

Numerieke weersverwachtingen op buurtniveau voor Amsterdam

REINDER RONDA, GERT-JAN STEENEVELD, BERT HEUSINKVELD (WAGENINGEN UNIVERSITEIT),
JISK ATTEMA (NETHERLANDS eSCIENCE CENTER), BERT HOLTSLAG (WAGENINGEN UNIVERSITEIT)

Stedelijke landschappen beïnvloeden het leven van stadsbewoners, onder meer doordat ze de lokale weersomstandigheden beïnvloeden. Helaas kunnen moderne mondiale en regionale weersverwachtingssystemen tot op heden niet worden gebruikt voor gedetailleerde verwachtingen voor de stad, ondanks dat observatiesystemen wel in staat zijn om het stedelijke klimaat effectief te monitoren. Om weersverwachtingen op intra-stedelijke ruimteschalen mogelijk te maken, is een stedelijk weersverwachtingssysteem ontwikkeld. In dit systeem worden recente ontwikkelingen op het gebied van landschapskartering, luchtfotografie, en gedetailleerde hoogtegegevens ontsloten en gebruikt voor de representatie van stedelijke gebieden in een versie van het Weather Research & Forecasting (WRF) model dat speciaal is ontwikkeld voor weersverwachtingen in stedelijke gebieden. Het stedelijke weersverwachtingssysteem heeft voor Amsterdam voor de zomer van 2015 dagelijks weersverwachtingen op buurtniveau gemaakt. Deze verwachtingen zijn gevalideerd met metingen uit een dicht netwerk van weerstations in Amsterdam; het blijkt dat het stedelijke weersverwachtingssysteem de invloed van stedelijke morfologische kenmerken en stedelijke ruimtelijke structuur op lokale temperaturen met succes kan representeren, inclusief het verkoelende effect van grote waterlichamen op lokale middagtemperaturen. Deze resultaten betekenen dat wereldwijde stedelijke weersverwachting binnen het bereik is gekomen van weersverwachtingssystemen, mits passende data- en computerinfrastructuur beschikbaar is.

Hitte in de stad

Wereldwijd trekken mensen naar de stad. In 2014 leefde volgens de Verenigde Naties (VN, 2014) circa 52% van de wereldbevolking in een stad, dus 4.5 miljard stadsbewoners wereldwijd. In 2050 zullen er naar verwachting 6.5 miljard mensen in een stad wonen (VN, 2014), wat betekent dat dan 70% van de mensen op aarde stedelingen zijn.

Deze verstedelijking trekt een zware wissel op de leefbaarheid van stedelijke gebieden in de hele wereld. Vanuit een meteorologisch perspectief hebben steden vaak te maken met een zogenaamde stedelijk hitte-eilandeffect, in het Engels “Urban Heat Island (UHI)” effect (Howard, 1833; Oke, 1982), wat betekent dat steden vooral ‘s avonds en ‘s nachts substantieel warmer zijn dan hun landelijke omgeving. Deze extra warmte maakt stedelijke bewoners extra kwetsbaar voor de negatieve effecten van extreme hitte, ook omdat klimaatprojecties laten zien dat de ernst en de duur van de hittegolven in de komende decennia naar verwachting zullen toenemen (IPCC, 2013). Nadelige effecten van extreme hitte zijn onder andere een verminderde arbeidsproductiviteit (Zander et al., 2015), een verhoogde vraag naar energie (Fazeli et al., 2016) en aanzienlijk hogere risico’s op hart- en vaatziekten, kanker en luchtwegklachten. Uit onderzoek blijkt dan ook dat sterftcijfers

aanzienlijk hoger zijn als het erg heet is (Huynen et al., 2001).

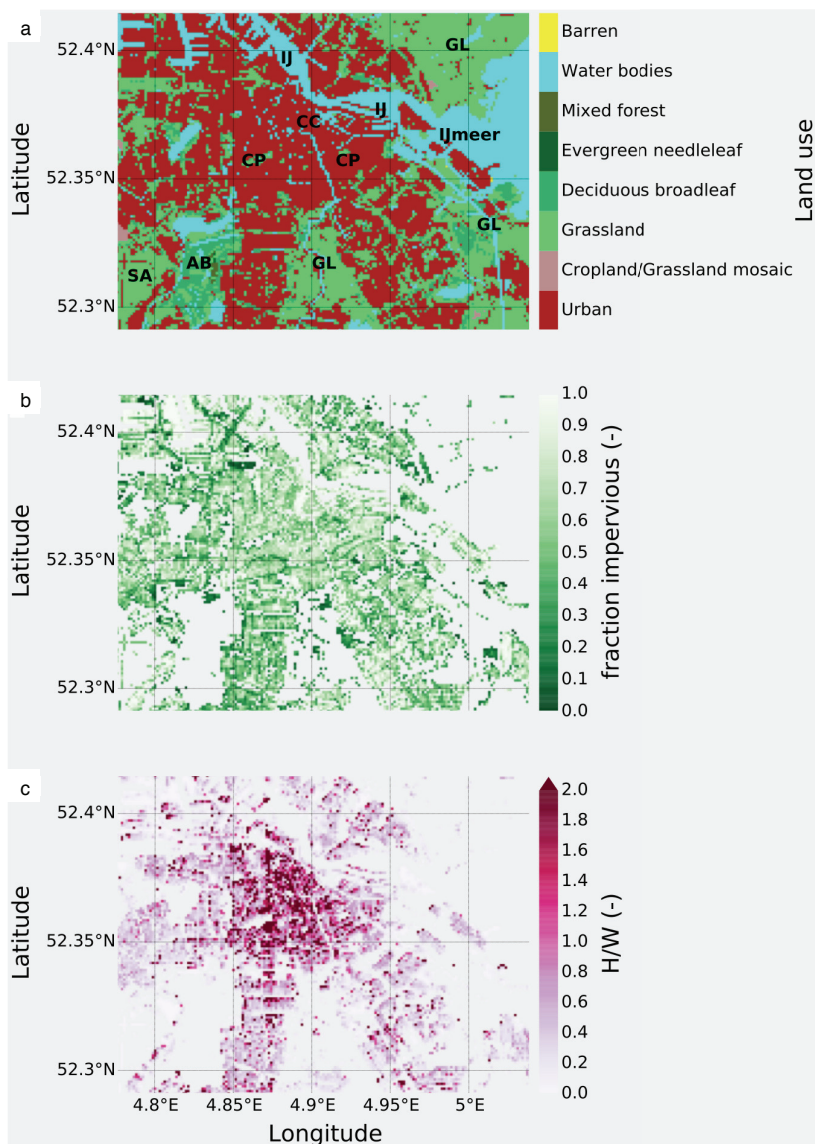
Om deze negatieve effecten tegen te gaan wordt bij het ontwerp van stedelijke gebieden al rekening gehouden met het thermische comfort en de gezondheid van stedelingen (US-EPA, 2008). Deze maatregelen voorkomen echter niet altijd dat steden erg warm worden. Het beschermen van mensen tijdens warm weer berust nog steeds op waarschuwingssystemen en hitteplannen. Deze waarschuwingssystemen kunnen niet zonder nauwkeurige weersverwachtingen voor de stad.

Hoewel de ontwikkeling van weersverwachtingssystemen zonder meer indrukwekkend kan worden genoemd, ‘een stille revolutie’ volgens Bauer et al. (2015), is de huidige horizontale resolutie nog te grof om gedetailleerde weersverwachtingen voor de stad te maken. Stedelijke morfologie die belangrijk is voor de UHI varieert typisch van buurt tot buurt, en heeft dus een ruimtelijke schaal van enkele honderden meters. Dit is aanmerkelijk fijner dan de horizontale resolutie van hedendaagse weersverwachtingssystemen die varieert van enkele kilometers (bijvoorbeeld in Harmonie) tot resoluties in de orde van 10 km (HIRLAM, ECMWF en NCEP).

Om de kloof te dichten tussen de schaal waarop weersverwachtingssystemen verwachtingen genereren en de schaal waarop mensen het weer ervaren heeft de Wageningen Univer-

Domein id	Grootte noord/zuid (km)	Grootte oost/west (km)	Rooster afstand (m)	Centrale breedtegraad (N)	Centrale lengtegraad (E)	Tijdstap (s)
d01	1487.5	1487.5	12500	51.964	5.663	60
d02	300	300	2500	52.374	4.820	12
d03	60	60	500	52.351	4.896	2.4
d04	17.5	13.5	100	52.352	4.907	0.48

Tabel 1. Specificatie van de WRF rekenroosters.



Figuur 1. Specificatie van het landgebruik en de stedelijke morfologische kenmerken. (a) Landgebruik voor alle roosterpunten van het kleinste domein. Symbolen in de figuur geven de geografische ligging aan van het stadscentrum ('CC'), de grote waterlichamen 'IJ' en 'IJmeer', de graslanden ('GL'), de grote stadsparken ('CP'), het Amsterdamse Bos ('AB'), en Schiphol Airport ('SA'). (b) Fractie verhard oppervlak. (c) De verhouding tussen de hoogte van de gebouwen en de breedte van de stedelijk 'canyons' voor alle roosterpunten in het kleinste domein waarvoor het grondgebruik stedelijk is.

siteit, in nauwe samenwerking met het Netherlands eScience Center (www.esciencecenter.nl) het Urban Weather Forecasting System (UFS) ontwikkeld. Dit systeem maakt weersverwachtingen mogelijk op een ruimteschaal van enkele honderden meters, en kan dus worden gebruikt om weersverwachtingen op buurt- en soms zelfs straatniveau te maken. Verwachtingen op zulke kleine ruimteschalen zijn direct relevant voor de persoonlijke veiligheid en het welzijn van mensen. Overheidsinstanties, autoriteiten op het gebied van volksgezondheid, energiebedrijven, burgers en ondernemers kunnen de verwachtingen dus direct gebruiken om activiteiten te plannen en keuzes te bepalen.

Ontwikkeling van het UFS

De basis van het UFS wordt gevormd door het Weather, Research & Forecasting / Urban Modeling System (voortaan WRF) (Skamarock en Klemp, 2008; Chen et al., 2011), en maakt in dit geval weersverwachtingen op vier geneste hori-

zontale domeinen (Tabel 1). Het fijnste domein omvat het stedelijk gebied van de stad Amsterdam en berekent het weer op een horizontale roosterafstand van 100 m. Het grofste domein heeft een roosterafstand van 12.5 km en omvat een belangrijk deel van Noordwest-Europa. Aan de randen wordt het weer opgelegd van het mondiale weersverwachtingssysteem van het National Center of Environmental Prediction (NCEP) Global Forecasting System (GFS) cycle (www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs).

De ontwikkeling van het UFS staat of valt met het detailniveau waarmee informatie met betrekking tot stadsmorfologie beschikbaar is. Met name de beschikbaarheid van fijnmazige gegevens van het landgebruik in de bebouwde omgeving en het gebied rondom de stad, de geometrie van de bebouwing (hoogte van gebouwen en breedte van wegen), en de fractie groene gebieden binnen de stad is cruciaal. Om deze gegevens voor stedelijke gebieden in Nederland te verkrijgen is binnen de ontwikkeling van het UFS veel aandacht besteed aan het ontsluiten van innovatieve gegevensbronnen en deze geschikt te maken voor gebruik in WRF.

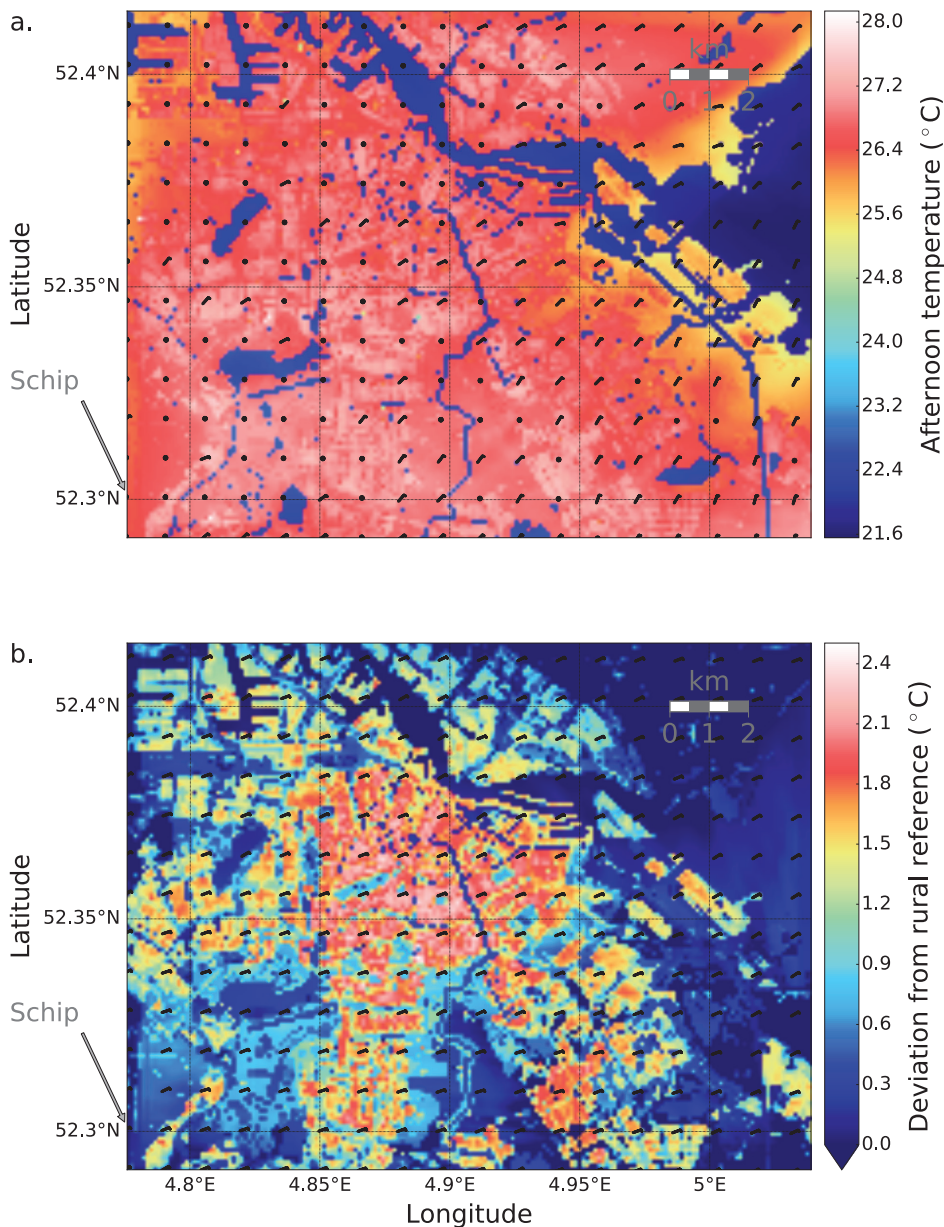
Databronnen zijn onder andere de landgebruikskaat voor Nederland zoals ontwikkeld door het Kadaster (www.kadaster.nl/-/top10nl), luchtfoto's die kunnen worden gebruikt om de hoeveelheden groen in het stedelijk gebied in kaart te brengen, en een gedetailleerde hoogtekartaart (www.pdok.nl/en/service/wfs-actueel-hoogtebestand-nederland-ahn2) die is gebruikt om de geometrie van de bebouwde omgeving te beschrijven.

Als voorbeeld van het behaalde detail toont Figuur 1a het landgebruik voor het domein met de kleinste roosterafstand. Het hoefijzervormige historische centrum van Amsterdam is duidelijk herkenbaar. De grootste parken van Amsterdam, met name het Vondelpark, Oosterpark en het Beatrixpark, zijn duidelijk zichtbaar als groene elementen in de stad. Ook de landschappen buiten Amsterdam worden goed gepresenteerd: het IJmeer in het oosten, de graslanden in het zuiden, zuidoosten en het noorden, en het Amsterdamse Bos in het zuidwesten. Ook zijn de landingsbanen en omliggende graslanden van vliegveld Schiphol in het uiterste zuidwesten goed zichtbaar. Figuren 1b en 1c laten zien dat zowel de versteende fractie van het Amsterdamse stadsoppervlak als de verhouding tussen de hoogte van de gebouwen en de wegbreedte sterk variëren binnen Amsterdam. In zijn algemeenheid kan worden gezegd dat beide het hoogst zijn in de verstedelijkte kern van Amsterdam en wat lager in de aanpalende woonwijken.

Weersverwachtingen met het UFS

Het UFS is voor de zomer van 2015 gebruikt om een weersverwachting voor het stedelijk gebied van Amsterdam te maken. Elke dag gedurende zomer (juni, juli en augustus) wordt daartoe om 0:00 UTC een run gestart met UFS die vervolgens wordt gebruikt om 48 uur vooruit het weer in Amsterdam te berekenen.

Initialisatie van de atmosferische velden vindt daarbij



Figuur 2. Het UFS maakt weersverwachtingen voor de stad met een opmerkelijk detail. (a) Verwachte gemiddelde middagtemperatuur (gemiddelde van 12, 13, 14 UTC) (gekleurde contouren) en windsnelheid (windveren). (b) Verwachting voor de gemiddelde avondlijke (20, 21, 22 UTC) afwijking van de lokale luchttemperatuur in de buurt ten opzichte van die van Schiphol en de gemiddelde windsnelheid van de avond. Verwachtingen zijn gemiddeld over alle verwachtingen die zijn gemaakt tijdens een episode van warm weer die duurde van 29 juni tot 2 juli 2015. Ook aangegeven is de locatie van het referentieweerstation Schiphol.

plaats met behulp van de velden uit hetzelfde weersverwachtingsmodel dat ook wordt gebruikt om het weer aan de randen op te leggen. Om de opbouw van hitte door het model in het stedelijk gebied mogelijk te maken worden de prognostische variabelen voor het landoppervlak niet geïnitieerd vanuit het globale weersverwachtingsmodel maar overgenomen ('ge-recycled') vanuit de verwachting voor deze variabelen van de vorige dag. Uniek is de initialisatie van de watertemperaturen die voor grote binnenwateren in en rondom Amsterdam wordt bepaald uit de metingen door Rijkswaterstaat van de watertemperatuur van de Nederlandse binnenwateren (www.rijkswaterstaat.nl/kaarten/watertemperatuur.aspx).

Als voorbeeld van het detailniveau waarop de UFS weersverwachtingen voor de stad produceert, toont Figuur 2 een gemiddelde van de te verwachte middagtemperatuur (Figuur 2a) en het te verwachten avondlijk hitte-eiland effect (Figuur

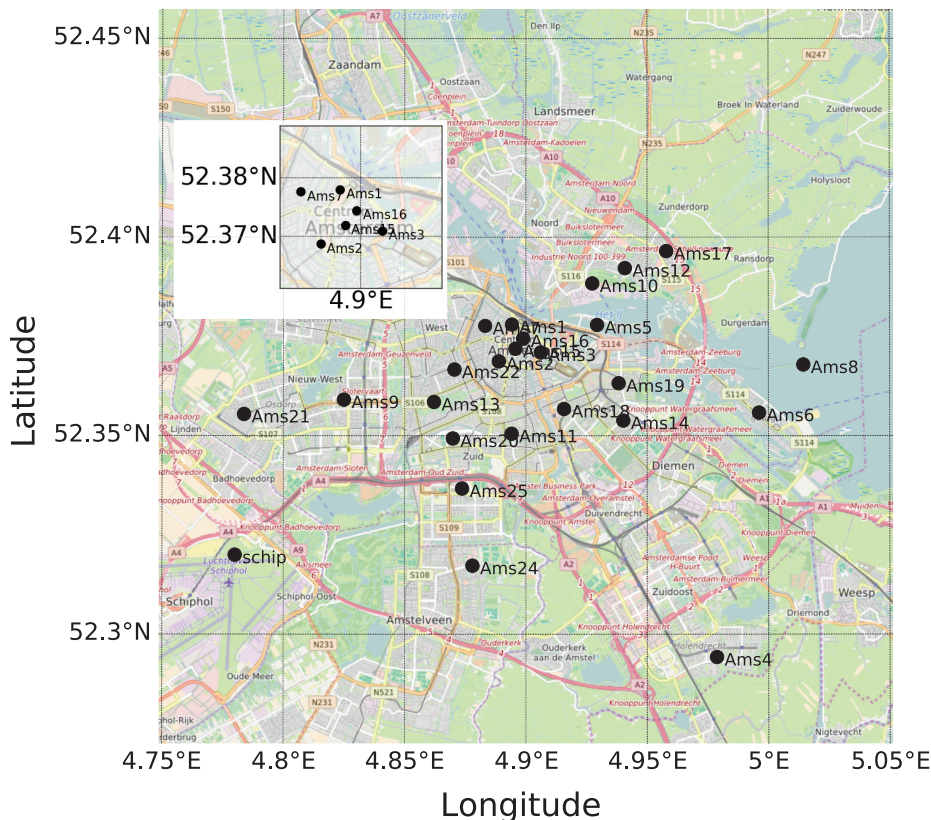
2b) voor een periode van warm weer gedurende de zomer van 2015. De laagste waarden voor de middagtemperatuur, ongeveer 21 °C, werden verwacht boven de grote waterlichamen (Figuur 2a), zoals het IJmeer, 't IJ en de Amstel. De hoogste temperatuur van ongeveer 28 °C werd verwacht voor de zuidelijke en westelijke voorsteden van Amsterdam. Dit zijn relatief open gebieden met stedelijke 'canyons' die relatief breed zijn in vergelijking met de hoogte van de omliggende gebouwen. De oostelijke voorsteden van Amsterdam zijn aanzienlijk koeler vanwege de noordoostelijke winden die relatief koele lucht vanuit het IJmeer meebrengen. Andere (kleinere) waterlichamen hebben een minder groot effect op de luchttemperaturen: de reikwijdte van deze waterlichamen varieert typisch van honderd tot een paar honderd meter, afhankelijk van de grootte van het waterlichaam.

Figuur 2b toont de verwachte gemiddelde avondlijke (20, 21, 22 UTC) afwijking van de lokale luchttemperatuur ten opzichte van de temperatuur te Schiphol (zie locatie in Figuur 2b). De hoogste afwijking, het lokale UHI, bedraagt ongeveer 2.5 °C en werd verwacht voor gebieden direct ten westen en ten zuiden van de Amsterdamse binnenstad. Lage UHI-waarden werden verwacht voor de waterlichamen, de stadsparken en (in mindere mate) de verstedelijkte wijken met relatief veel groen.

Amsterdam observatienetwerk

De weersverwachtingen die met het UFS zijn gemaakt zijn geverifieerd met behulp van waarnemingen die zijn gedaan op het synoptische weerstation Schiphol en met 24 stedelijke weerstations die op een hoogte van 4 m zijn gemonteerd op lantaarnpalen in Amsterdam (zie Figuur 3). Het observatienetwerk is zo ontworpen dat de weersgrootheden in zoveel mogelijk Amsterdamse wijktypen kunnen worden bepaald: het historische centrum dat gekenmerkt wordt door drie verdiepingen magazijnen langs grachten en kleine straten, de grote wijken rondom het historisch centrum die bestaan uit woningen van typisch drie verdiepingen of vier verdiepingen die zijn gebouwd in de periode van 1920 tot 1940, de buitenrand van Amsterdam (buiten de ringweg A10) die wordt gekenmerkt door relatief nieuwe wijken met huizen van drie verdiepingen, en de Zuidas, een kleine commerciële strook in het zuidelijke deel van Amsterdam met relatief hoge gebouwen en diepe stedelijke 'canyons'.

De stedelijke weerstations meten de luchttemperatuur en -vochtigheid en bestaan uit Decagon VP-3 vochtigheids- / temperatuursensoren die in een rond schild (184 mm diameter)



Figuur 3. Kaart (www.openstreetmap.org/#map=11/52.3525/4.8584) van Amsterdam en de omliggende gebieden met daarin de locaties van de 24 weerstations en de locatie van het SYNOP Schiphol luchthavenweerstation (WMO code 06240). Het ingevoegde kaartje toont een vergroting van de kaart voor het centrum van Amsterdam, inclusief de stations in het centrum van Amsterdam.

zijn geplaatst. Uniek is dat bovenop het schild een zonne-energie-aspiratieventilator (Davis) is geïnstalleerd die wordt aangedreven door twee zonnepanelen die boven het schild zijn geplaatst op een $\pm 45^\circ$ hoek in het oosten en het westen. Zes van de stedelijke stations waren tevens uitgerust met een DS-2 sonische anemometer van Decagon Devices. Deze sensor heeft een windsnelheidsdrempel van 0.00 m/s en een zeer hoge resolutie van 0.01 m/s. Windsnelheidsgegevens zijn beschikbaar voor het meetpunt Ams8, dat zich bevindt op een klein eiland ten oosten van Amsterdam, de meetpunten Ams3 en Ams6, die zich bevinden in de buitenwijken, de meetpunten Ams2 en Ams16, die zich in drukke straten in het centrum van Amsterdam en meetpunt Ams25 bevinden, welke zich op de Zuidas bevindt. In Figuur 3 is ook het SYNOP weerstation Schiphol aangegeven dat is gebruikt als referentiemeting voor het landelijk gebied.

Validatie van UFS

Voor elk uur zijn de verwachte temperatuur, waterdampdruk, en windsnelheid vergeleken met waarnemingen. In Figuur 4 is deze validatie samengevat door de mediaan van de absolute fout voor alle metingen en verwachtingen tijdens de zomerperiode van 2015 uit te zetten als functie van de verwachtingsperiode. Hieruit blijkt dat de verwachtingen voor lokale middagtemperaturen zeer goed zijn (Figuur 4a), ook voor de verwachtingen die zijn gemaakt op de relatieve grove rekendomeinen. Voor het verwachten van de temperatuur 's avonds en 's nachts (als het avondlijk hitte-eilandeffect optreedt) en ook voor de waterdampdruk (Figuur 4b), blijkt het UFS een duidelijke meerwaarde te hebben: de verwachte mediaan

van de absolute fout is voor waarden voor het stedelijk warmte-eilandeffect zoals berekend met de twee fijnste domeinen veel kleiner dan de mediaan van de absolute fout voor waarden die zijn berekend met behulp van de twee grovere rekendomeinen.

Voor de windsnelheid (Figuur 4c) is er een duidelijk onderscheid tussen het domein met de grootste roosterafstand, dat het Amsterdamse gebied als landelijk identificeert en derhalve de neiging heeft om de windsnelheid te overschatten, en de fijnere rekenroosters die het Amsterdamse gebied als stedelijk identificeren, en dus veel lagere, meer realistische windsnelheden verwachten in de stedelijke 'canyon'.

Verwachtingen voor menselijk thermisch comfort

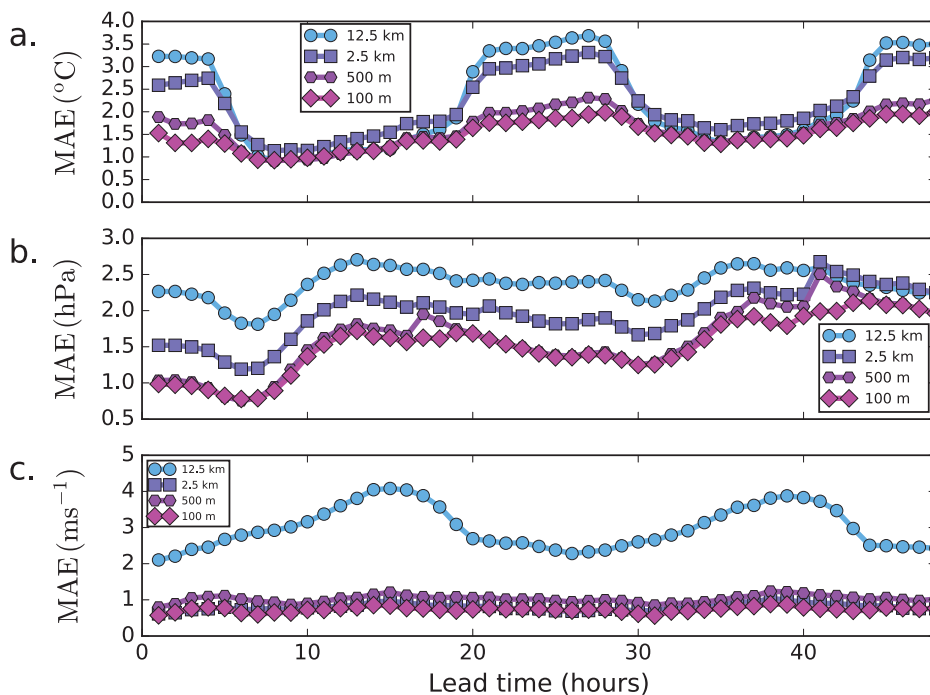
Het UFS maakt weersverwachtingen mogelijk die direct kunnen worden gebruikt om verwachtingen te maken van het thermische comfort dat mensen ervaren (Heusinkveld et al., 2017). Om dit te illustreren hebben we voor de zomer van 2015 het UFS gebruikt om verwachtingen te maken voor van de Simplified Wet Globe Globe Temperature (SWBGT) (Fisher et al., 2012). De SWBGT wordt berekend als een lineaire combinatie van de temperatuur en de waterdampdruk op leefhoogte en kan worden beschouwd als een proxy voor de stress die mensen ervaren als gevolg van een hoge temperatuur en/of luchtvochtigheid. Tabel 2 laat zien wat de skill is van het UFS-systeem voor het verwachten van gebeurtenissen waarbij SWBGT een drempelwaarde van 26 °C overschrijdt op plaatsen waar waarnemingen beschikbaar zijn. Een drempelwaarde van 26 °C staat gelijk aan een gematigd risico. Uit Tabel 2 blijkt dat de UFS dergelijke gebeurtenissen van extreme warmte goed kan voorspellen.

Discussie en conclusie

Samen met het Netherlands eScience Center ontwikkelde de leerstoelgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit van de Wageningen Universiteit een fijnmazig weersverwachtingssysteem dat speciaal is ontworpen voor stedelijke gebieden. Het UFS is een volwaardig weersverwachtingssysteem dat

Middagen met SWBGT > 26 °C	Meting		
	Ja	Nee	Totaal
Verwachting	Ja	853	1032
	Nee	224	11846
	Totaal	1077	11891
			12923

Tabel 2. Skill van gebeurtenissen voor middagen met SWBGT > 26 °C.



Figuur 4. Verificatie van de UFS-verwachtingen gedurende de zomer van 2015. De mediaan van de absolute fout in de verwachte uurlijkse temperatuur (a), de verwachte uurlijkse waterdampdruk (b) en de verwachte uurlijkse windsnelheid (c) als een functie van de verwachtingsperiode.

deterministische verwachtingen levert van relevante weer-variabelen op buurt- en in sommige gevallen straatniveau.

We hebben het UFS gebruikt om gedurende de zomer van 2015 weersverwachtingen te maken voor het stedelijk gebied van Amsterdam tot 48 uur vooruit. Mede door de uitgebreide landoppervlakinformatie produceert het UFS weersverwachtingen die de ruimtelijke verdeling van weersomstandigheden op een schaal van enkele honderden meter goed in kaart brengen als ze worden vergeleken met waarnemingen. Tevens kan het UFS effectief worden gebruikt om verwachtingen te maken voor relevante indices voor het menselijk thermische comfort. Omdat deze verwachtingen rechtstreeks van toepassing zijn op schalen waarop mensen leven, slapen, werken en recreëren, kunnen ze door het grote publiek en overheidsinstanties worden gebruikt om passende maatregelen te treffen.

Uiteraard kan het UFS nog worden verbeterd. Zo zou het huidige deterministische systeem kunnen worden aangevuld met een probabilistische verwachting, bijvoorbeeld door mee te nemen wat de onzekerheid is als de stedelijke parameters worden gevarieerd of als een andere fysisch pakket wordt gebruikt om het effect van de stedelijke omgeving op het lokale weer uit te rekenen. Ook zou het huidige systeem kunnen worden uitgebreid met een data-assimilatiesysteem waarin waarnemingen worden gebruikt om het UFS bij te sturen. Daarnaast kan er wellicht nog veel verbeterd worden ten aanzien van de methoden die worden gebruikt om het turbulente transport in de atmosferische grenslaag uit te rekenen, wat met name van belang is als de toepassing van het UFS wordt uitgebreid naar andere gebieden of andere seizoenen die naar verwachting worden gekarakteriseerd door grenslagen die stabiel tot zeer stabiel zijn gestratificeerd. Ook zou het goed zijn als inzichtelijk wordt gemaakt in welke gevallen een relatief duur systeem als het UFS noodzakelijk is om goede weersverwachtingen voor de stad te maken. Mogelijk komen er dan situaties aan het licht waarin de mesoschaal dynamica in en rondom de stad van minder belang is. In die gevallen zou kunnen wor-

den volstaan met een relatief recht-toe-rechtaan downscaling van een grofmazig weersverwachtingsmodel. Niettemin laten onze resultaten zien dat weersverwachtingen voor stedelijke gebieden mogelijk zijn en dat deze binnen het bereik van weersverwachtingssystemen liggen. Daarvoor is het wel noodzakelijk dat passende data- en rekeninfrastructuur voorhanden is.

Dit artikel is de samenvatting van een uitgebreid artikel dat is verschenen in de Bulletin of the American Meteorological Society (Ronda et al., 2017).

Literatuur

Bauer, P., A. Thorpe, G. Brunet, 2015: The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature* 525, 47-51, doi:10.1038/nature14956.

Chen, F., and co-authors, 2011: The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *Int. J. of Climatol.* 31(2), 13-39, doi: 10.1002/joc.2158.

Fazeli, R., M. Ruth, and B. Davidsdottir, 2016: Temperature response functions for residential energy demand – a review of models. *Urban Clim.* 15, 45-69, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2016.01.001>.

Fischer, E.M., K.W. Oleson, and D.M. Lawrence, 2012: Contrasting urban and rural heat stress responses to climate change. *Geophys. Res. Lett.* 39(3), L03705, doi: 10.1029/2011GL050576.

Heusinkveld, B.G., G. Sterenborg, G.J. Steeneveld, J.J. Attema, R.J. Ronda, and A.A.M. Holtslag, 2017: Smartphone app brings human thermal comfort forecast in your hands. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 99(12), 2533-2541, doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0082.1>

Howard, L., 1833: *The climate of London*. Volumes I-III, London (UK).

Huynen, M.M.T.E.M., P. Martens, D. Schram, M.P. Weijenberg, and A.E. Kunst, 2001: The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population. *Environm. Health Persp.* 109(5), 463, doi:10.2307/3454704.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. T.F. Stocker, and co-authors, eds., Cambridge University Press, Cambridge (UK).

Oke, T.R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quart. J. of the Roy. Meteor. Soc.* 108, 1-24, doi: 10.1002/qj.49710845502.

Ronda, R.J., G.J. Steeneveld, B.G. Heusinkveld, J.J. Attema, and A.A.M. Holtslag, 2017: Urban finescale forecastings reveals weather conditions with unprecedented detail. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 99(12), 2675-2688, doi: DOI:10.1175/BAMS-D-16-0297.1

Skamarock, W.C. and J.B. Klemp, 2008: A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *J. Comput. Phys.* 227(7), 3465-3485, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>.

United Nations (UN), Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2014. *World Urbanization Prospects: the 2014 Revision, Highlights*. Publication ST/ESA/SER.A/352, UN. [Available online at esa.un.org/unpd/wup/Publications/Files/WUP2014-Highlights.pdf]

U.S. Environmental Protection Agency, (EPA), 2008: *Reducing urban heat islands: compendium of strategies*. [published by EPA, 2008 and available online at www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium].

World Meteorological Organization/World Health Organization, 2015: *Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development*. G.R. McGregor, lead Ed., P. Bessemoulin, K. Ebi, B. Menne, Eds. WMO-No. 1142. [Available online at www.who.int/globalchange/publications/WMO_WHO_Heat_Health_Guidance_2015.pdf?ua=1]

Zander, K.K., W.J.W. Botzen, E. Oppermann, T. Kjellstrom, and S.T. Garnett, 2015: Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia. *Nature Clim. Change* 5, 647-651, doi:10.1038/nclimate2623.