, 1999). Een gevoelstemperatuur uit balans leidt tot koudestress of hittestress (Koopmans et al., 2020). PET houdt rekening met de fysiologische factoren (geslacht, lengte, gewicht, kleding en fysieke inspanning) en met meteorologische factoren (luchttemperatuur, luchtvochtigheid, straling en wind).

Er is in 2019 een landelijke hittekaart van gevoelstemperatuur gecreëerd volgens het recept van het RIVM (De Nijs et al., 2019; Koopmans et al., 2020). Deze is al eerder in Meteorologica besproken (jaargang 28, nr. 2 - Juni 2019). Dit recept is ontwikkeld om standaardisatie te creëren onder methodes en zo voor de praktische toepassing in ontwerp en beleid vergelijkingen tussen verschillende gevoelstemperatuurkaarten mogelijk te maken. In 2023 is een tweede versie van de landelijke hittekaart ontwikkeld.

De nieuwe versie van de landelijke hittekaart wijkt af van het originele recept. De meteorologische omstandigheden worden in deze methode voor heel Nederland hetzelfde getrokken en de windsnelheid is vastgezet. De wijziging van windsnelheid ten opzichte van het standaard recept is de focus van dit artikel. Er wordt namelijk geen windsnelheid van een dichtstbijzijnd weerstation, maar één standaard windsnelheid van 0,5 m/s genomen. Deze keuze is geba-

seerd op de onderbouwing dat een windstille dag een goed beeld geeft van wat het slechtste scenario zou kunnen zijn. Onze hypothese is dat de representativiteit van de landelijke hittekaart achteruit is gegaan door de windsnelheid vast te zetten. De rest van het artikel zal uitleggen waarom.

Gevoelstemperatuur zonder en met wind

Hier presenteren we drie PET kaarten die met verschillende windsnelheden zijn uitgerekend: een vaste windsnelheid van 0,5 m/s, een Large-Eddy Simulation (LES), en het zogenaamde Macdonald windreductiemodel. Alle kaarten hebben dezelfde opmaak, dezelfde schaal en tonen de gemiddelde PET van de middag (12:00-18:00 lokale tijd) van 1 Juli 2015. Zie de informatie kaders voor meer informatie over LES of Macdonald. Bij de huidige landelijke hittekaart (Figuur 1) zie je bijna overal in Amsterdam PET waarden van boven 47 °C. Figuur 2 toont de PET kaart waarbij LES is gebruikt om wind te modelleren. Deze kaart zien we als een referentie voor wat de gevoelstemperatuur zou kunnen zijn.

Je ziet dat door variabele ventilatie er veel meer gebieden zijn die 'sterke hittestress' hebben, in plaats



Figuur 1. PET kaart van Amsterdam volgens het landelijke hittekaart-recept. Hier is de windsnelheid vastgezet op 0,5 m/s.



Figuur 2. Referentie PET kaart van Amsterdam. Hier is windsnelheid berekend via Large-Eddy Simulations (LES).

Large Eddy Simulations (LES)

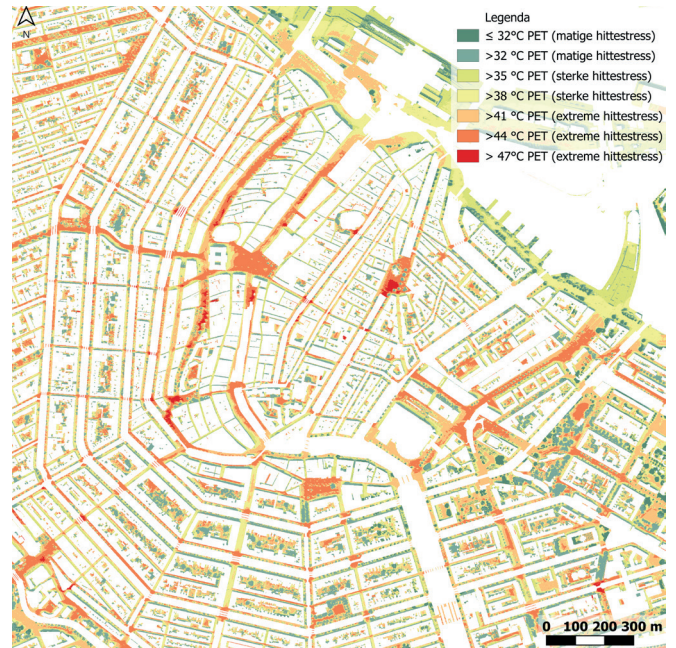
LES is een 'computational fluid dynamics' model, waarbij grote wervelingen numeriek worden opgelost en wervelingen op kleine schalen worden gemodelleerd. Dit leidt er toe dat de windstroming inclusief turbulentie berekend wordt op straatniveau.

van 'extreme hittestress' (Figuur 2). Met name rond Amsterdam Centraal Station is het veel koeler geworden, met een paar stukken waar zelfs 'matige hittestress' is. Daarnaast zie je ook hoe lange straten die relatief breed zijn ook koeler worden, doordat de wind door deze straatprofielen hogere snelheden kan bereiken en daardoor PET verlaagt. De PET kaart (Figuur 3) volgens het originele recept van het RIVM (met de Macdonald methode) komt in open gebieden veel meer overeen met de LES PET kaart (Figuur 2) dan de landelijke hittekaart (Figuur 1). De PET waarden gemodelleerd met het originele recept zijn hoger dan LES PET waarden, omdat Macdonald lagere windsnelheden modelleert dan LES. Deze Macdonald windsnelheid kan geen straatpatronen beschrijven, maar klopt ruimtelijk met de dichtheid van bebouwing (lagere windsnelheden in dichtbebouwde gebieden).

Macdonald

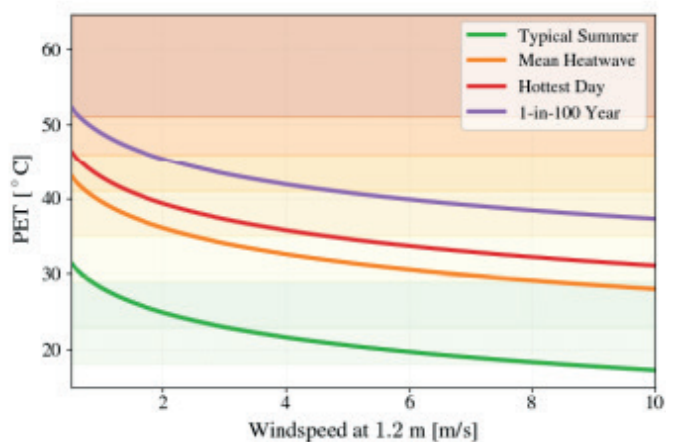
Met de Macdonald methode kan op basis van een weerstation buiten de stad een windsnelheid op lage resolutie worden bepaald in de stad. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van het dwarsoppervlak (in de richting van de wind) en hoogte van stadse bebouwingen om de plattelandse wind naar de stad wind te vertalen (Macdonald et al., 1998). In het recept van het RIVM worden bomen ook meegenomen (De Nijs et al., 2019; Koopmans et al., 2020).

Van Ruth (2026) heeft al eerder aangetoond dat de Macdonald methode in de meeste gevallen een onderschatting van de windsnelheid berekent. Door wind-



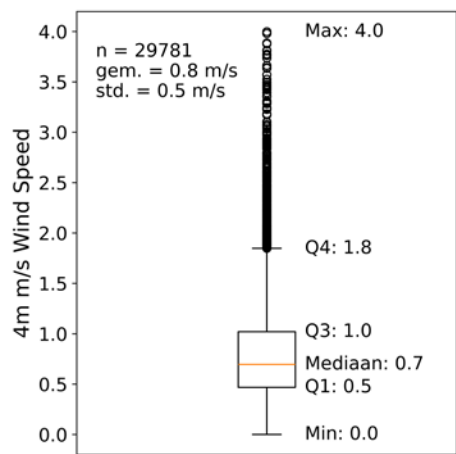
Figuur 3. PET kaart van Amsterdam, volgens methode van De Nijs et al. (2019). De windsnelheid is variabel en berekend door de Macdonald methode (Macdonald et al., 1998).

snelheid op 0,5 m/s vast te zetten, ga je uit van nog lagere windsnelheden en krijg je een onrealistische PET. Dit heeft als gevolg dat, bij gebruik van de landelijke hittekaart, ontwerpen voornamelijk gebaseerd worden op schaduwen. Terwijl naast schaduw wind ook een belangrijke factor is voor gevoelstemperatuur. Protić et al. (2025) noemt het belang van blokkeren van zonnestraling en ventilatie in één zin. De gevoelstemperatuur is namelijk nogal afhankelijk van windsnelheid. Je ziet in Figuur 4 hoe met name bij lage windsnelheden de PET erg kan verschillen. Dit komt doordat windsnelheid via een natuurlijk logaritme mee wordt genomen in de PET berekeningen (Koopmans et al., 2020). Met name in steden zijn accurate windsnelheden van belang voor PET berekeningen, omdat in stedelijke gebieden windsnelheden lager liggen dan het platteland door stedelijke bebouwing. Voor het platteland is een windsnelheid van 0,5 m/s per definitie onrealistisch. Het is ook onrealistisch dat in kuststeden de windsnelheid hetzelfde is als in de rest van Nederland.



Figuur 4. PET als functie van windsnelheid op 1,2 meter hoogte in de zon. Elke lijn toont een ander meteorologisch scenario (Van Ruth, 2026).

Ook metingen laten zien dat het niet windstil is tijdens warme dagen. Figuur 5 toont dat in Amsterdam de windsnelheid 50% van de uren tussen 0,5 en 1,0 m/s ligt bij luchttemperaturen van boven de 25 °C (Steenefeld et al., 2024). Aan het bereik van het figuur en de standaardafwijking is te zien dat de variatie in windsnelheid groot is. Als we de PET uitrekenen (volgens De Nijs et al. (2019)) met standaardafwijking van 0,5 m/s, leidt dat tot een PET verschil van 2,6 °C in de zon. Dat is bijna een halve hittecategorie verschil (Santos Nouri et al., 2018). Bijvoorbeeld van ‘sterke hittestress’ naar ‘extreme hittestress’. Deze metingen tonen aan dat windsnelheid tijdens warme uren in Amsterdam erg variabel is en daarmee ook de gevoelstemperatuur.



Figuur 5. Boxplot met windsnelheden per uur van 2014 tot en met 2025 van 24 weerstations in Amsterdam (Steenefeld et al., 2024). Alleen uren waarbij de luchttemperatuur boven de 25 °C is, zijn meegenomen. ‘n’ is de hoeveelheid datapunten, ‘gem.’ is gemiddelde, ‘std’ is standaard deviatie.

De windsnelheid varieert ruimtelijk ook sterk. Tabel 1 toont de ruimtelijke variatie van windsnelheden tijdens warme uren (> 25 °C) per 24 verschillende weerstations in Amsterdam. De mediaan varieert van 0,5 tot 1,3 m/s afhankelijk van het weerstation. Dit laat zien dat de windsnelheid ruimtelijk nog verder afstaat van de 0,5 m/s die wordt gebruikt voor de landelijke hittekaart.

Al deze windsnelheden van Steenefeld et al. (2024) zijn op ongeveer 4 meter hoogte. We gaan ervan uit dat deze resultaten ook gelden op 1,5 meter hoogte. Daarnaast zijn deze resultaten over windsnelheden in Amsterdam ook toepasbaar op andere Nederlandse steden. Sterker nog, aangezien Amsterdam een hoge stedelijke dichtheid heeft, gaan wij ervan uit dat in steden met een lagere dichtheid de windsnelheden nog hoger liggen dan in Amsterdam. Hierdoor is de huidige landelijke hittekaart nog minder accuraat in steden met lage stedelijke dichtheden. Buiten de steden is een windsnelheid van 0,5 m/s geenszins representatief.

Door wind niet mee te nemen laten we kansen liggen voor hittebestendig ontwerpen. Windstil, het meest extreme scenario mogelijk, is niet representatief voor iedere locatie, en niet representatief voor alle momenten dat hittestress ervaren kan worden. Zonder wind ontwerpen we alleen op schaduw terwijl juist ventilatie in dichtbebouwde steden van groot belang is tijdens warme en hete dagen (Lenzholzer, 2025). Bijvoorbeeld door briesjes en verbindingen tussen warme en koele delen van de stad. Een windstille dag is niet representatief, omdat in Amsterdam de windsnelheid in slechts 25% van de uren lager of gelijk aan 0,5 m/s is

(Figuur 5). De gebreken van het gebruiken van een windstille situatie komen duidelijk naar voren in de verschillen tussen de landelijke hittekaart, het LES-model en de metingen. Daarmee geeft het originele recept nog steeds een betere weergave van de gevoelstemperatuur.

Weer Station	Aantal Data Punten	Gem.	Std.	Mediaan	Max.
0	1096	0,6	0,4	0,6	2,3
1	855	0,8	0,4	0,7	2,8
2	1210	0,6	0,3	0,6	2,3
3	1569	0,7	0,3	0,7	1,9
4	1283	1,1	0,4	1,1	3,2
5	1326	0,5	0,2	0,5	1,4
6	1393	0,7	0,3	0,7	1,9
7	1549	1,0	0,4	1,0	2,6
8	1092	0,5	0,3	0,5	2,2
9	1149	0,5	0,2	0,5	1,4
10	1264	0,8	0,4	0,7	2,1
11	1375	1,3	0,5	1,3	2,9
12	1311	0,5	0,5	0,5	2,3
13	1480	0,4	0,2	0,4	1,1
14	1478	1,0	0,4	1,0	2,3
15	1619	0,8	0,3	0,8	2,0
16	1439	0,5	0,2	0,5	1,1
17	1317	1,0	0,5	1,0	2,9
18	1266	0,8	0,8	0,6	4,0
19	833	1,4	0,6	1,3	3,7
20	199	0,5	0,4	0,6	1,4
21	1564	0,9	0,4	0,8	2,7
22	1448	0,7	0,3	0,7	1,8
23	666	0,7	0,4	0,7	2,0
Totale Gem.	1241	0,8	0,4	0,7	2,3
Totale Mediaan	1314	0,7	0,4	0,7	2,2

Tabel 1. Ruimtelijke variatie van windsnelheden tijdens warme uren.

Contact

quin.nieuwendijk@wur.nl

Literatuur

De Nijs et al., T. (2019). Ontwikkeling standaard stresstest hitte. In RIVM (Report Briefrapport 2019-0008; p. 123). Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. <https://doi.org/10.21945/RIVM-2019-0008>

Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal Of Biometeorology*, 43(2), 71–75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>

Koopmans, S., Heusinkveld, B., & Steenefeld, G. (2020). A standardized Physical Equivalent Temperature urban heat map at 1-m spatial resolution to facilitate climate stress tests in the Netherlands. *Building And Environment*, 181, 106984. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106984>

Lenzholzer, S. (2025). *Weather in the City: How Design Shapes the Urban Climate*. nai10 publishers, Rotterdam. ISBN 978-94-6208-917-3

Macdonald, R., Griffiths, R., & Hall, D. (1998). An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmospheric Environment*, 32(11), 1857–1864. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(97\)00403-2](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(97)00403-2)

Nelen & Schuurmans. (2024). Landelijke hittekaart gevoelstemperatuur: Technische toelichting. In *Klimaat-effectatlas*. https://www.klimaat-effectatlas.nl/nl/library/download/urn:uuid:d976863b-524f-4a48-ae80-382f55067d68/technische+documentatie+6-12-2024.pdf?format=save_to_disk

Nouri, A. S., Lopes, A., Costa, J. P., & Matzarakis, A. (2017). Confronting potential future augmentations of the physiologically equivalent temperature through public space design: The case of Rossio, Lisbon. *Sustainable Cities And Society*, 37, 7–25. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.031>

Protić, I. B., Vasilevska, L., & Petrović, N. (2025). Blue–Green Infrastructure Strategies for Improvement of Outdoor Thermal Comfort in Post-Socialist High-Rise Residential Areas: A Case Study of Niš, Serbia. *Sustainability*, 17(23), 10876. <https://doi.org/10.3390/su172310876>

Van Ruth, J. (2026). Master Thesis. Comparative Evaluation of wind modelling for Dutch heat stress mapping. Delft University of Technology & Witteveen+Bos.

Steenefeld, G.-J., Barten, J.G.M., Hartogensis, O., van der Molen, M. & Heusinkveld, B.G. (2024). MAQ-Observations v1.0: Amsterdam [Data set]. <https://maq-observations.nl/>. Geraadpleegd op (2026-05-19).