

Validatierapport Landelijke Hittekaart

Sytse Koopmans
Arjan Droste
Bert Heusinkveld
Gert-Jan Steeneveld

Wageningen University
Meteorology and Air Quality Section

Juni 2020

Voorwoord

Voor u ligt het rapport “Validatie Landelijke Hittekaart” dat een onderdeel vormt van de opgeleverde landelijke hittestresskaart (zie klimaat-effectatlas.nl) en de rapportage daarover. Dit deel van de rapportage omvat een evaluatie van de reproductie van de hittekaart voor Wageningen, en de validatie van de door Witteveen+Bos opgeleverde kaart tegen waarnemingen in Amsterdam en Rotterdam.

Graag bedanken wij het team van Witteveen+Bos (Luke Moth, Joris Timmermans, Anna Goede, Jasper Dijkstra en Arie de Niet) voor de fijne en constructieve samenwerking gedurende dit proces.

Het WUR team,
Sytse Koopmans
Arjan Droste
Bert Heusinkveld
Gert-Jan Steeneveld

Inhoudsopgave

1. Introductie	4
2. Methodologie	5
2.1 Waarnemingen	5
3. Resultaten validatie	8
3.1 Reproductie recept en hittekaart Wageningen	8
3.2 Evaluatie voor Amsterdam (18 Juli 2014)	9
3.3 Evaluatie voor Rotterdam (14 Augustus 2009)	13
3.4 Validatie bijzondere overgangsgebieden	16
4. Conclusie	17
5. Aanbevelingen	18
Bijlage A: Verificatienotitie Wageningen PET kaart	20
A1: Input bronbestanden	20
A2: Aanpassingen aan recept	21
A2.1: Aanpassing bepaling gebiedsgemiddelde SVF	21
A2.2: Aanpassingen voor windbepaling van bomen	23
A2.3: Zonshoogte	24
A2.4: Keuze vastzetten windrichting	24
6. Bibliografie	26

1. Introductie

In opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft een consortium van Witteveen+Bos en de sectie Meteorologie en Luchtkwaliteit van Wageningen University de Landelijke Hittekaart Gevoelstemperatuur op basis van Physiological Equivalent Temperature (PET) ontwikkeld. Deze kaart dient als hulpmiddel in de standaard klimaatstresstest hitte, om gemeenten, waterschappen, provincies te laten bepalen welke locaties op hete dagen gevoelig zijn voor hittestress en daarover met stakeholders de discussie over aan te gaan. Deze kaart is geplaatst in de Klimaateffectatlas (www.klimaateffectatlas.nl).

Klimaatverandering leidt tot een wereldwijde temperatuursverhoging, maar ook neemt naar verwachting de hoeveelheid extreem weer toe, zoals piekbuien, droogte en overstromingen. Daarnaast neemt ook de frequentie van hittegolven, hitte en warme dagen toe. In Nederland heeft het Deltaprogramma Ruimtelijke Adaptatie zogenaamde klimaatstresstests aanbevolen voor overheidsorganen die belast zijn met de ruimtelijke inrichting.

Wat betreft de kwantificering van hitte bleek in 2018 dat er een grote diversiteit aan hittekaarten op markt was, maar de verschillende maten en ruimtelijk schalen van deze kaarten leverden verwarring bij de stakeholders. Er was behoefte aan uniformiteit en standaardisatie, en een advies over de best passende hittemaat voor ons land. In een eerdere studie van De Nijs et al. (2019) is na een discussie binnen een groot consortium van experts de PET als beste maat gekozen. De PET gaat uit van de energiehuishouding van een mens, en is daarmee een fysische maat, en veel minder een empirische maat. Ook is gekozen voor een tijdvak van 12:00-18:00 lokale tijd als meest relevant tijdvak waarop hittestress moet worden geëvalueerd.

Vervolgens is op basis van bestaande kennis een recept ontwikkeld dat de procedure beschrijft hoe een hittekaart tot op 1m² moet worden berekend (Koopmans et al., 2019; 2020). Deze methode is als proof-of-concept uitgevoerd voor de stad Wageningen voor een 1:1000 hittedag (1 juli 2015). Deze kaart voor Wageningen is gevalideerd tegen mobiele PET waarnemingen voor een warme dag in augustus 2013. In deze studie wordt het kaartrecept opgeschaald naar heel Nederland.

Dit deelrapport omvat de validatie van de Landelijke Hittekaart, geproduceerd door Witteveen+Bos (hierna: W+B), waarbij Wageningen University (hierna: WUR) optreedt als validerende partij. De studie omvat twee onderdelen. Stap 1 is een afzonderlijke verificatie van de methode, om te waarborgen dat W+B de methode correct heeft overgenomen uit het Hittekaart-Recept van Koopmans et al. (2019). Die verificatie is gedaan door de originele Hittekaart voor Wageningen te reproduceren: de details en resultaten van de verificatie zijn te vinden in Bijlage A. In stap 2 wordt de landelijke hittekaart gevalideerd tegen waarnemingen in Amsterdam en Rotterdam waarvoor gedetailleerde meteorologische waarnemingen beschikbaar zijn uit eerder uitgevoerde meetcampagnes. Deze waarnemingen zijn uitgevoerd door WUR, en beslaan routes door

beide steden gemaakt op een special uitgeruste meetbakfiets, die meteorologische variabelen kan meten in stedelijk gebied (Heusinkveld et al. 2014). De meetcampagnes die in Rotterdam (6 augustus 2009) en Amsterdam (18 juli 2014) gedaan zijn vonden plaats in de loop van de middag (14:00-15:00 uur lokale tijd) tijdens typische hete zomerdagen. Deze worden gekenmerkt door lage windsnelheden, geen tot weinig bewolking, en een oostelijke windrichting. Onder deze omstandigheden wordt de (stedelijke) gevoelstemperatuur overdag het hoogst, en is de potentiële hittestress dus ook het grootst.

Naast de validatie documenteren we ook een aantal kleine aanpassingen in het recept, en documenteren we een aantal extra rekenstappen die nodig bleken door gebruik van een ander bomenbestand bij de productie van de landelijke kaart dan voor de eerdere studie voor Wageningen (Koopmans et al, 2019).

Dit rapport belicht de gebruikte methode om de hittekaart te valideren (Sectie 2); informatie over de referentiemetingen die gebruikt zijn ter validatie; de resultaten van de validatie van de hittekaart tegen de metingen voor beide steden en het eindoordeel over de kwaliteit van de Landelijke Hittekaart. Enkele aanpassingen van het Recept voor het opstellen van de standaard hittekaart (De Nijs et al., 2019; Koopmans et al., 2020) bleken nodig tijdens het maken van de kaarten voor Rotterdam en Amsterdam: deze worden uitgelegd in Bijlage A.

2. Methodologie

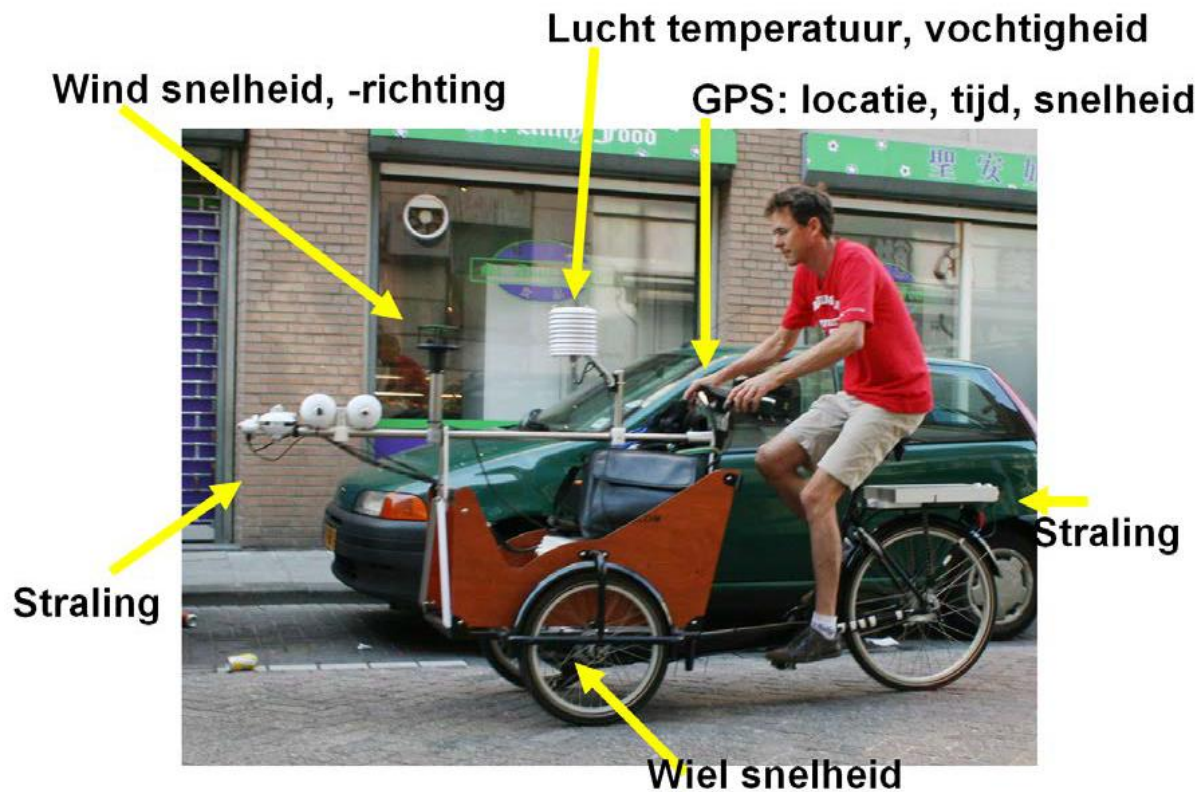
De gekozen methodologie bestaat uit 2 onderdelen. In de eerste stap wordt de hittekaart voor Wageningen zoals ontwikkeld in het recept van Koopmans et al (2020) en de hittekaart van W+B, die berekend is conform dat recept, naast elkaar gelegd zodat kan worden gecontroleerd dat de algoritmes uit het recept correct worden toegepast.

In het tweede deel wordt het algoritme voor de landelijke PET hittekaart geëvalueerd tegen waarnemingen voor Amsterdam en Rotterdam. Voor beide steden is de hittekaart door W+B berekend volgens de methodiek in Goede (2020) op basis van het recept in Nijs et al. (2019) en Koopmans et al. (2020), en op basis van ruimtelijk geïnterpoleerde invoer (kriging) van meteorologische (KNMI) waarnemingen op de betreffende datum en tijd. Beide steden hebben een nabijgelegen station wat de onzekerheid van de kriging interpolatie normaliter verkleint, dit zijn Schiphol Airport (WMO code 06240) voor Amsterdam en Rotterdam-The Hague Airport (Zestienhoven) voor Rotterdam (WMO code 06344). Enkele aanpassingen van het originele recept waren noodzakelijk: zie hiervoor de verificatienotitie in Bijlage A.

2.1 Waarnemingen

De berekende PET-waarden van de Landelijke Hittekaart zijn gevalideerd tegen metingen van een mobiel observatiesysteem: een bakfiets (zie Figuur 1) uitgerust met instrumenten om de relevante meteorologische variabelen te meten die de menselijke energiebalans (en

dus de PET) beïnvloeden. De instrumenten bestaan uit stralingsmeters voor kort- en langgolvlige straling in 6 richtingen (in/uitgaand, en in de rijrichting van de fiets); een thermo- en hygrometer voor luchttemperatuur en luchtvochtigheid; en een 2D sonische anemometer voor windsnelheid en -richting. De windmetingen zijn gecorrigeerd voor de fietssnelheid met behulp van een sensor die het aantal wielrotaties bijhoudt.

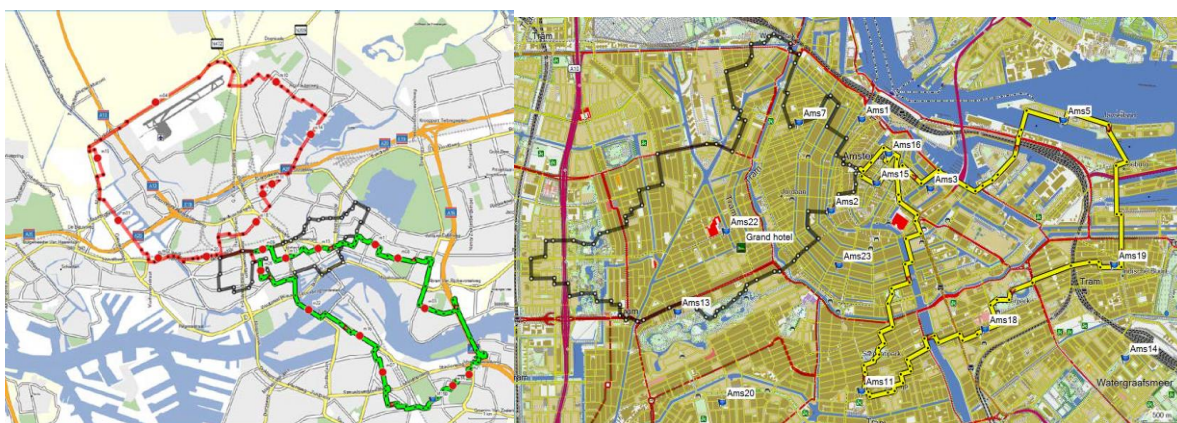


Figuur 1: Illustratie van het mobiel meetplatform met waarnemingen van alle ingrediënten van de PET.

De mobiele bakfietsmetingen zijn verricht over 2 vooraf opgezette routes in beide steden (zie Figuur 2), waarbij een zo groot mogelijk deel van het stedelijk gebied bemeten is in hetzelfde tijdsinterval. Daarnaast zijn de routes dusdanig opgezet om een grote variatie in landschapsvormen te bevatten: zowel wijken met compacte bebouwing als meer open wijken en wijken met relatief veel groen. De routes kunnen in ongeveer 1 à 2 uur worden afgelegd, waardoor er een trend in straling kan zijn door de verandering van de zonnestand tussen het begin en eind. Om deze onzekerheid zo klein mogelijk te houden is de hittekaart berekend het midden van de meetperiode.

Box 1: Bakfietsmetingen

De waarnemingen ter validatie van de Landelijk Hittekaart zijn uitgevoerd met een bakfiets uitgerust met een weerstation (Heusinkveld et al., 2014). Het mobiele weerstation bestaat uit een geventileerde thermometer ($\pm 0.2^{\circ}\text{C}$) + hygrometer ($\pm 3\%$), stralingssensoren (Pyranometer, type LP02 Hukseflux, $<3\%$ nauwkeurigheid; Pyrgeometer IR02 Hukseflux, $<3\%$ nauwkeurigheid) en een anemometer. De meetcampagne in Rotterdam gebruikte nog een passief stralingsscherm (Campbell) die vooral wat trager reageerde. De windsnelheid wordt gemeten met een ultrasone anemometer (Gill Windsonic, 3% nauwkeurigheid). Er wordt bij de windmetingen een correctie uitgevoerd voor de verplaatsingssnelheid van de fiets. De fietssnelheid wordt gemeten met een wielsensor en met een GPS (Garmin 60csx). De GPS locatie nauwkeurigheid in open terrein is <10 m (typisch), echter in dicht bebouwd stedelijk gebied met een beperkt hemelzicht neemt de nauwkeurigheid soms behoorlijk af (ongeveer <30 m). De GPS wordt tevens gebruikt voor het navigeren van een vooraf bepaalde route die zoveel mogelijk de ruimtelijke variatie van het stedelijk gebied doorkruist. Extra aandacht is besteed aan de stralingsmetingen omdat vooral direct zonlicht een grote invloed heeft op de menselijke energiehuishouding. De gemeten zonnestraling en thermische straling wordt omgerekend naar de stralingsbelasting op een gestandaardiseerd persoon (zoals aanbevolen bij de PET berekening). Het menselijke albedo en emissiviteit hebben hierbij een vaste waarde van respectievelijk 0.7 en 0.97. De gemeten waarden worden vertaald naar een PET waarde door middel van het model Rayman (Matzarakis et al., 2010). De uiteindelijke onzekerheid in de PET meting is kleiner dan 2°C .



Figuur 2: Overzicht van de fietsroutes gebruikt voor de validatie van de hittekaart voor Rotterdam (links- alleen de rode en de groene route zijn gebruikt), en voor Amsterdam (gele en zwarte lijn rechts).

Aangezien de sensoren een bepaalde traagheid hebben, zijn de metingen niet representatief voor 1 punt (1 pixel op de Landelijke Hittekaart), maar voor een gebied langs de rijroute. De bakfiets is tenslotte in beweging en wordt langs zijn pad beïnvloed door de omliggende atmosfeer. Door te middelen over een wat groter gebied dat rekening houdt met het pad van de bakfiets is de validatie meer representatief voor wat er gemeten is. De metingen van de bakfiets worden daarom vergeleken met een gemiddeld signaal

van de hittekaart, gemiddeld over 20 meter in de rijrichting en 10 meter in de breedte. Bochten, tunnels en locaties waar de fiets stilstond zijn niet meegenomen, evenals plekken waar de route over bruggen gaat, omdat het effect van water op de PET niet nauwkeurig in de Landelijke Hittekaart is ingebracht. Ook delen van de route die sterk afwijkende GPS locaties hadden (bijvoorbeeld uitschieters die binnenin gebouwen of grachten zitten) zijn verwijderd. In beide steden blijven er ruim genoeg meetpunten over (> 290) om een goede validatie te doen over gevarieerd terrein.

3. Resultaten validatie

Voordat de Landelijke Hittekaart is gecreëerd, is er gecheckt of de Wageningse hittekaart gereproduceerd kon worden (H3.1). Daarna is er met enkele aanpassingen in methodiek een kaart voor Amsterdam en Rotterdam gemaakt dat als testcase dient voor de landelijke hittekaart (H3.2 en H3.3). Deze steden zijn met bakfietsmetingen gevalideerd. In het laatste hoofdstuk zijn enkele bevindingen opgenomen in de analyse van delen van de landelijke hittekaart.

3.1 Reproductie recept en hittekaart Wageningen

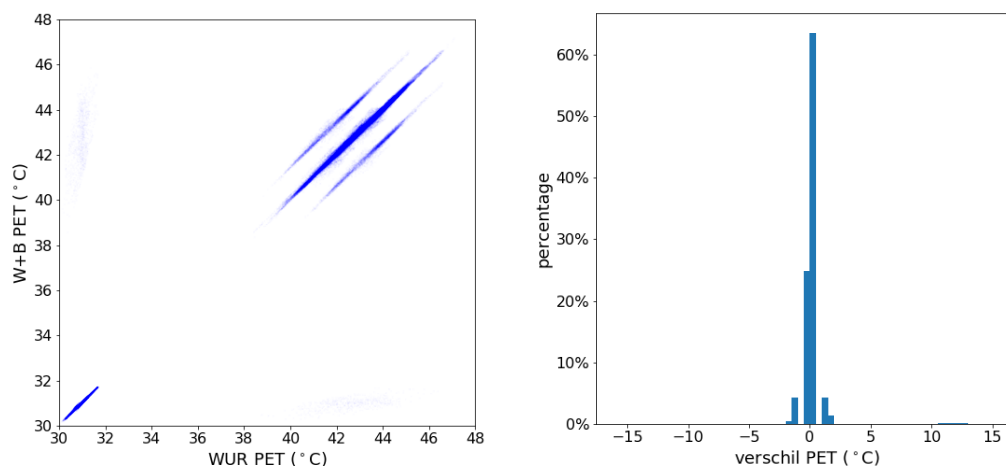
In de eerste stap van het project heeft W+B de hittekaart voor Wageningen zoals ontwikkeld in Koopmans et al. (2019). Hiervoor heeft WUR de gebruikte invoerbestanden aangeleverd. Op deze manier is bestendigd dat de code zoals de door W+B wordt gebruikt voor de landelijke hittekaart voldoet aan het recept. Bij het doorlopen van het recept is er geconstateerd dat er één aanpassing nodig is in het recept om de kaart goed te kunnen reproduceren. Dit gaat om het SVF gebiedsgemiddelde voor het berekenen van de luchttemperatuur in de stad, zie bijlage A2.1. Verder is er een verduidelijking opgenomen hoe de zonshoogte berekend moet worden, zie bijlage A2.3. Figuur 3 toont de vergelijking van de oorspronkelijke kaart voor Wageningen als in Koopmans et al. (2020) en zoals die door W+B is gereproduceerd. Het is evident dat de kaarten in zeer hoge mate overeenkomen, en derhalve hebben we vertrouwen in het voor het verdere traject gebruikte code.

De verschillen die overblijven, zijn weergegeven in Figuur 4. We vinden dat 88% van de 1m PET waarden vallen binnen een $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ afwijking, gebaseerd op het domein in Figuur 3. De verschillen die overblijven, zijn in een minderheid (1%) schaduw en zon gerelateerd. Dit wil zeggen dat in de ene kaart er schaduw is en in de andere kaart zon en vice versa. Op 1 meter resolutie is de consequentie voor die minderheid aan punten dan wel, dat de verschillen in PET $11\text{--}13\text{ }^{\circ}\text{C}$ zijn. In de overige 10% is het verschil $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dit wordt verklaard door een verschuiving in noordwestelijke richting van groene gebieden van $\sim 1\text{--}2$ meter. Deze verschillen komen alleen voor in de zon, vandaar de 2 evenwijdige lijnen in het spreidingsdiagram vanaf $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Deze verschillen kunnen worden verklaard door een verschil in de gebruikte luchtfoto. De originele luchtfoto die is gebruikt in de hittekaart van Koopmans et al. (2019) is niet meer beschikbaar, daarom is een nieuwe luchtfoto

gedownload. Kleine verschillen en verschuivingen tussen de luchtfoto's veroorzaken afwijkingen in de gevoelstemperatuurkaart.



Figuur 3: Berekende PET hittekaart van 1 Juli 2015 12 UTC. W+B links en hittekaart WUR rechts.



Figuur 4: Spreidingsdiagram tussen berekende PET van W+B en WUR (links) voor de Hittekaart voor Wageningen. Histogram van de verschillen tussen de PET van W+B en de WUR (rechts).

3.2 Evaluatie voor Amsterdam (18 Juli 2014)

De Landelijke Hittekaart is opgebouwd uit kaarttegels van 1x1 km, voor de meest efficiënte rekensnelheid. Deze tegels worden vervolgens aan elkaar gezet om tot een totaal kaart te komen. Voor de validatie zijn alleen de tegels meegenomen waar de meet-routes langslopen. Voor Amsterdam zijn dat er 26; voor Rotterdam 35. Voor de Landelijke Hittekaart en de evaluaties van Amsterdam en Rotterdam, is een bomenkaart gemaakt aan de hand van de AHN3 en NDVI (en BGT voor het corrigeren voor hoogspanningsleidingen) in plaats van het boomregister (als in Koopmans et al., 2019).

Voor een goede windbepaling zijn hierdoor enkele aanpassingen nodig die te vinden zijn in bijlage A2.1.

Figuur 5 toont de berekende PET hittekaart voor Amsterdam voor 18 juli 2014, en het verschil tussen model en waarnemingen. We zien dat over het algemeen er een goede overeenkomst is tussen de waarnemingen en de geproduceerde kaart. Bepaalde delen van de routes zijn uitgefilterd in Figuur 5. Bochten zijn weggelaten doordat ze de representativiteit van de meting nadelig beïnvloeden. De wind is namelijk lastig te bepalen als de bakfiets een bocht maakt. Daarnaast zijn tunnels, zoals die onder de A10-west weggelaten, en bruggen weggelaten uit de analyse. Ook locaties zijn uitgefilterd waar gebouwen zijn gesloopt of bijgebouwd in het tijdsbestek tussen de metingen in 2014 en de gebruikte BGT uit het jaar 2019. Zo zijn er bijvoorbeeld diverse gebouwen rondom het traject van de Noord-Zuid lijn aangepast (rondom Rokin), en is het Nationaal Monument niet in de BGT aanwezig terwijl deze wel schaduw geeft.



Figuur 5: Hittekaart voor Amsterdam voor 18 juli 2014 van 11:49-13:34 UTC, en waargenomen verschillen tussen berekende en gemeten PET langs twee fietsroutes door de stad. De grijze vlakken zijn tegels waarvoor geen waarnemingen beschikbaar zijn en daarom voor de reken-efficiëntie buiten de analyse gelaten.

In Figuur 8 zien we dat als we de berekende PET waarden en de waarnemingen naast elkaar leggen er een redelijke correlatie is, maar dat er ook nog wel wat spreiding optreedt. Deze worden enerzijds verklaard door bovengenoemde aspecten, maar deels ook doordat de relevante fysische processen beperkt zijn meegenomen qua complexiteit. De bias bedraagt 3.9 °C en de RMSE (Root Mean Square Error) van deze set bedraagt 5.3 °C. De berekende PET-waarden zijn vaak hoger (boven de 1:1 lijn in Figuur 8) dan de meetwaarden aangeven.



Figuur 6: Verschil in berekende en gemeten luchttemperatuur langs de fietsroute door Amsterdam voor 18 juli 2014 van 11:49-13:34 UTC.

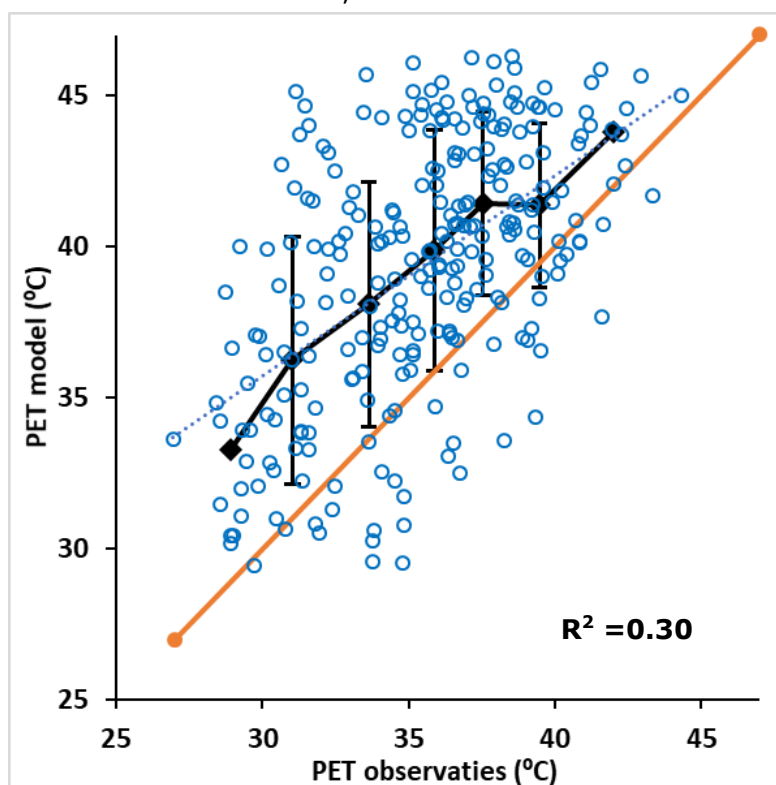


Figuur 7: Verschil in berekende en gemeten windsnelheid langs de fietsroute door Amsterdam voor 6 augustus 2009 van 11:28 UTC – 13:38 UTC.

Deze substantiële bias heeft een aantal oorzaken. De wind wordt in de binnenstad teveel afgeremd. De sterke windreductie wordt voornamelijk bepaald door een hoge frontale oppervlakte behorend bij nauwe straten met hoge gebouwen, wat mogelijk niet goed meegenomen wordt in de gebruikte McDonald windreductie methode (McDonald, 2000), zie Figuur 7 voor de windverschillen. De PET neemt sterk toe bij een onderschatting van de wind bij lage windsnelheden. Dit effect kan voor zonneshijn 1.6 °C bedragen voor gebieden met de sterkste te verwachten windreductie. De gemiddelde onderschatting van de wind is slechts 0.4 m/s en gemiddeld heeft deze onderschatting een geschat effect van ~1 °C voor heel Amsterdam. Mogelijk verklaart met de oostelijke wind voor de geselecteerde dag ook de stroomopwaartse ligging van het IJmeer en Markermeer dat er een hogere windsnelheid is gemeten dan er is gemodelleerd. Temperatuurverschillen tussen het meer en de stad (vergelijkbaar met een zwakke vorm van zeewind) en het feit dat het op het IJmeer door de lagere ruwheid sowieso harder waait, kunnen er voor zorgen dat de wind onderschat wordt in Amsterdam. De geïnterpoleerde windvelden nemen de land-water interacties niet expliciet mee. Daarnaast geeft het water van het IJ en IJmeer

overdag ook directe verkoeling in de luchttemperatuur. De luchttemperatuur is in het model gemiddeld 0.8 °C hoger dan de bakfietsmetingen en resulteert in een 1 °C hogere PET, dus van een gelijke orde dan het effect van de wind, zie Figuur 6 voor de temperatuurverschillen. Ook in de parken is het duidelijk koeler in de observaties. De parktemperaturen zijn ook duidelijk lager ~ 1 °C dan de geïnterpoleerde rurale achtergrondwaarde. Ook is er gemiddeld een overschot aan straling van 49 Wm^{-2} , wat een verhoging van PET van ongeveer 0.6 °C kan verklaren.

Afgezien van de bias is er ook vrij veel spreiding te zien in de hittekaart dat weergegeven is in het spreidingsdiagram in Figuur 8. Dit is grotendeels te verklaren door de sterke ruimtelijke verschillen tussen zon- en schaduwpixels in de hittekaart, wat een verschil van 10+ °C kan opleveren op zeer korte afstand. In de meetwaarden zijn deze extremen veel minder terug te zien, doordat de bakfiets evenwijdig aan de straat meet, en op straten die een overgang van schaduw naar zon hebben kan dit dus leiden tot grote verschillen tussen meting en modelwaarde. In Amsterdam is dit relatief vaak het geval vanwege de vrij smalle straten en grote gebouwendichtheid. Dit wordt uitvoeriger behandeld in de evaluatie van Rotterdam in de volgende sectie (H3.3). Ondanks de wat lage R^2 van en het hoog uitvallen van de modelwaarden, zijn de gemodelleerde PET-waarden in dezelfde range als de metingen, wat betekent dat de fysische onderlegging goed is. De ogenschijnlijk grote spreiding zal dus een groot deel ten gevolge van het ruimtelijk verschil in de meetmethode en kaartdata komen, en niet zozeer door foutieve kaartinformatie.



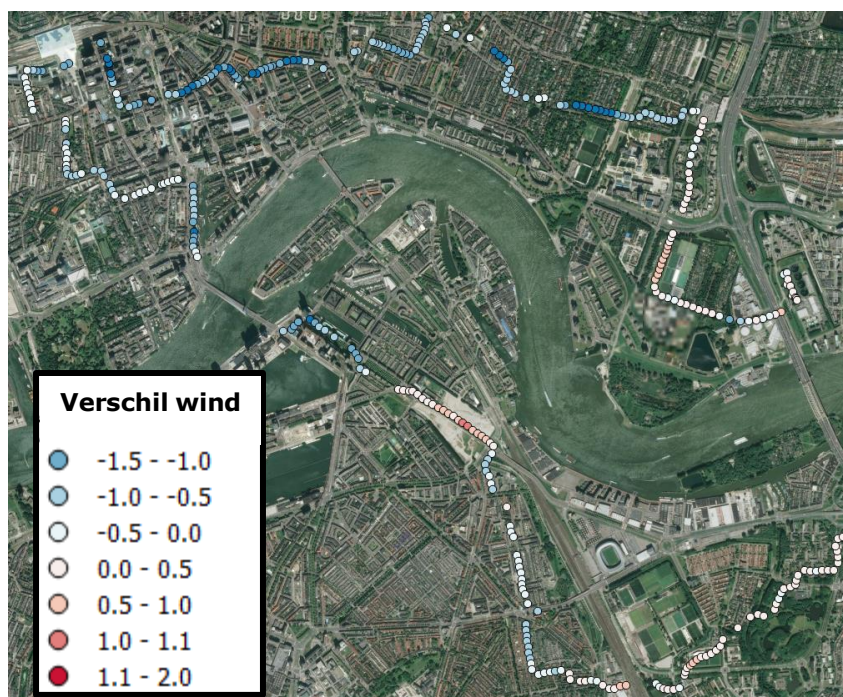
Figuur 8: Spreidingsdiagram van gemeten en berekende PET-waarden voor Amsterdam. In het blauw geselecteerde meetpunten. Oranje is de 1:1 lijn, de zwarte balken zijn de standaarddeviaties van de modelwaarden van het 5, 20, 40, 60, 80 en 95 percentiel. Voor het 5 en 95 percentiel is gekozen de standaarddeviatie niet weer te geven omdat dit percentiel gebaseerd is op minder datapunten.

3.3 Evaluatie voor Rotterdam (14 Augustus 2009)

Figuur 9 toont de ruimtelijke verschillen in PET voor Rotterdam, waarbij GPS-fouten, bochten, bruggen, en punten aangrenzend aan nieuwbouw na de bakfietsmetingen in 2009 zijn uitgesloten. Bochten en bruggen geven een extra onzekerheid in de wind. De waargenomen verschillen in PET op ~50 meterschaal in de rijrichting worden met name veroorzaakt door straling. De windverschillen variëren veel minder op deze schaal. In het bebouwde gebied ten noorden van het water is er een algemene onderschatting van de wind (~ 0.9 m/s). Het open gebied in de buurt van snelweg A16 wordt de wind beter gemodelleerd als ook ten zuiden van De Nieuwe Maas, zie Figuur 10.



Figuur 9: Hittekaart voor Rotterdam voor 6 augustus 2009 van 11:28 UTC – 13:38 UTC, en waargenomen verschillen tussen berekende en gemeten PET langs de fietsroute door de stad. Alleen voor de tegels waarvoor waarnemingen beschikbaar zijn is een hittekaart berekend.

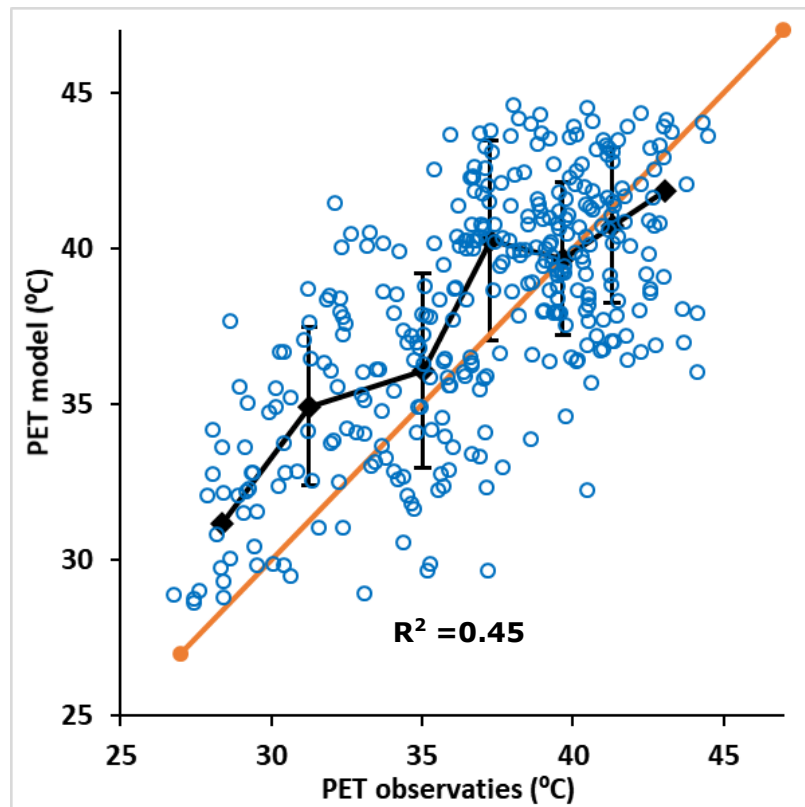


Figuur 10: Verschil in berekende en gemeten windsnelheid langs de fietsroute door Rotterdam voor 6 augustus 2009 van 11:28 UTC – 13:38 UTC.

De evaluatie voor Rotterdam laat spreiding zien en de verklaarde variantie (R^2) 0.45 is lager dan gemeten in Wageningen (Figuur 11). De bias bedraagt 1.1 °C en de RMSE 3.4 °C. Om dit in perspectief te plaatsen, de bias voor Wageningen was iets hoger 1.33 °C en de RMSE lager met 2.63 °C (Koopmans et al., 2020). De bias voor Rotterdam is dus veel lager dan van Amsterdam. De luchttemperatuur wordt beter gemodelleerd en er is geen gemiddelde afwijking in de straling.

Twee belangrijke facetten in de PET berekening zijn straling en wind. Zoals beschreven in het recept (Nijs et al., 2019), is de wind lastig te modelleren. Allereerst is er variatie in de geobserveerde wind. De wind op één punt is niet statisch, en het optreden van kleine windvlagen zorgt voor enige ruis in de gemeten PET waarden. Daarnaast blijft het ook een uitdaging om de wind goed te modelleren op buurtniveau met de McDonald methode (McDonald, 2000). De methode is gevalideerd op een experimentele laboratoriumomgeving met een homogene setting aan gebouwen. De werkelijkheid vertoont meer variatie in gebouwhoogtes, zeker in Rotterdam en Amsterdam, en daarnaast zijn er bomen geïmplementeerd waar de oorspronkelijke methode geen rekening mee hield. De straling wordt beter meegenomen, maar vertoont ook veel spreiding. In Koopmans et al. (2020) is vastgesteld dat stralingsverschillen de belangrijkste bron van afwijkingen tussen gemodelleerde en geobserveerde PET is. Het verschil tussen schaduw en zon geeft op de gevalideerde dagen altijd een groter verschil in PET dan weinig en veel wind. Afwijkingen in straling ontstaan snel doordat overdag de bakfiets vaak in de buurt van de slagschaduw bevindt van een bomenrij, en in het geval van Rotterdam, hoge gebouwen. Ook het gebruik van AHN3, waarbij bomen gegroeid kunnen zijn ten opzichte van 2009, kan tot een extra onzekerheid leiden. Omdat de aanwezigheid van de slagschaduw zo belangrijk is, zijn data met kleine GPS-fouten verwijderd in Figuur 9 (vanaf ~2 meter). Ook in Figuur 12 is een voorbeeld te zien, waaruit

blijkt dat er grote afwijkingen kunnen ontstaan op de slagschaduwgrens. De afwijkingen zijn hier 8-9 °C groot bij de meest linkse brongebieden waar de bakfiets op de slagschaduwgrens ligt, waarbij geel de modelwaarden zijn en lichtblauw de observaties. De afwijking van brongebied 3 is al kleiner 4 °C door de extra straling komend van de opening van de zijstraat. De rode brongebieden zijn verwijderd uit de analyse omdat de GPS punten teveel afwijken en op de andere kant van de weg bevinden. Brongebied 6 ligt duidelijker in de gemodelleerde schaduw en heeft de kleinste afwijking met de geobserveerde waarde.



Figuur 11: Spreidingsdiagram van gemeten en berekende PET-waarden voor Rotterdam. In het blauw geselecteerde meetpunten. Oranje is de 1:1 lijn, de zwarte balken zijn de standaarddeviaties van de modelwaarden van het 5, 20, 40, 60, 80 en 95 percentiel. Voor het 5 en 95 percentiel is gekozen de standaarddeviatie niet weer te geven omdat dit percentiel gebaseerd is op minder datapunten.



Figuur 12: Voorbeeld waarop de fietsroute op de grens van de slagschaduw bevindt. De gele getallen geven de gemiddelde modelwaarde aan van het brongebied en de blauwe getallen de gemiddelde observatie. De zwarte brongebieden zijn gebruikt voor de evaluatie; de rode brongebieden zijn uitgesloten doordat de gps punten teveel afwijken. De kleur van de centrale punten geeft het verschil in PET weer. De witte getallen geven de verschillende brongebieden aan.

Het is uitdagend en arbitrair alle punten te verwijderen die op de slagschaduwgrens liggen (dus ook datapunten met correcte GPS-locatie) en daarom wordt deze extra data-filtering niet in de rapportage opgenomen. Daarbij is het ook belangrijk dat er genoeg datapunten overblijven verdeeld over verschillende wijktypen, en het verwijderen van alle mogelijke slagschaduwpunten zou een sterke reductie in de data teweegbrengen. Het wegfilteren van datapunten in de buurt van hoge gebouwen (>50 meter) leidt niet tot een verbetering van de resultaten. Waarschijnlijk valt de extra onzekerheid van de wind door hogere gebouwen mee, en zijn stralingsverschillen belangrijker in de validatie.

3.4 Validatie bijzondere overgangsgebieden

Naast de validatie tegen waarnemingen in Rotterdam en Amsterdam is er een extra controle gedaan van de Landelijke Hittekaart voor gebieden waar mogelijk problemen zouden kunnen ontstaan door landschapsovergangen. Voorbeelden hiervan zijn land-water overgangen; hoogteverschillen; of overgangen van bebost gebied naar weiland. Hoewel deze gebieden vaak niet sterk van invloed op de menselijke hittestress zijn, gezien het vaak natuurgebieden betreft, is het belangrijk dat de Landelijke Hittekaart ook voor deze situaties een robuust resultaat levert.

Voor dit doeleinde zijn door W+B enkele kaartuitsneden geleverd rond dit soort gebieden:

- het Limburgse heuvellandschap delen van Noord-Brabant waaronder de Kempen
- Zeeland / Middelburg / Vlissingen
- Utrechtse Heuvelrug

- Den Haag / Scheveningen
- de Randmeren

Tijdens de inspectie van de Landelijke Hittekaart voor het Limburgs heuvellandschap kwam aan het licht dat de windreductie als gevolg van bospartijen niet helemaal goed geïmplementeerd was, en dat een aanpassing aan het originele recept nodig was voor de opschaling naar landelijk niveau. De details van deze aanpassing zijn te vinden in bijlage A2.2. Deze aanpassingen zijn toegepast in de opgeleverde Landelijke Hittekaart.

Na correctie van het probleem met de windreductie was de Landelijke Hittekaart in al deze bijzondere gebieden correct en fysisch verantwoord. Ons oordeel is dan ook dat de Hittekaart een robuust resultaat levert voor dergelijke bijzondere landschapsovergangen. Met terugwerkende kracht zijn de steden Rotterdam en Amsterdam geverifieerd met deze correctie in de methode.

4. Conclusie

Deze studie rapporteert de evaluatie van de landelijke PET hittekaart zoals deze door W+B is opgeleverd aan de Klimateffectatlas. In deze studie zijn 2 stappen doorlopen. Ten eerste is de door W+B gereproduceerde hittekaart voor Wageningen uit Koopmans et al. (2019) geverifieerd. Daarna zijn uitkomsten van het algoritme voor de landelijke hittekaart gevalideerd tegen traject-waarnemingen van de PET voor hete dagen in Amsterdam en Rotterdam.

Bevindingen

- W+B is erin geslaagd om in het proces om tot een algoritme voor de landelijke hittekaart te komen het recept succesvol toe te passen voor de stad Wageningen met dezelfde input data als de originele kaart in Koopmans et al. (2019). Haar product komt nauwkeurig overeen met de originele kaart.
- Door gebruik van een ander bomenbestand dan in het originele recept van Koopmans et al. (2019) is het algoritme in overleg aangepast zodat ook met de nieuwe invoer de hittekaart voor Wageningen succesvol is gereproduceerd.

Het algoritme voor de landelijke hittekaart is geëvalueerd tegen trajectwaarnemingen van de PET in Rotterdam en Amsterdam. Gemiddeld genomen levert de hittekaart een goede overeenkomst met de waarnemingen, met name voor Rotterdam. Echter, op specifieke punten kunnen verschillen worden aangewezen. Zo worden in de huidige kaart de fysische processen op een beperkte complexiteit meegenomen, en kunnen er verschillen optreden tussen het tijdsverschil van gebruikte BGT (2019) en het gebouwbestand tijdens de metingen, respectievelijk 2009 voor Rotterdam en 2014 voor Amsterdam. Ondanks de spreiding zijn wij zeer tevreden over de landelijke PET hittekaart en vinden hem zeer geschikt voor haar doel: identificatie van extreem warmte plekken in steden en de advisering rondom hittestress.

- Expert judgement over de landelijk hittekaart voor kritische aspecten (overgangen land/water, overgangen bos/gras, heuvelgebieden, etc) heeft uitgewezen dat de kaart

een natuurgetrouw beeld weergeeft van de hittepatronen op de onderzochte warme dag.

5. Aanbevelingen

Uit de huidige studie komen een aantal aanbevelingen naar voren voor verder onderzoek. Opgemerkt moet worden dat de huidige kaart is geproduceerd met bestaande kennis en met een sterke nadruk op de bebouwde omgeving. Wij bevelen het volgende aan:

- De representatie van wind rondom hoge gebouwen kan nog niet goed meegenomen worden. Het huidige recept gaat uit van niet te diepe street canyons om de windremming in de straten uit te rekenen. Voor hoge gebouwen zoals op de Zuidas in Amsterdam en rondom het stationsgebied van Rotterdam speelt ook windvlagerigheid een rol, en zogenaamde downwash: wind die langs de gebouwoppervlak naar beneden stroomt en de straten daarmee ventileert. Dit wordt nu wel meegenomen in de metingen maar niet in het algoritme. Meer fundamentele kennis rondom deze windvlagerigheid en de invloed op de PET in steden is nodig voor deze gebieden. Large-Eddy simulatie zou hierbij kunnen helpen.
- De discrete windrichtingen (Noord, West, Zuid, Oost) in het hittekaartrecept blijken voor discrete overgangen in de Hittekaart te zorgen (zie Bijlage A2.4). Dergelijke overgangen zijn niet wenselijk en niet fysisch, maar gevolgen van de rekenmethode: als de geïnterpoleerde meteo-data van het ene windregime naar het andere verschuift, verspringt daardoor dus ook de hele kaart, en dit kan grote afwijkingen in de PET tot gevolg hebben. We bevelen het gebruik van een standaard windrichting aan: hier hebben we voor Oost gekozen, gezien hittedagen vaak gepaard gaan met oostenwind.
- De representatie van waterpartijen is in het recept op een zeer simpele wijze geïmplementeerd. Het transport van relatief koele lucht vanaf waterpartijen de stad in is in het recept niet meegenomen, zie ook validatie Amsterdam (H3.2). Een combinatie van waarnemingen van de watertemperatuur en een brongebied aan water analoog als die voor sky-view factor (SVF) en wind reductie kan hierbij een praktische toevoeging opleveren. Daarnaast ontbreekt ook een berekening van het effect van fontein die lokaal veel koeling kunnen genereren. Dit is bijvoorbeeld goed geïllustreerd rondom het Hofplein in Rotterdam waar de hittekaart een relatief warm gebied weergeeft.
- Schaduwwerking en windremming door bomen is een essentieel aspect van het hittekaartrecept. Een belangrijk aspect dat ontbreekt in het algoritme is het langdurige effect van droogte. Droogte zal vegetatie minder actief maken, zal eerder bladval opleveren, en daarmee de hittestress beïnvloeden. Voor het doorrekenen van scenario's op basis van klimaatscenario's is het aan te bevelen deze aspecten mee te nemen, en hiervoor kennis te ontwikkelen.

Bijlage A: Verificatienotitie Wageningen PET kaart

Deze notitie betreft de verificatie Door Wageningen University van de methodiek voor het opstellen van de Nationale Hittekaart door Witteveen+Bos. Hiervoor wordt de Hittekaart voor Wageningen gereproduceerd, volgens de methode die in het hittekaartrecept beschreven staat. Eerst wordt de methode zoals beschreven in het hittekaartrecept volledig overgenomen, inclusief gebruikte bronbestanden, ter verificatie van de programmeercode en of het recept goed gevolgd kan worden. Deze bronbestanden zijn geleverd door Sytse Koopmans (WU) aan W+B. Daarna volgt de verificatie van de hittekaart op basis van bronbestanden opgehaald door W+B, die op een aantal punten afwijken. Tijdens het opstellen van de Landelijke Hittekaart is op een aantal plaatsen noodzakelijkerwijs van het recept afgeweken, deze worden beschreven onder de kop **Aanpassingen recept**.

De resultaten van de verificatie: de vergelijking van de Hittekaart van Wageningen volgens W+B en het origineel uit het recept, volgt onder **Verificatie-resultaten**.

A1: Input bronbestanden

Voor de landelijke Hittekaart zijn een aantal andere bronnen gebruikt dan voor de kaart in het recept van Koopmans et al. (2019). Hier is voor gekozen om te zorgen dat de brondata zo actueel en consequent mogelijk is voor heel Nederland.

Voor landgebruik heeft de Hittekaart enkel gebruik gemaakt van het BGT. In het recept wordt voor water en gebouwen data van OpenStreetMap gebruikt. Daarnaast maakt de hittekaart gebruik van AHN3 (recept meldt AHN2).

Het gebruik van de AHN3 voor de boom- en gebouwhoogtes zorgt voor meer ruwheid dan bij het gebruik van gemiddelde boom- en bouwhoogtes. De ruwheid van een oppervlak heeft invloed op de windreductiefactor.

De data.knmi site heeft een versie 3 van de SVF kaart, die als input voor de hittekaart is gebruikt. Uitzondering is een stukje Zeeland wat in deze dataset mist. Hiervoor is de versie 2 van de SVF kaart gebruikt.

Met betrekking tot de meteorologische data van het KNMI meldt het recept niet hoe te interpoleren. De hittekaart maakt gebruik van kriging interpolatie op basis van uurlijkse waarnemingen van de 20 dichtstbijzijnde meetstations.

Het bomenbestand dat wordt vermeld in het recept van Koopmans et al. (2019) is geen open data. Witteveen+Bos heeft zelf een bomenbestand gegenereerd op basis van het AHN3, PDOK, BGT, en luchtfoto's. Het bomenbestand die als input is gebruikt betreft een rasterbestand op 1m resolutie waarbij een pixel een label boom/geen boom en een hoogte heeft (op basis van AHN3). Het bomenbestand die het recept vermeldt bestaat uit 'boom' polygonen die tevens een hoogte heeft. Ten gevolge van dit verschil leverde het gebruikte bomenbestand veel meer windreductie op en is de berekening voor windreductie aangepast. Dit noodzaakte tot een aanpassing aan het recept, die verderop beschreven wordt.

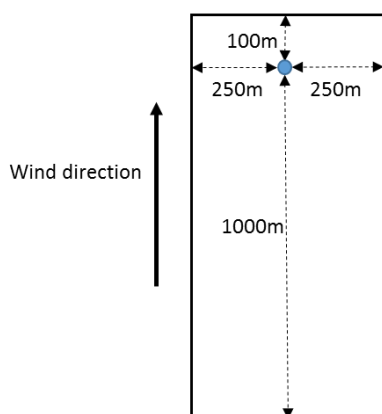
A2: Aanpassingen aan recept

Tijdens de productie van de hittekaart kwamen er een aantal problemen aan het licht met de methode van het originele recept, die niet altijd te vertalen waren naar een goede implementatie op een landelijk niveau. Deze betreffen het middelen van de SVF; de bepaling van windreductie als gevolg van bomen; het bepalen van de zonnehoek; en het omgaan met overgangen in windrichting in de geïnterpoleerde meteorologische invoerdata. Hieronder belichten we deze aanpassingen, die doorgevoerd zijn in de uiteindelijke Landelijke Hittekaart.

A2.1: Aanpassing bepaling gebiedsgemiddelde SVF

In het proces van het reproduceren van de Wageningse kaart kwam aan het licht dat er één stap moet worden toegevoegd in het bepalen van het gebiedsgemiddelde factor SVF. Deze SVF wordt gebruikt om het UHI uit te rekenen op verschillende momenten van de dag, zie vergelijking 1. Aan het eind van de paragraaf is deze stap (stap 3) schematisch toegevoegd tussen de bestaande stappen in het recept.

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



Figuur A1 Brongebied waaruit de gemiddelde sky-view factor (SVF) berekend wordt

Bij de reproductie van de Wageningse hittekaart bleek de gebiedsgemiddelde SVF te hoog te zijn aan de rand van de stad waar de wind vandaan komt. Het probleem was dat het recept niet expliciet beschrijft dat de toekenning van SVF voor op 25 meter resolutie dient te gebeuren. Ten gevolge werd duidelijk dat dit verschil in resolutie, duidelijke verschillen teweeg zou brengen voor bepaalde gebieden op de kaart. Deze toekenning is beslissend in het geval er weinig valide data is (resterende oppervlakte SVF). Zoals in het recept beschreven staat wordt veel data gefilterd zoals groen (waaronder bomen en akkers), gebouwen en water. In het oosten van Wageningen waar de wind vandaan komt heeft veel vegetatie in het brongebied (zie Figuur A1 voor afmetingen) en is daardoor gevoelig voor de toekenningregels van SVF bij weinig data.

Als oplossing wordt de SVF ge-regrid van 1 meter resolutie naar 25-meter resolutie, zoals ook is toegepast voor de hittekaart in het recept. Hierbij wordt er een gemiddelde 25-meter grid SVF berekend indien er meer dan 10% resterende oppervlakte is op 1 meter

resolutie. Als er minder dan 10% resterende oppervlakte is dan wordt er geen waarde toegekend.

Het resultaat is dat er op 25 meter resolutie een groter percentage gridcellen een waarde hebben. Hierdoor wordt volgens de toekenningregels in de stap erna, minder vaak een hoge waarde van SVF toegekend. (SVF =1 in het geval van minder dan 10% resterende oppervlakte en een gelineariseerde waarde tussen 1 het gemiddelde van de niet-uitgefilterde punten tussen de 10 en 20%). Dit leidt tot een accuratere SVF aan de randen van de stad.

De stap erna waar volgens recept (erratum) voor het brongebied een gemiddelde SVF berekend wordt, waarbij er een aanpassing gedaan wordt als het resterende oppervlakte kleiner dan 20% data-beschikbaar is. (onder de 10% wordt de SVF 1 en tussen de 10 % en 20% wordt de SVF gelineariseerd tussen 1 en het gemiddelde van de niet-uitgefilterde punten). Deze aanpassing komt minder vaak voor bij het uitvoeren op het 25-meter grid, wat tot een accuratere SVF leidt aan de randen van de stad. Als laatste stap vervolgens wordt het 25-meter grid geïnterpoleerd naar een 1-meter grid. Het kader hieronder geeft de stappen van dit algoritme zoals beschreven stapsgewijs neer.

Algoritme ter berekening van de gebiedsgemiddelde SVF voor de UHI vergelijking

Stap 1) (zoals beschreven in het recept):

brondata; SVF op 1mx1m resolutie (KNMI)

Stap 2) (zoals beschreven in recept)

toepassen mask "no data"/filter (op 1x1m resolutie):

- water
- bomen
- buildings
- ndvi > 0.16
- akkers

Stap 3)

25x25 m gridcellen met gemiddelde svf berekenen, waarbij geldt:

- meer dan 90% geen data > 25m gridcel wordt op "geen data" gezet
- anders: gemiddelde van de goede datapunten

Stap 4) (zoals beschreven in het recept)

- toepassen UHI box/gebiedsgemiddelde (wind afhankelijk)
- middelen volgens 0-10-20% resterende oppervlakte
- dus indien in box (500x1100)

- meer dan 90% (25x25 m gridcellen) no data -> SVF wordt op 1 gezet
- 80-90% (25x25 m gridcellen) no data > SVF interpolatie tussen 1 en gemiddelde van goede datapunten
- <80% (25x25 m gridcellen) > gemiddelde van goede datapunten (25x25)

Stap 5)

interpoleren naar 1x1m

A2.2: Aanpassingen voor windbepaling van bomen

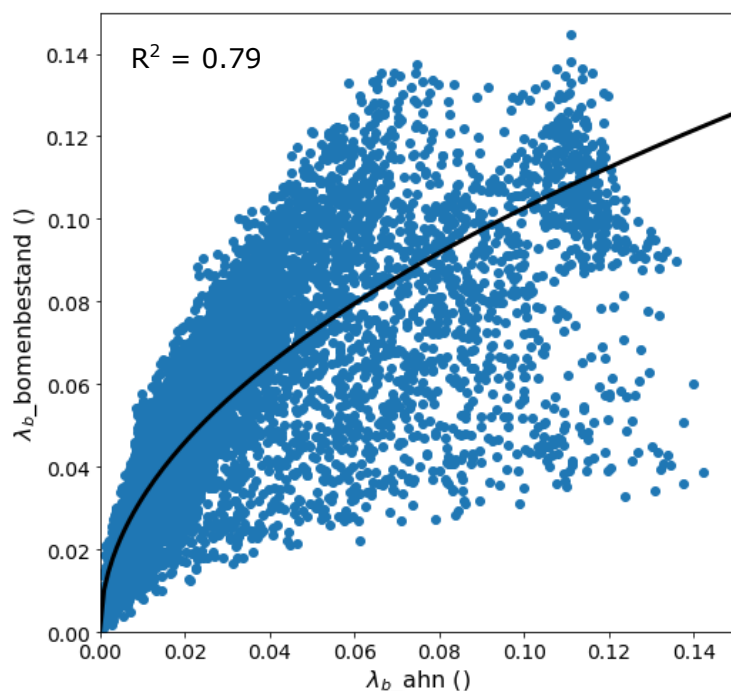
Voor de windsnelheidsberekening is de frontale oppervlakedichtheid in de windrichting van gebouwen en bomen belangrijk. Deze wordt oorspronkelijk bepaald uit de hoogte en afmetingen (bovenaanzicht) van gebouwen en bomen en bepalen tezamen in welke mate de wind wordt afgeremd. In het recept is hiervoor het bomenbestand (boomregister) voor Wageningen gebruikt. Details over de bepaling van de omvang en boomhoogte van het bomenbestand is te vinden in Meijer et al. (2015). Om praktische redenen is de frontale oppervlakedichtheid niet afgeleid uit het bomenbestand, maar direct geproduceerd uit de AHN3 (hoogte) in combinatie met de NDVI om bomen te detecteren. Ook het bomenbestand is uit deze bronnen geproduceerd. Er zijn echter 2 verschillen i.v.m. de methode van Koopmans et al. (2019). Het bomenbestand bestaat uit shapefiles van afzonderlijke bomen met één toegekende maximale boomhoogte. Voor het bepalen van de frontale oppervlakedichtheid wordt dit in het recept omgezet naar een raster, maar verschillende rastercellen van één boomkroon hebben nog steeds één hoogte.

In de geproduceerde bomenkaart voor de landelijke hittekaart is er geen shapefile gecreëerd. De verschillende boomrastercellen uit de AHN hebben een unieke hoogte. Hierdoor ontstaan twee verschillen.

1. De maximale hoogte van een boomkroon is lager, door het gebruik van een resolutie van 1 meter in plaats van de bronresolutie van 0.5 meter.
2. Doordat er binnen een boomkroon meer unieke hoogtes toegekend zijn per rastercel, neemt het frontale oppervlakte voor een bomengebied sneller toe. Waar voor het bomenbestand de frontale oppervlakte aan de randen van boomkronen wordt bepaald, wordt deze nu ook op 1m resolutie binnen een boom bepaald.

Het tweede punt is van grotere invloed voor de hittekaart dan punt 1. Voor boomgebieden die een omvang hebben dat een groot gedeelte van brongebied beslaan, zorgt dit verschil voor een te grote windafname aan de lijzijde resulterend in een te hoge PET-waarde. Wanneer de wind sterk gereduceerd wordt neemt de PET sterk toe, door het logaritmische verband in de windrichting in de PET vergelijking. De hoogteverschillen binnen een boom leidend tot een grotere frontale oppervlakte wordt voor een gedeelte ondervangen door een 2 keer grotere stapgrootte van 4 meter specifiek voor bomen te gebruiken (niet voor gebouwen). De hoogte van een boom rastercel wordt dan vergeleken met de hoogte van een cel die 2 keer verder weg ligt. Dit is echter niet afdoende en daarom is er een statistisch verband bepaald tussen de frontale oppervlaktesom van bomen bepaald met het recept gebaseerd op het bomenbestand en de methode gebruikt voor de landelijke hittekaart. In Figuur A2 is het verband te zien tussen de direct geproduceerde AHN met

de 2 keer grotere stapgrootte en het bomenbestand, waarbij ook de vergelijking en correlatiecoëfficiënt R^2 is weergegeven.



Figuur A2 Relatie tussen frontale oppervlakedichtheid bomen λ_b van direct geproduceerd uit AHN en bomenbestand.

A2.3: Zonshoogte

De zonshoogte hebben is bepaald aan de hand van de uurhoek u en declinatie d . Het staat niet expliciet in recept vermeld hoe de zonshoogte bepaald moet worden. Afhankelijk van locatie en gewenste precisie kan het bepalen van de zonshoogte meer of minder complex worden.

Gebruikte formules op basis van online bron

(<http://wiki.bk.tudelft.nl/bk-wiki/Zonnestralingsrichting>):

$$d = 23.44^\circ \sin(360^\circ (284 + dag_in_jaar)/365)$$

$$u = 15^\circ (utc_uur_in_dag + 0.3)$$

$$zonshoogte = \arcsin(\sin(breedtegraad) \sin(d) - \cos(breedtegraad) \cos(d) \cos(u))$$

A2.4: Keuze vastzetten windrichting

Overgangen in windrichting-regimes tussen kaarttegels gaf onnatuurlijke overgangen. Het recept kent discrete overgangen in de windrichting (Noord, Oost, Zuid, West), wat bij draaiende wind tot discrete overgangen in de Landelijke Hittekaart leidt. Dit is niet wenselijk, noch fysisch juist. Dit bleek niet makkelijk om elegant op te lossen, vandaar dat de beslissing is genomen om de windrichting voor de Landelijke Hittekaart vast te zetten op oostelijk. Dit is een goede aanname voor hete dagen, die in Nederland vaak gepaard gaan met oostenwind, en dus is de kaart geschikt voor haar beoogde doel. De strategie om de windrichting vast te zetten is meegenomen in de aanbevelingen voor de Hittekaart (H.5).

6. Bibliografie

Goede, 2020: *Landelijke hittekaart gevoelstemperatuur-Technische toelichting*. Beschikbaar online:

https://www.klimaat-effectatlas.nl/l/nl/library/download/urn:uuid:4d449ff6-2957-409e-b65d-f48500b157ea/technische+toelichting+landelijke+hittekaart+gevoelstemperatuur+1.pdf?format=save_to_disk&ext=.pdf

Heusinkveld, B.G., G.J. Steeneveld, L.W.A. Van Hove, C.M.J. Jacobs, and A.A.M. Holtslag, 2014: Spatial Variability of the Rotterdam Urban Heat Island as Influenced by Urban Land Use. *J. Geophys. Res. Atmospheres* (119): 677–92.
<https://doi.org/10.1002/2012JD019399>.

Koopmans, S., B.G. Heusinkveld, G.J. Steeneveld. 2019. Hoofdstuk 3: Recept ontwikkeling standaard hittestresskaart. In: *RIVM Briefrapport 2019-0008, Ontwikkeling Standaard Stresstest hitte, De Nijs, A.C.M et al.*, online beschikbaar via:
<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2019-0008.pdf>.

Koopmans, S., B.G. Heusinkveld, G.J. Steeneveld, 2020: A standardized Physical Equivalent Temperature urban heat map at 1-m spatial resolution to facilitate climate stress tests in the Netherlands, *Building Environ.*, in press.
https://www.researchgate.net/publication/341446534_A_standardized_Physical_Equivalent_Temperature_urban_heat_map_at_1-m_spatial_resolution_to_facilitate_climate_stress_tests_in_the_Netherlands

Matzarakis, A., F. Rutz, H. Mayer, 2010: Modelling Radiation fluxes in simple and complex environments – Basics of the RayMan model. 2050. *Int. J. Biometeorology*, **54**, 131-139.

McDonald R.W., 2000: Modelling the mean velocity profile in the urban canopy layer. *Boundary-Layer Meteorology*, **9**, 25–45.

Meijer, M, Rip, F., Benthem, R. van, Clement, J and C van der Sande, 2015: *Boomkronen afleiden uit Actueel Hoogtebestand Nederland; kwaliteitsaspecten rondom het geautomatiseerd in kaart brengen van bomen op basis van het AHN2-bestand*. Wageningen: Alterra Wageningen UR. Alterra-rapport 2671. Beschikbaar online via <http://edepot.wur.nl/362099>

Nijs et al. 2019: *Ontwikkeling standaard stresstest hitte, (Hoofdstuk 3, Koopmans, S, B.G. Heusinkveld, G.J. Steeneveld. 2019. Recept ontwikkeling standaard hittestresskaart)*. RIVM Briefrapport 2019-0008, RIVM Bilthoven, Nederland. Beschikbaar online: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2019-0008.pdf>