

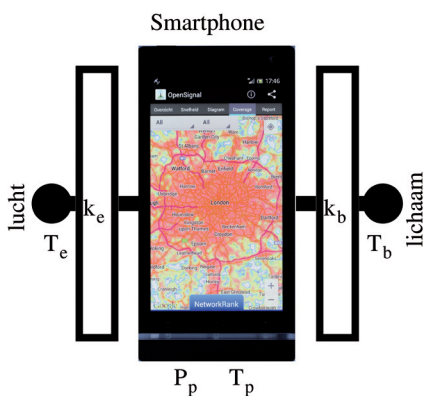
# Stadstemperatuur in beeld met smartphones

A. OVEREEM<sup>1</sup> (KNMI/WAGENINGEN UNIVERSITY), J.C.R. ROBINSON (OPENSIGNAL), H. LEIJNSE (KNMI), G.J. STEENEVELD (WAGENINGEN UNIVERSITY), B.K.P. HORN (MIT), R. UIJLENHOET (WAGENINGEN UNIVERSITY)

**Nauwkeurige observaties van luchttemperaturen zijn belangrijk voor de meteorologie. Ze zijn onmisbaar voor het bestuderen van het stedelijk warmte-eiland en de negatieve gevolgen van hoge temperaturen op de menselijke gezondheid. Echter, de beschikbaarheid van luchttemperatuurmetingen in steden is vaak beperkt. Relatief nauwkeurige luchttemperatuurinformatie kan worden verkregen uit een alternatieve, alomtegenwoordige bron: smartphones. Smartphones met het besturingssysteem Android waarop de applicatie OpenSignal is geïnstalleerd registreren de temperatuur van de accu en sturen deze door naar een database. Een conceptueel warmtetransportmodel is toegepast om daggemiddelde luchttemperaturen te schatten uit accutemperatuurmetingen in Nederlandse steden voor de warme zomer van 2013. Hierbij ligt de nadruk op Amsterdam Stad en Rotterdam.**

## Introductie

De gratis applicatie OpenSignal voor smartphones (Fig. 1) brengt de sterkte van draadloze netwerken in kaart. Smartphones hebben een sensor die de accutemperatuur registreert; die wordt



Figuur 1. Accutemperaturen van smartphones ( $T_p$ ) kunnen worden verzameld met de Androidapplicatie OpenSignal en door middel van een warmtetransportmodel worden omgerekend naar een luchttemperatuur. De accutemperatuur wordt beïnvloed door omgevingstemperatuur ( $T_e$ ), lichaamstemperatuur ( $T_b$ ), isolatie tussen smartphone en omgeving ( $k_e$ ), en isolatie tussen smartphone en lichaam ( $k_b$ ).  $P_p$  is de thermische energie die door de smartphone per tijdseenheid wordt gegenereerd.

opgeslagen door de applicatie. Overeem et al. (2013) hebben aangetoond dat uit deze accutemperatuurmetingen redelijk nauwkeurige daggemiddelde temperaturen kunnen worden geschat voor acht buitenlandse steden. Dezelfde methodologie<sup>2</sup> wordt hier toegepast om de daggemiddelde temperatuur voor Nederlandse steden te schatten.

## Data

Accutemperatuurmetingen voor Rotterdam en Amsterdam Stad zijn verkregen via de applicatie OpenSignal (<http://opensignal.com/>) voor de periode 1 juni 2013 tot en met 31 augustus 2013, de meteorologische zomer van 2013. Dit vereist alleen dat smartphonegebruikers de applicatie installeren en toestaan dat

data worden verzameld. Een draadloze verbinding is niet continu nodig, omdat de data worden opgeslagen op de smartphone en periodiek worden verstuurd naar een server. Alleen metingen waarbij de smartphone sinds zeer kort wordt opgeladen en die waarbij de smartphone wordt aan- of uitgezet en de accu ontladend wordt geselecteerd (de laatste groep is het grootst). Metingen waarbij de smartphone ontladend en de lader niet geselecteerd. Na het uitvoeren van deze selecties worden de accutemperatuurmetingen in tijd en ruimte gemiddeld om daggemiddelde (0 - 24 uur lokale tijd) accutemperatuurgegevens voor Rotterdam en Amsterdam Stad te krijgen. Daggemiddelde luchttemperaturen van weerstations worden gebruikt voor de kalibratie van het warmtetransportmodel en voor de validatie van geschatte luchttemperaturen. Voor Rotterdam wordt het KNMI-station Rotterdam gebruikt, dat buiten de stad ligt. Voor Amsterdam Stad worden de luchttemperaturen van vijf weerstations van de GGD Amsterdam gemiddeld. Deze stations liggen in en rond het centrum van Amsterdam en zijn daarom representatief voor de binnenstad.

## Warmtetransportmodel

Een smartphone wordt doorgaans, maar lang niet altijd, dicht bij het lichaam van de gebruiker gedragen. De smartphone genereert thermische energie die in evenwicht moet zijn met de warmtestroom naar het lichaam en de omgeving. Warmtegeleiding tussen twee systemen is recht evenredig met het temperatuurverschil tussen de systemen en hangt af van de isolatie tussen telefoon en omgeving en tussen telefoon en lichaam (Fig. 1). Deze wetmatigheid wordt gebruikt voor het afleiden van een stationair warmtetransportmodel waarmee de daggemiddelde luchttemperatuur kan worden geschat uit

de daggemiddelde accutemperatuur voor de gekozen stad  $j$ :

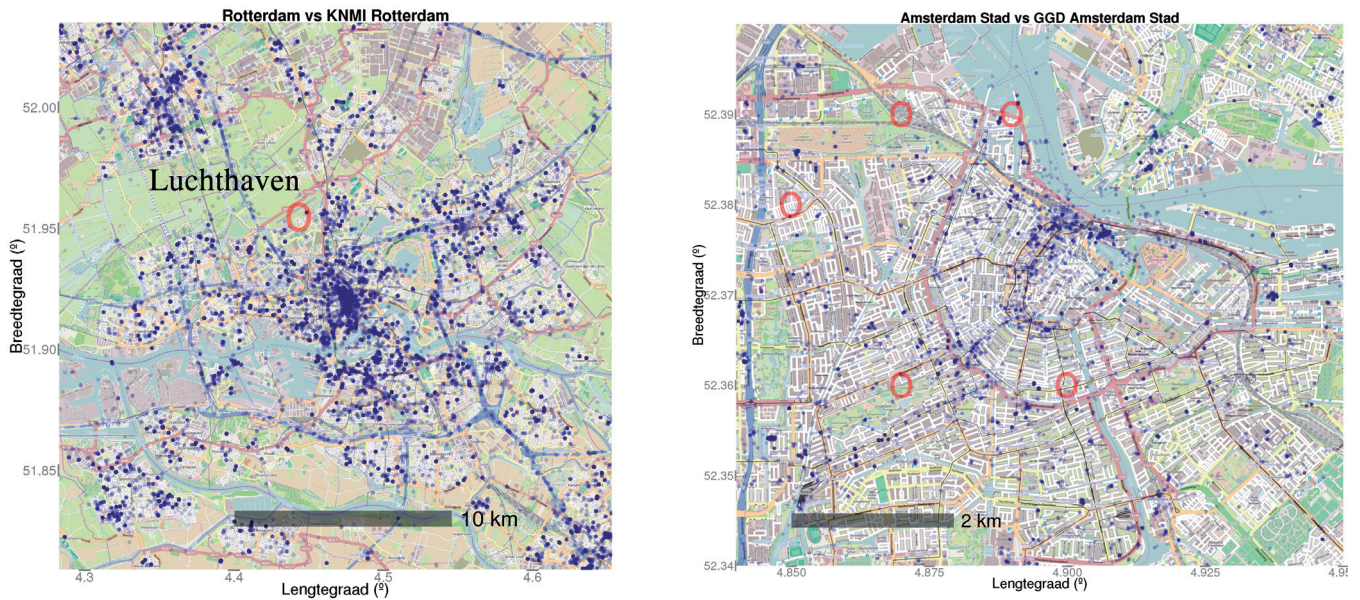
$$\bar{T}_{e,j,d}^{A,dag} = m_j (\bar{T}_{p,j,d}^{A,dag} - T_0) + T_0 + \epsilon_{j,d},$$

waarin  $\bar{T}_{e,j,d}^{A,dag}$  de daggemiddelde omgevingstemperatuur of temperatuur van de "urban canopy layer",  $\bar{T}_{p,j,d}^{A,dag}$  de daggemiddelde accutemperatuur (zowel in ruimte A als tijd) en  $T_0$  een constante evenwichtstemperatuur. Merk op dat  $m_j$  een coëfficiënt is,  $\epsilon_{j,d}$  een ruisterm en  $d$  het dagnummer in de tijdreeks; zie Overeem et al. (2013) voor de afleiding van dit warmtetransportmodel. Andere warmtebronnen, zoals de zon, worden niet meegenomen.

Voor elke stad worden, gebruikmakend van de daggemiddelde waargenomen lucht- en accutemperaturen, optimale waarden voor  $m_j$  bepaald (2.4 voor Rotterdam; 2.1 voor Amsterdam Stad; ter vergelijking: voor de acht steden in Overeem et al. (2013): 2.0 - 3.0). De waarde voor  $T_0$ , 39.0 °C, is constant genomen voor alle steden en verkregen uit Overeem et al. (2013). Voor elke stad wordt een kalibratie- en een validatiedataset gemaakt door afwisselend één dag aan de kalibratie- en één dag aan de validatiedataset toe te delen. Dit om potentiële systematische fouten wegens temperatuurverschillen in de gekozen zomer te voorkomen. De kalibratiedataset wordt gebruikt voor het schatten van de coëfficiënt  $m_j$ . De geschatte luchttemperaturen worden vergeleken met de validatiedataset.

## Resultaten en discussie

Vervolgens worden luchttemperaturen geschat uit accutemperatuurmetingen voor Rotterdam en Amsterdam Stad. Fig. 2 toont kaarten met de locaties van geselecteerde accutemperatuurmetingen voor beide steden. Uit Fig. 3 blijkt dat de dynamiek van de daggemiddelde accutemperaturen (oranje lijn) en de



Figuur 2. Kaarten van Rotterdam en Amsterdam Stad (©OpenStreetMap contributors; openstreetmap.org) met de locaties van geselecteerde accutemperatuurmetingen (blauwe stippen) voor 1 juni - 31 augustus 2013. Rode ovaal geven locaties van KNMI-weerstation Rotterdam (4.3 km van stadscentrum Rotterdam) en weerstations GGD (Amsterdam Stad) aan.

waargenomen luchttemperaturen (zwarte lijn) goed overeenkomen. De geschatte daggemiddelde luchttemperaturen wijken doorgaans weinig af van de waargenomen luchttemperaturen, ook voor de validatiedataset. Dit blijkt o.a. uit de lage gemiddelde absolute fout (MAE) van 1.2 °C (Rotterdam) of 1.4 °C (Amsterdam Stad), zie Fig. 4.

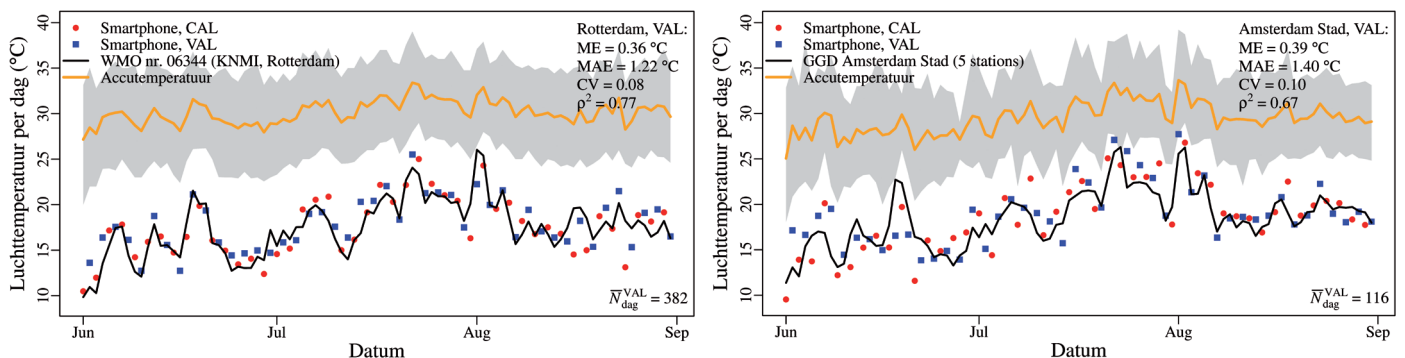
De resultaten voor Rotterdam zijn iets beter dan die voor Amsterdam Stad. Een verklaring hiervoor is het grotere aantal accutemperatuurmetingen, gemiddeld 382 per dag, terwijl voor Amsterdam Stad gemiddeld slechts 116 metingen beschikbaar waren. De resultaten voor Amsterdam Stad tonen wel aan dat met een relatief klein aantal metingen toch nog redelijk nauwkeurige daggemiddelde temperaturen kunnen worden geschat voor een relatief klein gebied van 50 km<sup>2</sup>. Dit is representatiever voor het stadscentrum dan bij Rotterdam en de acht buitenlandse steden in Overeem et al. (2013), waar een veel groter gebied wordt beschouwd. Bovendien wordt in

Amsterdam Stad gekalibreerd en geverifieerd met vijf weerstations van de GGD, die representatiever zullen zijn voor het gebied met accutemperatuurmetingen dan wanneer slechts één weerstation, b.v. KNMI-station Schiphol, zou worden gebruikt. Overigens liggen de GGD-stations nog steeds enkele kilometers van het Centraal Station, waar de meeste accutemperatuurmetingen beschikbaar zijn. Verder zijn de resultaten voor Amsterdam Stad in vergelijking met weerstation Schiphol maar marginaal slechter (MAE is 1.6 °C i.p.v. 1.4 °C, CV is 0.12 i.p.v. 0.10 en  $\rho^2$  is 0.64 i.p.v. 0.67).

In Fig. 5 is voor zes verschillende combinaties van stad en weerstation(s) voor de validatiedataset de verklaarde variantie ( $\rho^2$ ) uitgezet tegen het daggemiddelde aantal accutemperatuurmetingen. De kwaliteit van geschatte luchttemperaturen neemt snel toe voor een toenemend aantal metingen en dit kan redelijk goed worden beschreven door een exponentiële functie. De kwaliteit neemt duidelijk

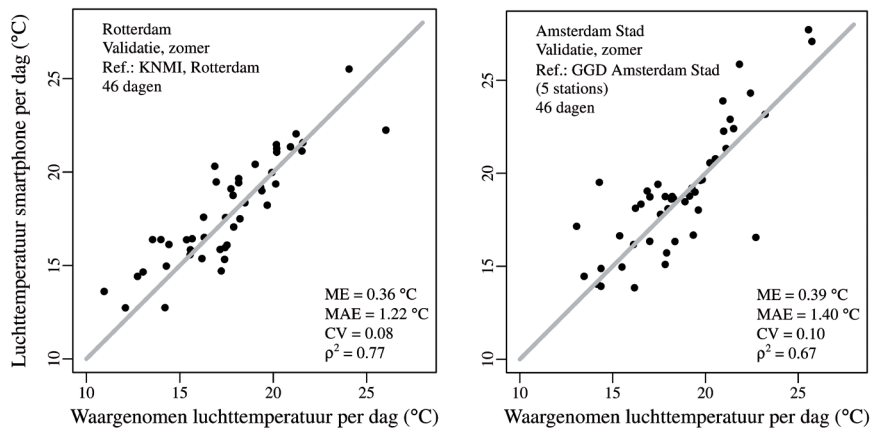
af indien minder dan 100 waarnemingen beschikbaar zijn.

Een belangrijk probleem is dat een deel van de accutemperatuurmetingen representatief is voor binnenshuis en niet voor buitenshuis. Bovendien wordt voor elke stad een constante waarde van  $m_i$  verondersteld, terwijl in werkelijkheid voor elke meting een eigen thermische geleiding zal gelden. Een ander punt is de representativiteit van zowel de weerstations als de accutemperatuurmetingen. Temperaturen van beide bronnen zijn op verschillende locaties gemeten en het omliggende landgebruik kan ook verschillen. Dit speelt met name in Rotterdam en in mindere mate in Amsterdam Stad. Het weerstation op de luchthaven van Rotterdam is niet representatief voor heel Rotterdam (Heusinkveld et al., 2014). Vanwege de complexiteit van en diversiteit aan microklimaten in de stad zullen de geschatte daggemiddelde luchttemperaturen alleen een grove schatting van de werkelijke gebiedsgemiddelde luchttemperatuur geven. Overigens is



Figuur 3. Tijdreeksen voor Rotterdam en Amsterdam Stad van daggemiddelde waargenomen en geschatte luchttemperaturen, en accutemperaturen voor 1 juni - 31 augustus 2013. Grijs gearceerde gebieden tonen de 10-90% percentielen van accutemperaturen. ME is de systematische fout (bias), MAE de gemiddelde absolute fout, CV de variatiecoëfficiënt (d.w.z. de verhouding van de standaarddeviatie van de verschillen en de daggemiddelde waargenomen temperatuur), en  $\rho^2$  de gekwadeerde correlatiecoëfficiënt (verklaarde variantie). CAL en VAL betekenen, respectievelijk, kalibratie- en validatiedataset.





Figuur 4. Spreidingsdiagrammen van geschatte versus waargenomen daggemiddelde luchttemperatuur voor 1 juni - 31 augustus 2013. De grijze lijn is de  $y = x$  lijn. Zie bijschrift Fig. 3 voor betekenis van acroniemen.

de locatie van ruwweg 40% van de accutemperatuurmetingen binnen 300 meter nauwkeurig. Zie Overeem et al. (2013) voor een meer uitgebreide discussie.

### Conclusies

Deze studie toont aan dat het mogelijk is om relatief nauwkeurige daggemiddelde luchttemperaturen voor stedelijk gebied in Nederland te schatten uit accutemperatuurmetingen van smartphones met behulp van een eenvoudig warmtetransportmodel. Middeling over een groot aantal accutemperatuurmetingen levert een bruikbaar signaal op, hoewel de applicatie noch de smartphones zijn ontworpen voor dat doel.

Omdat 20% van het landoppervlak op aarde mobiele telefoniedekking heeft en 500 miljoen apparaten het besturingssysteem Android gebruiken, kan dit mogelijkheden bieden voor het maken van realtime-kaarten van luchttemperaturen uit smartphones, met name in dichtbevolkte gebieden. De applicatie OpenSignal levert op dit moment overigens geen realtime-metingen. Veel meer onderzoek

is nodig voordat zo'n toepassing eventueel in zicht komt.

Een wens is het filteren van metingen die niet representatief zijn voor buitenshuis, wellicht mogelijk door het gebruik van data van de lichtsensoren in de smartphone. Een van de ideeën is om het bestaande algoritme toe te passen op tientallen steden, waarbij een 1-jarige kalibratie- en een 1-jarige validatiedataset zal worden gebruikt. Dit biedt meer mogelijkheden voor het bestuderen van de relatie tussen het aantal gebruikte accutemperatuurmetingen en de kwaliteit van de resulterende temperatuurschattingen, maar ook voor het modelleren van de coëfficiënt  $m_j$  van het warmtetransportmodel als functie van seizoen en klimaat. Specifiek zal de kwaliteit van temperatuurschattingen voor lage luchttemperaturen moeten worden onderzocht. Zo is voor Moskou en Buenos Aires een overschatting gevonden van luchttemperaturen lager dan 5 °C. Een mogelijke verklaring is dat meer mensen binnen blijven bij koud weer. Vervolgonderzoek zal zich ook richten op een gedetailleerde studie voor een stad met duizenden accutemperatuurmetingen en een dicht meteorologisch netwerk, waarbij de kwaliteit van temperatuurkaarten en de mogelijkheid om de dagelijkse gang vast te leggen zal worden onderzocht. Het stedelijk warmte-eiland manifesteert zich met name in de avond en in het eerste deel van de nacht. Onderzoek hiernaar vraagt om bv. uurgemiddelde i.p.v. daggemiddelde temperatuurschattingen. Een beperking is dat in de nacht minder accutemperatuurmetingen beschikbaar zijn.

Het verzamelen van weerinformatie uit smartphones past in een bredere ontwikkeling die "crowdsourcing" wordt genoemd. Wij verwachten dat crowdsourcing een belangrijke aanvullende bron van weer- en klimaatinformatie zal worden. Vele initiatieven zijn al gestart,

zoals het verzamelen van metingen van weerstations van amateurs (<http://wow.metoffice.gov.uk>; <http://www.netatmo.com/weathermap>), het doorgeven van neerslagtype (<http://www.nssl.noaa.gov/projects/ping/>) en het meten van fijnstof met iPhones (<http://ispex.nl/>); zie Muller et al. (2014) voor een overzicht. Ook crowdsourcing d.m.v. sensoren van smartphones kan hieraan een bijdrage leveren. Zo hebben sommige telefoons een druk-, temperatuur-, of vochtigheids-sensor en is doorgaans een lichtsensoren aanwezig. Het bedrijf OpenSignal heeft daarom de gratis applicatie WeatherSignal ontwikkeld, waarmee dit soort gegevens kunnen worden ontsloten (<http://weathersignal.com/>). In tegenstelling tot de accutemperatuursensor zijn dit soort sensoren wél ontwikkeld om omgevingsvariabelen te registreren. Accutemperaturen hangen af van het gebruik van de telefoon en waarschijnlijk ook van het gebruikte besturingssysteem, het model smartphone, de schermgrootte en gebruikte accutechnologie (denk aan nieuwe accu's). Van specifiek ontworpen sensoren die direct de omgevingsvariabele meten valt dan ook het meeste te verwachten. Dit vergroot de kans op het succesvol monitoren van weer en klimaat in stedelijke gebieden met smartphones aanzienlijk.

### Naschrift

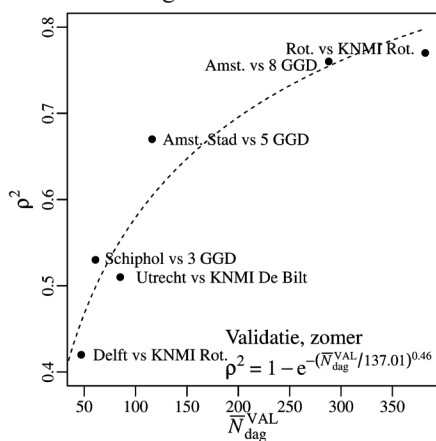
Dit artikel is een gedeeltelijke vertaling van Overeem et al. (2013), maar alle gepresenteerde resultaten zijn nog niet eerder gepubliceerd. Deze studie werd financieel ondersteund door technologiestichting STW (project 11944) en het NWO E-science project "Summer in the city" (dossiernummer 027.012.103). Met dank aan GGD Amsterdam voor de temperatuurdata van weerstations.

### Literatuur

- Heusinkveld, B. G., G. J. Steeneveld, L. W. A. van Hove, C. M. J. Jacobs, A. A. M. Holtslag, 2014: Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by urban land use. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 677–692, doi:10.1002/2012JD019399
- Muller, C. L., L. Chapman, S. Johnston, C. Kidd, S. Illingworth, G. Foody, A. Overeem, R. Graves, 2014: Crowdsourcing for climate and atmospheric sciences: Current status and future potential. *International Journal of Climatology* (ingediend).
- Overeem, A., J. C. R. Robinson, H. Leijnse, G. J. Steeneveld, B. K. P. Horn, R. Uijlenhoet, 2013: Crowdsourcing urban air temperatures from smartphone battery temperatures. *Geophysical Research Letters*, 40, 4081–4085, doi:10.1002/grl.50786 (open toegang).

<sup>1</sup> aart.overeem@wur.nl

<sup>2</sup> Alleen wordt de eis van minimaal 100 metingen per dag en minimaal 20 uren per dag met tenminste 1 meting niet gehanteerd.



Figuur 5. Gekwadrateerde correlatiecoëfficiënt  $\rho^2$  (verklaarde variantie) versus het daggemiddelde aantal accutemperatuurmetingen voor de validatiedataset voor zes combinaties van steden en weerstation(s).