

# Op zoek naar stadsbomen voor het toekomstig klimaat: Bijgewerkte en verfijnde Europese winterhardheidskaarten voor stedelijke gebieden.

L.M. Hulsman, B.G. Heusinkveld, M. Ravesloot, G.J. Steeneveld (WUR)

**Stadsbomen zorgen in de zomer voor verkoeling via verdamping en schaduwwerking. Maar het is onduidelijk welke boomsoorten in een toekomstig klimaat deze verkoeling kunnen leveren. Selectie van boomsoorten gebeurt onder andere op de winterhardheid, dus de laagste temperatuur die bomen in hun habitat ervaren. Deze studie presenteert bijgewerkte en verfijnde Europese winterhardheidskaarten, toont aan dat winterhardheid in steden substantieel milder is dan op het platteland en maakt winterhardheidsprojecties naar de toekomst toe.**

De uitstoot van broeikasgassen heeft geleid tot een snelle stijging van de temperatuur op twee meter hoogte, waardoor habitats van veel boomsoorten zich ruimtelijk verplaatsen (Anderson et al., 2020). Deze verschuiving kan grote gevolgen hebben voor de keuze van boomsoorten in stedelijke planning. Bomen spelen een belangrijke rol in stedelijke gebieden, omdat ze in de zomer verkoeling bieden door middel van verdamping en schaduwvorming. De vraag welke boomsoorten geschikt zijn voor steden in een veranderend klimaat ligt echter open (Esperon-Rodriguez et al., 2022). Bovendien is het door het stedelijk hitte-eilandeffect (SHE) doorgaans warmer in steden. Om de keuze voor de juiste boom te maken, moeten boomkwekerijen en gemeenten het bomenbestand en het veranderende klimaat beoordelen en een geschikte match tussen locatie en boomsoort vinden. Hiervoor bestaat nu een rassenlijst van circa 20.000 verschillende boomkwekerijgewassen (Hoffmann en Ravesloot, 2002). Om de keus voor een bepaalde boomsoort te maken wordt op deze lijst een zoekprofiel losgelaten dat bestaat uit onder andere bodemkundige, hydrologische en meteorologische factoren. Winterhardheid is een cruciaal selectie criterium voor passende boomsoorten. Deze is gedefinieerd als het klimatologisch gemiddelde van de jaarlijkse minimumtemperatuur (TNN) en is ingedeeld in 26 winterhardheidszones (WHZ's). De meest recente pan-Europese WHZ-kaart is helaas nog gebaseerd op klimaatgegevens van 1951-1980 (Daly et al., 2012). Deze kaart is niet langer actueel, gezien de snelheid waarmee de TNN-waardes zijn gestegen. De relatief oude Europese WHZ-kaarten belemmeren de tuinbouwsector bij de keuze voor geschikte boomsoorten. Nieuwe WHZ-kaarten zijn daarom van groot belang. Bovendien zijn de huidige WHZ-kaarten alleen gebaseerd op waarnemingen op het platteland, wat niet representatief is voor de warmere stedelijke omgeving. Deze studie beschrijft hoe de WHZ's in Europa sinds 1951 zijn verschoven, kwantificeert hoe de winterhardheid in steden verschilt van het platteland en hoe de WHZ's in Nederland zich ontwikkelen tot 2085.

## Data en Methoden

Eerst maken we WHZ-kaarten op Europese schaal tussen 1951 en 2020 (0,1°). Daarna verfijnen we deze WHZ-kaarten tot stadsniveau (100 m x 100 m) en als laatste maken we projecties naar de toekomst.

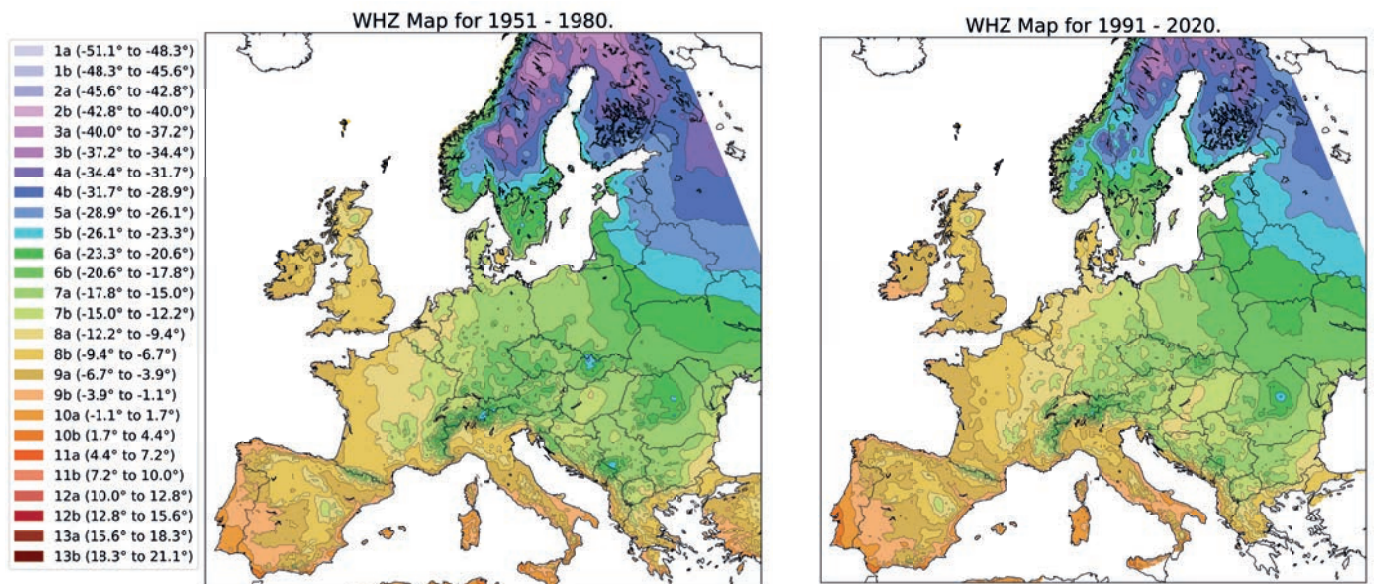
De boomsector gebruikt de definitie van de USDA (U.S. Department of Agriculture) om winterhardheid te kwantificeren voor een bepaald gebied of weerstation, dat wil zeggen: de gemiddelde jaarlijkse minimumtemperatuur (TNN) wordt ingedeeld in 13 hoofdklassen (1-13) met een bereik van 5,6 °C per klasse. Elke zone is bovendien onderverdeeld in twee subklassen van 2,8 °C (a en b). Zone 1a geeft de laagste TNN aan (-51,1 °C tot -48,3 °C) en zone 13b de hoogste jaarlijkse TNN (18,3 °C tot 21,1 °C).

Dagelijkse TN in Europa voor 1951-2020 zijn afkomstig uit de E-OBS-dataset (v26.0), i.e. dagelijkse temperaturen en zonnestralinggegevens op een raster van 0,1°x0,1° (Cornes et al., 2018). We kwantificeren het gebied dat onderhevig is aan WHZ-verandering door gebruik te maken van de WHZ van alle beschikbare rastercellen om de verschuiving tussen de twee tijdvakken te bepalen.

Voor de verfijnde Nederlandse WHZ-kaart is eerst een numerieke relatie ontwikkeld tussen de stedelijke en rurale TN op basis van meteorologische variabelen (in de wintermaanden) en de stedelijke morfologie (zoals gebouwhoogte, straatbreedte, groenfractie, etc.). De gebruikte meteorologische variabelen in de relatie zijn de TN op het platteland (en die van de voorgaande dag), dagelijkse globale stralingssom en de dagelijkse gang van de temperatuur (en die van de voorgaande dag). Het ontwikkelde stedelijke TN (multiple lineaire regressie) model is gebaseerd op TN-waarnemingen verzameld in zes professionele Europese meetnetwerken (Amsterdam, Rotterdam, Gent, Helsinki, Novi Sad en Berlijn) en nabijgelegen landelijke WMO-stations om zo het SHE voor het koudste moment van de dag in te kunnen schatten.

De stedelijke morfologie is gekarteerd voor Europa op een ruimtelijke resolutie van 100 m x 100 m (Demuzere et al., 2019), en bevat de "sky-view factor" (SVF) en het doorlatend bodemoppervlak (PSF). De SVF geeft het deel van de hemel aan dat zichtbaar is wanneer je midden op straat staat, en is dus laag in relatief smalle straten. De PSF geeft het oppervlaktaandeel van bodem, vegetatie en open water aan.

Om de ontwikkeling van WHZ's in de toekomst te projecteren, hebben we een casestudie uitgevoerd waarin de WHZ's van Nederland in verschillende klimaatscenario's zijn onderzocht. Voor deze studie hebben we gebruikge-



Figuur 1. Europese WHZ-kaarten voor 1951-1980 (a) en 1991-2020 (b), gebaseerd op de gemiddeld laagste jaarlijks opgetreden minimumtemperatuur in het E-OBS V.26-product.

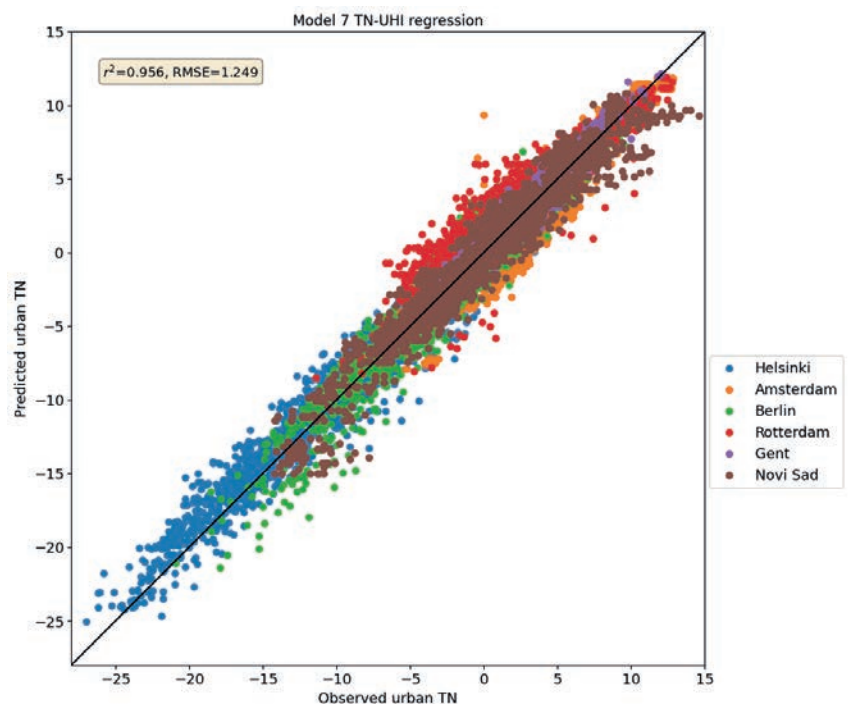
maakt van de vier KNMI'14 klimaatscenario's (Van den Hurk et al., 2014). Deze scenario's bieden projecties van het klimaat van Nederland voor de periode van 30 jaar rond 2085. Deze vier klimaatscenario's zijn het resultaat van twee combinaties van onzekerheden over het toekomstige Nederlandse klimaat. De eerste is de wereldwijde temperatuurstijging, die de vier scenario's verdeelt in 'gematigde' (G) en 'warme' (W) scenario's. De gematigde scenario's gaan uit van een wereldwijde opwarming van 1°C in 2050 en 1,5°C in 2085 ten opzichte van de gemiddelde temperatuur in Nederland tussen 1981 en 2010. De warme scenario's voorspellen een opwarming van 2°C in 2050 en 3,5°C in 2085. De tweede factor is de verandering in de algemene atmosferische circulatie, die de scenario's verdeelt in scenario's met 'lage verandering' (L, met weer gedomineerd door westenwinden in Nederland) en scenario's met 'hoge verandering' (H, met vaker oostenwinden of een blokpatroon boven Midden-Europa). Dit beïnvloedt de algemene weerpatronen in Nederland, wat leidt tot verschillen in temperatuur en neerslag.

De KNMI-transformatietool voor de klimaatscenario's is gebruikt om de geprojecteerde TN-reeksen te bepalen voor alle rastercellen in Nederland voor het oorspronkelijke 0,1°x0,1°-raster van de E-OBS-dataset. Vervolgens zijn deze tijdreeksen gebruikt om de WHZ-kaarten voor Nederland te maken voor 2085.

### Nieuwe Europese WHZ kaarten

De WHZ-kaart van 1951-1980 (Figuur 1a) laat zien dat in Europa de gemiddelde TNN -10,1°C (±1,23°C (90% betrouwbaarheids-interval)) bedraagt, wat overeenkomt met WHZ-subklasse 8a, waarbij het grootste deel van het onderzoeksgebied in WHZ-subklas-

se 7a valt. Voor de WHZ-kaart van 1991-2020 bedraagt deze gemiddelde TNN -8,8 °C (±0,99°C), wat overeenkomt met WHZ-subklasse 8b, waarbij het grootste deel van het onderzoeksgebied in WHZ-subklasse 7b valt. Dit geeft aan dat het Europese klimaat tussen de gemiddelden van 1951-1980 en 1991-2020 is veranderd naar een TNN die ongeveer 1,3 graden hoger is (±2,22°C). Ook geven onze resultaten aan dat ongeveer 55% van het Europese landoppervlak over het tijdvak minstens één WHZ is verschoven. In Scandinavië zien we een terugtrekking van de klassen 3 en 4 naar het noorden. In Nederland is klasse 7 verdreven ten gunste van klasse 8, en in Portugal zien we subklasse 10b op de kaart verschijnen.



Figuur 2. Gemodelleerde versus waargenomen minimumtemperaturen in de stedelijke omgeving voor Helsinki, Amsterdam, Berlijn, Rotterdam, Gent en Novi Sad.

## Stedelijke WHZ-kaarten

Het ontwikkelde stedelijk TN-model presteert vrij goed tegen waarnemingen (Figuur 2). Zouden we deze stedelijke correctie niet doen, dan zou dit een koude bias van 2,4 °C opleveren, en dat is ongeveer een halve WHZ-klasse. Vervolgens genereren we stedelijke TN-reeksen voor alle stedelijke rastercellen in de local climate zone (LCZ) kaart, en zetten die om naar WHZ. We vinden dat de meeste stedelijke gebieden zich in een hogere WHZ bevinden dan het omliggende gebied. Figuur 3 illustreert dit voor Utrecht en omgeving. De WHZ-kaart laat zien dat het gebied binnen de stadsgrenzen zich in een hogere WHZ bevindt dan het omliggende landelijke gebied (zoals Utrecht, Houten, Zeist en het Utrecht Science park, met subklasse 8a op het platteland en subklasse 8b in bebouwd gebied). Gebieden met LCZ8 (bedrijventerreinen) zitten nog een klasse hoger (bijvoorbeeld Lage Weijde). Aan de westkant van de kaart komt subklasse 8b grootschalig voor door een kleinere dagelijkse gang als gevolg van nabijheid van de zee.

Een ander opvallend resultaat is de aanwezigheid van kleine gebieden met een verhoogde winterhardheid. Deze representeren het gesimuleerde SHE in zeer kleine nederzettingen, en wordt veroorzaakt door een paar rastercellen met stedelijke LCZ's. Ondanks hun omvang worden kleine steden nog steeds beïnvloed door een SHE, aangezien de mate waarin straling reflecteert in de straten niet afhankelijk is van de grootte van de stad. Omdat het model geen onderscheid maakt tussen stedelijke locaties op basis van hun omgeving, behandelt het model stedelijke rastercellen in grote en kleine steden hetzelfde als ze dezelfde LCZ hebben.

## Toekomstig WHZ in Nederland

Deze studie gebruikt de vier KNMI'14 klimaatscenario's om toekomstige winterhardheid in Nederland te schatten voor het jaar 2085. Het GL-scenario projecteert een klimaatverandering met een beperkte wereldwijde temperatuurstijging zonder grote veranderingen in circulatiepatronen in Nederland. Dit levert een beperkte verandering in winterhardheid ten opzichte van het huidige klimaat op (tijdvak 1991-2020; Figuur 4a, b), i.e. in de meeste gebieden is de WHZ-verschuiving slechts één klasse. Waar subklassen 8a en 8b dominant zijn in het huidige klimaat, zullen subklassen 8b en 9a naar verwachting dominant

zijn in 2085. Dit komt overeen met de WHZ's die in het huidige klimaat in West-Frankrijk aanwezig zijn (Figuur 1).

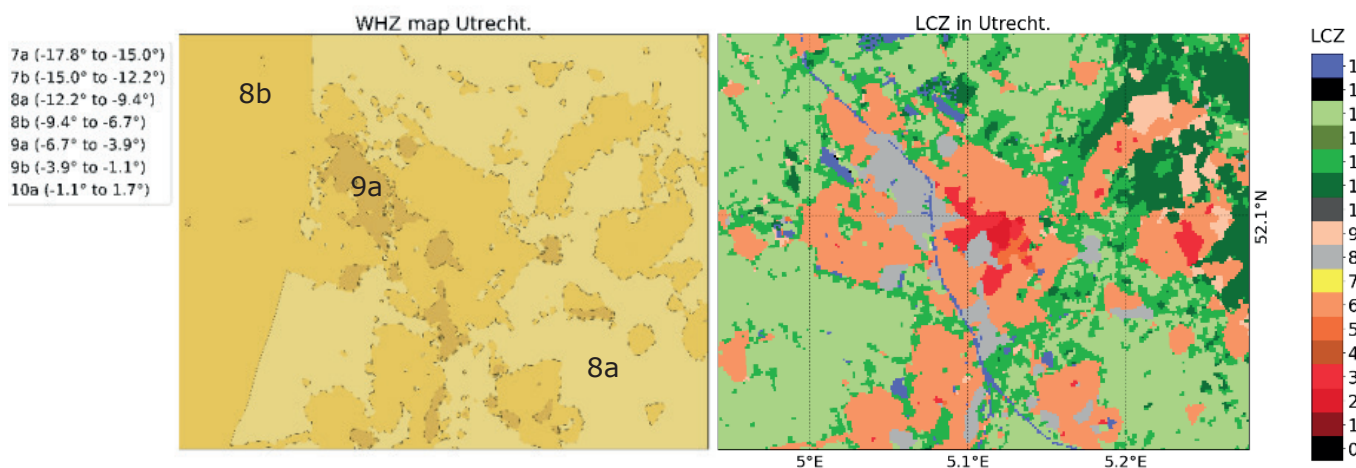
Het WH-scenario beschrijft een toekomst waarin Nederland in 2085 opwarmt met 3,5 °C en waarin de veranderingen in atmosferische circulatiepatronen grote gevolgen hebben voor het weer op synoptische schaal. De geprojecteerde WHZ-verandering is daarom veel groter (Figuur 4c). Voor 2085 wordt in de meeste gebieden een WHZ-verschuiving van ongeveer drie subklassen voorspeld. In dit scenario zullen de subklassen 9b en 10a naar verwachting dominant zijn in 2085. Dit komt overeen met de WHZ's die te vinden zijn in het huidige klimaat van Zuid-Portugal (Figuur 1b).

## Conclusie

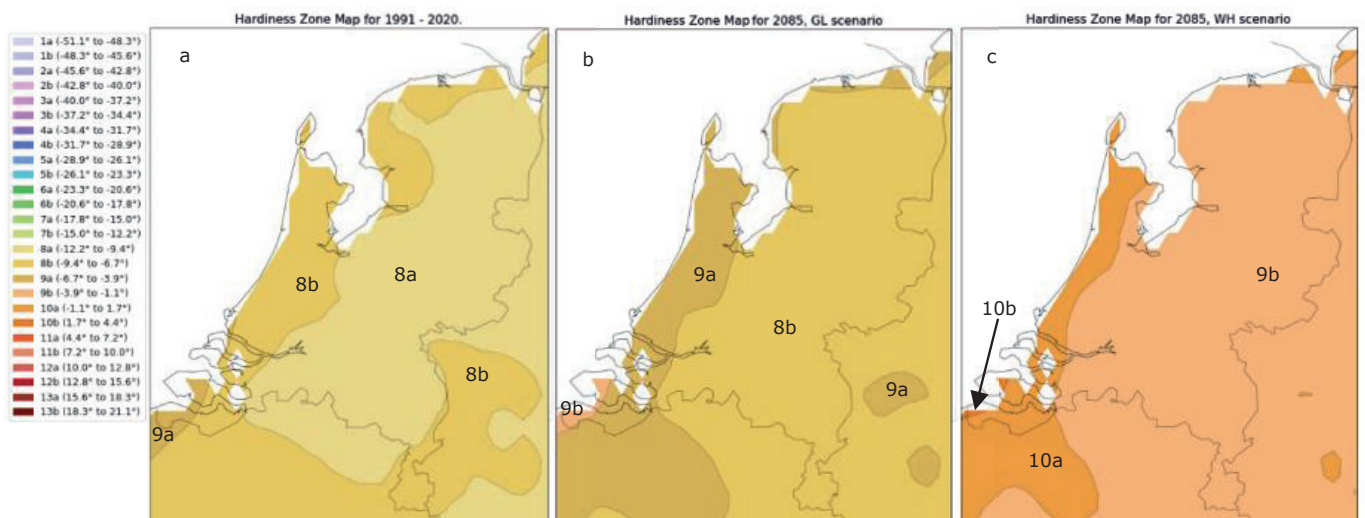
Deze studie heeft nieuwe Europese winterhardheidskaarten afgeleid voor 1951 tot 2020, met behulp van de E-OBS-klimatologische dataset met een resolutie van 0,1°. Daarnaast is een verfijning ontwikkeld om het stedelijk hitte-eilandeffect in winterhardheid mee te nemen. Zo hebben we een stedelijke winterhardheidskaart ontwikkeld met een ongekende resolutie van 100 m, gebaseerd op de klimatologische dataset en de Europese lokale klimaatzoneclassificatie. Ten slotte hebben we een klimaatprojectie van de winterhardheidszones voor Nederland uitgevoerd voor 2085.

We vinden dat de Europese winterhardheid aanzienlijk is veranderd tussen 1951 en 2020, waarbij de winterhardheidszones in veel gebieden met 2 klassen zijn verschoven. Ook vinden we dat steden over het algemeen een mildere winterhardheid hebben dan het omliggende platteland. In de praktijk betekent dit dat steden in circa één mildere winterhardheidsklasse liggen, waardoor er voor steden andere boomsoorten geselecteerd kunnen worden dan voor het platteland. Ten slotte laten toekomstige klimaatprojecties voor Nederland zien dat de winterhardheid tegen 2085 met ongeveer 1 tot 3 zones zal verschuiven, afhankelijk van het gekozen klimaatscenario.

Onze resultaten wijzen erop dat de winterhardheid snel verandert als gevolg van klimaatverandering, wat impliceert dat de traditionele selectie van boomsoorten in stedelijke gebieden herzien moet worden. Stedenbouwkundigen op het gebied van klimaatadaptatie moeten rekening houden met nieuwe geschikte boomsoorten.



Figuur 3. WHZ-kaart van de stad Utrecht en omgeving op 100x100 m2. Rechts: Local Climate Zone-kaart van hetzelfde gebied (Demuzere et al., 2019).



Figuur 4. WHZ-kaarten voor Nederland voor het huidige klimaat, dat wil zeggen: tijdvak 1991-2020 (a), en voor 2085 in scenario GL (b) en WH (c).

Als gevolg hiervan kan de tuinbouwsector zijn werkwijze en bedrijfsstrategie aanpassen. In het CSI-Trees project (<https://csi-trees.org/>) zal in de komende jaren hieraan verder worden gewerkt, met name ook om de invloed van veranderende dampdruktekortten en andere abiotische factoren op de boomkeuze in beeld te brengen.

#### Data statement

De WHK-producten zijn beschikbaar via 4TU.Research-Data onder doi: [10.4121/ea47df39-c6b0-4d43-9db7-f82454f3383f](https://doi.org/10.4121/ea47df39-c6b0-4d43-9db7-f82454f3383f).

#### Contact

Gert-Jan.Steeneveld@wur.nl

#### Referenties

Anderson, J.T., Song, B.H., 2020. Plant adaptation to climate change—Where are we? *J. Syst. Evol.*, 58: 533-545. <https://doi.org/10.1111/jse.12649>  
 Cornes, R. C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E.J., Jones, P.D., 2018. An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(17), 9391-9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>

Daly, C., Widrichner, M.P., Halbleib, M.D., Smith, J.I., Gibson, W.P., 2012. Development of a new USDA plant hardiness zone map for the United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(2), 242-264.  
 Demuzere, M., Bechtel, B., Middel, A., Mills, G., 2019. Mapping Europe into local climate zones. *PLoS one*, 14(4), e0214474. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214474>  
 Esperon-Rodriguez, M., Tjoelker, M. G., Lenoir, J., Baumgartner, J. B., Beaumont, L. J., Nipperess, D. A., Power, S. A., Richard, B., Rymer, P.D. and Gallagher, R.V., 2022. Climate change increases global risk to urban forests. *Nature Climate Change*, 12(10), 950-955.  
 Klein Tank, A.M., and co-workers, 2002. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology*, 22(12), 1441-1453. <https://doi.org/10.1002/joc.773> (see <https://www.ecad.eu>)  
 Hofmann, M.H.A., en M.B.M. Ravesloot, 2002: Winterhardheid van boomkwekerijgewassen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving sector Bomen, Boskoop, <https://edepot.wur.nl/180734>  
 Oke, T.R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 108(455), 1-24.  
 Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93 (12), 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>  
 van den Hurk, B., Siegmund, P., Klein Tank, A., 2014. KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective. Scientific background report KNMI'14 (WR 2014-01). De Bilt, Netherlands: Royal Netherlands Meteorological Institute.


ELSEVIER

## Call for papers



### Journal of the European Meteorological Society

**Why publish with JEMS?**

- Gold Open Access for maximum visibility
- Rigorous peer review ensuring high-quality science
- Rapid publication on ScienceDirect
- Supported by the European Meteorological Society

We welcome original research and review articles across weather, climate, atmospheric composition, hydrometeorology, Earth observation, modelling, forecasting, severe weather communications, and more.

Share your latest research with a trusted, global community in meteorology and atmospheric sciences.

[sciencedirect.com/journal/journal-of-the-european-meteorological-society](https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-the-european-meteorological-society)

