



1 Hoe werkt het lokale klimaat in Nederlandse steden en hoe beïnvloedt stedelijke inrichting het lokale klimaat?

Samenvatting

Klimaatverandering leidt tot meer zomerse en tropische dagen en meer dagen met extreme neerslag in de zomer. De gemiddelde hoeveelheid neerslag in een stedelijke gebied verschilt niet van die in het omringende buitengebied. Dit geldt echter niet voor de temperatuur. In de stad is het bijna altijd warmer dan in het omringende buitengebied, wat het 'stedelijk hitte-eiland effect' (Urban Heat Island of UHI) wordt genoemd. De uitkomsten van het Climate Proof Cities (CPC) programma bieden meer inzicht in de werking van dit hitte-eiland effect.

Het stedelijk hitte-eiland effect wordt veroorzaakt door absorptie van zonnestraling door (stenige) materialen, het gebrek aan verdamping en de uitstoot van warmte ten gevolge van menselijke activiteiten ('antropogene warmte'). De uitstoot van warmte door industrie, huishoudens, gebouwen, verkeer, mensen en dieren levert een niet te verwaarlozen bijdrage levert aan het ontstaan van het UHI: in Rotterdam ca. 10%. Overdag zijn de temperatuurverschillen tussen stad en platteland gering ($< 2^{\circ}\text{C}$). De verschillen zijn vooral na zonsondergang groot doordat het in de stad langzamer afkoelt dan in het omringende buitengebied. De maximum UHI intensiteiten van Nederlandse steden lopen uiteen van 3 tot meer dan 7°C . Hittestress kan dan ook een belangrijk 'issue' worden indien de mondiale opwarming in de komende decennia doorzet.

Binnen een stedelijk gebied bestaat er een grote ruimtelijke variatie in het UHI. Eigenschappen van de directe omgeving blijken hierop van grote invloed. De meest bepalende factoren zijn de fractie bebouwd oppervlak, verhard oppervlak en de fractie groenoppervlak. Daarnaast heeft de gemiddelde gebouwhoogte een duidelijke invloed. Ook de verhouding tussen gebouwhoogte en straatbreedte beïnvloedt de absorptie van zonnestraling, thermische uitstraling van gebouwen en andere oppervlakken naar de atmosfeer, en het transport van warmte binnen de straat. De optimale verhouding tussen hoogte en breedte lijkt rond de 1 te liggen. Hogere of lager ratio's hebben beide voor en nadelen wat betreft ventilatie en schaduwwerking.

Het uiteindelijke effect van open water op de temperatuur is niet eenduidig en hangt sterk af van de dimensionering (oppervlakte, diepte), de ligging ten opzichte van de windrichting en de ligging ten opzichte van gebouwen en andere structuren in de omgeving.

Het thermisch comfort van de mens varieert nog meer dan de omgevingstemperatuur en is ook afhankelijk van straling, luchtvochtigheid en windsnelheid. Overdag wordt het thermisch comfort in de stad vooral bepaald door de verschillen in windsnelheid; de verschillen in luchtvochtigheid en straling zijn te gering om een merkbaar effect te hebben. Na zonsondergang speelt de temperatuur een meer prominente rol en wordt het thermisch comfort voor een belangrijk deel bepaald door factoren die een invloed hebben op de luchttemperatuur.

Verder zullen door de verandering van het klimaat in de toekomst vaker langdurige, warme en droge periodes overbrugd moeten worden. Kennis over de waterbalans van de stad is essentieel om stedelijk gebied zó in te richten dat koeling door verdamping gewaarborgd blijft met een zo klein mogelijk waterverbruik. Verdamping is echter een grote onbekende. Binnen CPC zijn eerste schattingen gedaan van de verdamping in Rotterdam en Arnhem.



1.1 Inleiding

Aansluitend bij de stap 'Weten' van de 'Handreiking Ruimtelijke Adaptatie'⁵ is kennis over de werking van het stedelijk klimaat en de interactie van de stad met het regionale klimaat van belang. De gemiddelde hoeveelheid neerslag in een stedelijke gebied verschilt niet van die in de omringende buitengebied⁶. Dit geldt echter niet voor de temperatuur. In de stad is het bijna altijd warmer dan in het omringende buitengebied, wat het 'Urban Heat Island' (UHI) wordt genoemd (zie het tekstkader 'Het stedelijk hitte-eilandeffect'). Dit betekent dat voor steden de kans op extreem hoge temperaturen groter is dan voor de rest van Nederland. Dit hoofdstuk gaat daarom vooral in op de gevolgen van klimaatverandering op hitte en droogte in de stad. Kennis over de wijze waarop steden zelf het stadsklimaat beïnvloeden, levert inzichten voor de keuze van maatregelen tegen extreme hitte.

Het stedelijk klimaat en klimaatverandering

In de internationale literatuur is het UHI effect al een eeuw bekend. Maximum temperatuurverschillen tussen stad en buitengebied die zijn gemeten en berekend in internationale studies (Memon et al., 2009) laten waarden tot 12 °C zien, waarbij de grootste verschillen zich meestal tijdens de nacht voordoen. Voor Nederland was Conrads (1975) de eerste die in de jaren '70 het stadseffect voor een Nederlandse stad onderzocht. Uit temperatuurmetingen uitgevoerd in Utrecht tijdens de zomer bleek de temperatuur 's nachts in Utrecht gemiddeld 2,7 °C hoger te zijn dan buiten de stad, met uitschieters tot 8 °C. Het stadseffect van Rotterdam werd een tiental jaren later onderzocht door Roodenburg (1983). Daarbij werden ook maximum temperatuurverschillen tussen stad en buitengebied gevonden van 8 °C, voornamelijk tijdens windstille nachten met weinig bewolking.

Het onderzoek naar het stadsklimaat in Nederlandse steden heeft hierna bijna 30 jaar stil gelegen. De draad is uiteindelijk weer opgepakt in 2009. In de zomer van dat jaar zijn oriënterende metingen in Rotterdam⁷ en Arnhem⁸ uitgevoerd met mobiele meetplatforms (meteorologische meetinstrumenten gemonteerd op een bakfiets). Ook de resultaten van deze metingen laten een aanzienlijk hitte-eiland effect zien. Na zonsondergang kunnen de temperatuurverschillen tussen dichtbebouwde gebieden en het buitengebied snel oplopen tot meer dan 7 °C, voornamelijk op heldere en windstille zomerse dagen. Overdag zijn de gemeten temperatuurverschillen geringer, met maxima tot 2 °C (Van Hove et al., 2010; Van Hove et al., 2011c; Heusinkveld et al., 2010, 2014). Sindsdien zijn deze gegevens bevestigd door de uitkomsten van het vast monitoring netwerk van CPC in de regio Rotterdam (Van Hove et al., 2011a,b). Een gedetailleerde uitwerking van de meetgegevens volgt onder paragraaf 1.5.

Voor het verkrijgen van een landelijk beeld zijn oppervlaktetemperaturen van satellietbeelden uit de hittegolfperiode in 2006 geanalyseerd (Klok et al., 2012). Uit deze beelden blijkt dat elke stad in Nederland, groot of klein, te maken heeft met een hitte-eiland effect (**Figuur 1.3**). Opgemerkt dient te worden dat het hier het *oppervlakte*-UHI betreft dat vooral overdag aanwezig is. In discussies over het stadsklimaat gaat het bijna altijd over het *atmosferische* UHI van de 'Urban Canopy Layer' vanwege het effect op het leefklimaat (zie ook het tekstkader 'Stedelijk hitte-eiland effect'). Het atmosferische UHI is het verschil in *lucht*temperatuur tussen de stad en het nabijgelegen platteland. In tegenstelling tot de oppervlakte-UHI is het atmosferische UHI overdag gering; een maximum intensiteit (UHI_{max}) wordt bereikt na zonsondergang doordat de stad langzamer afkoelt dan het nabijgelegen platteland.

⁵ <http://www.ruimtelijkeadaptatie.nl/>

⁶ Opvallend is dat in de buurt van grote stedelijke agglomeraties zoals de Rotterdam agglomeratie, meer neerslag valt dan gemiddeld (zie De Bosatlas voor het Klimaat; www.klimaatatlas.nl). Mogelijke oorzaken zijn: stuwning van de wind door de bebouwing, de extra opwarming en de aanwezigheid van meer condensatiekernen (fijne deeltjes waar waterdruppeltjes zich op afzetten). Deze factoren zijn bevorderlijk voor wolkenvorming en het ontstaan van neerslag aan de zijde van steden.

⁷ Dit onderzoek vond plaats in het kader van de eerste tranche van KvK (Hittestress in Rotterdam project)

⁸ In het kader van het EU Future Cities project



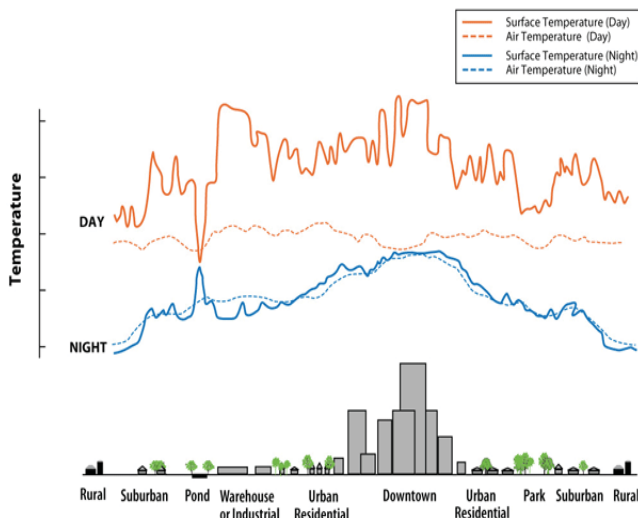
Het stedelijk hitte-eilandeffect (UHI)

Steden zijn over het algemeen warmer dan het buitengebied. Door de dichte bebouwing en de eigenschappen van het stedelijk materiaal wordt warmte beter vastgehouden in steden en treedt het zogenaamde hitte-eilandeffect op (**Figuur 1.1**). Men kan 3 typen van het stedelijk hitte-eilandeffect (Urban Heat Island (UHI)) onderscheiden:

- Het oppervlakte UHI, het verschil in oppervlaktetemperatuur tussen stad en omringende platteland).
- Het atmosferische UHI, het verschil in luchttemperatuur tussen stad en omringende platteland. Het atmosferische UHI kan worden onderverdeeld in:
 - UHI van de atmosferisch grenslaag boven de stad ('Urban Boundary Layer UHI') waarvan de intensiteit afhangt van de geografische ligging van de stad, algemene configuratie en morfologie .
 - UHI op leefniveau ('Urban Canopy Layer UHI'), waar de aanwezigheid van gebouwen, straatoppervlak, bomen en water een direct, merkbaar effect heeft op het klimaat op leefniveau (microklimaat). In discussies over het stadsklimaat gaat het vooral om dit hitte-eiland effect.

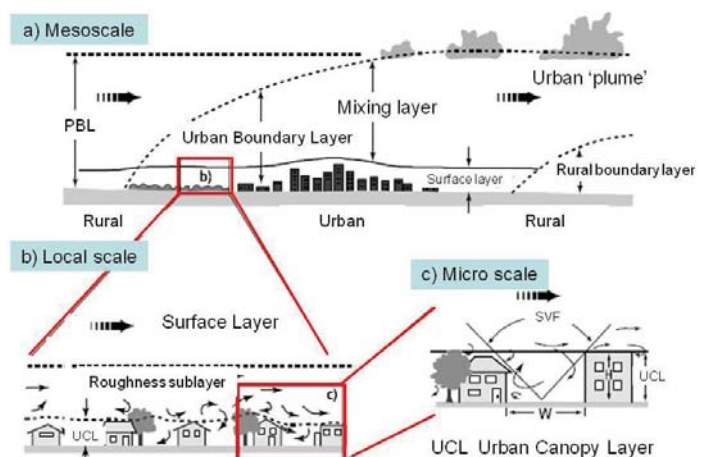
Het oppervlakte UHI is zowel overdag als na zonsondergang aanwezig. Een maximum wordt overdag bereikt wanneer de oppervlakken de zonnestraling absorberen. Na zonsondergang zijn de verschillen kleiner maar kunnen toch nog aanzienlijk zijn. Daarentegen is het atmosferische UHI overdag gering of afwezig. Een maximum wordt na zonsondergang bereikt doordat het platteland sneller afkoelt dan de stad. In de discussies over het stadsklimaat gaat het vooral om het atmosferische UHI van de Urban Canopy Layer, vanwege het effect op het leefklimaat.

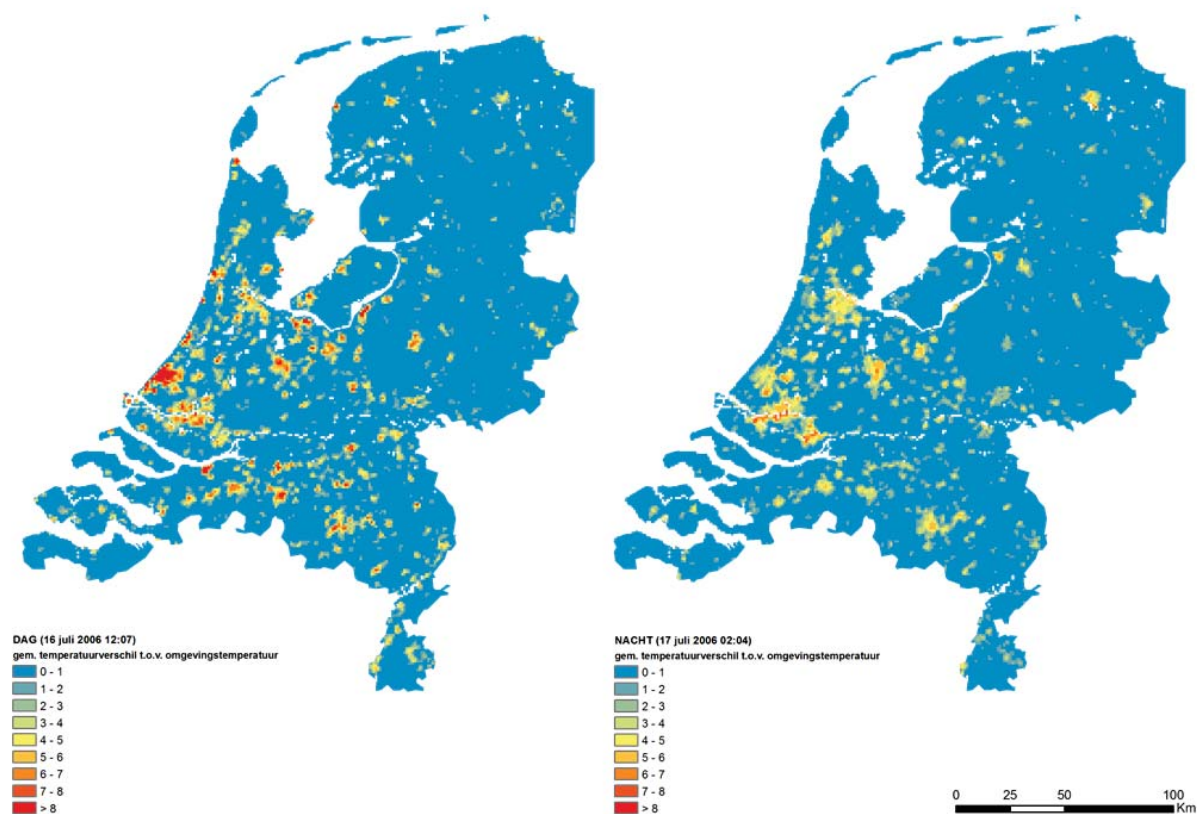
Het lokale klimaat en microklimaat worden beïnvloed door processen die zich op de stadsniveau (de mesoschaal) afspelen en andersom (**Figuur 1.2**). Zo heeft de ruimtelijke inrichting van een stedelijk gebied een effect op lokale windpatronen en hebben de gebruikte materialen van gebouwen in een wijk (bijvoorbeeld het gebruik van materialen met een hoge zonnereflectie) niet alleen een direct effect op het binnenklimaat, maar ook op het klimaat in een gebied rondom die gebouwen. Voor het ontwikkelen van effectieve adaptatiestrategieën en –maatregelen dient men dus rekening te houden met alle schaalniveaus. Vandaar dat in het kader van het CPC programma meteorologische processen op alle schaalniveaus zijn onderzocht.



Figuur 1.1 Het stedelijk hitte-eiland effect: verschil in lucht- en oppervlaktetemperatuur tussen stad en buitengebied overdag en 's nachts. Bron: <http://www.epa.gov/heatisland/about/ind ex.htm> (laatst geraadpleegd: juli 2014).

Figuur 1.2 De horizontale stadsschalen en daaraan gerelateerde verticale atmosferische schalen. De dikke pijlen geven de gemiddelde windrichting aan, de dunne pijlen de turbulente luchtbewegingen. We onderscheiden drie horizontale schalen en daaraan gerelateerde verticale atmosferische schalen: 1. Mesoschaal (stad- en omgeving) en de 'Urban Boundary Layer', 2. Lokale schaal (stadswijk) en 'Urban Boundary Layer'/'Urban Canopy Layer', en 3. Microschaal (straat, huizenblok) en 'Urban Canopy Layer'. PBL-planetary boundary layer, (Bron: Oke, 1976).



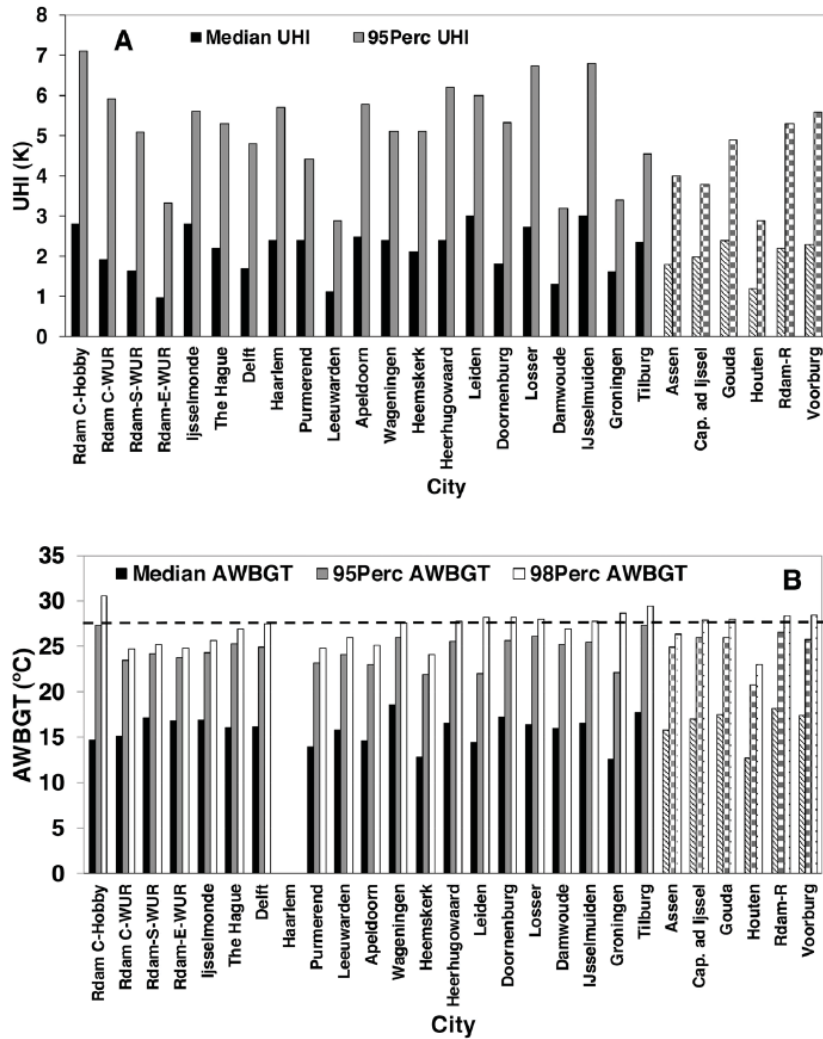


Figuur 1.3. Het oppervlakte hitte-eiland effect van de Nederlandse steden voor de situatie overdag (links) en 's nachts (rechts). De kaarten zijn gebaseerd op twee NOAA-AVHRR satellietbeelden van de oppervlaktetemperatuur opgenomen tijdens de hittegolfperiode van 2006 (bron: Klok et al., 2012).

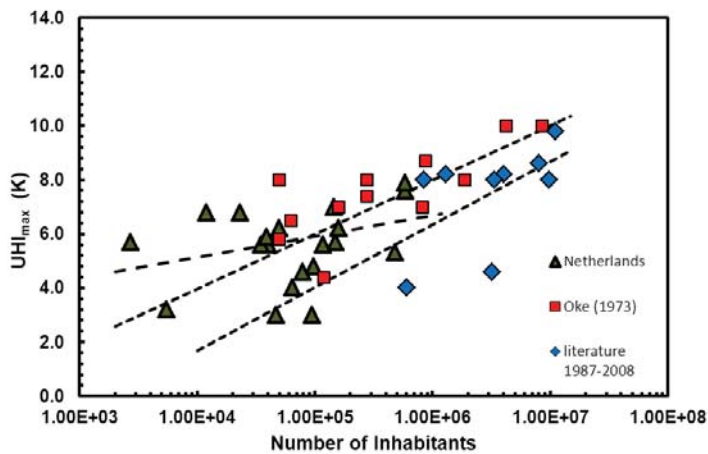
Uit gegevensbestanden van weeramateurs blijkt dat de UHI_{max} -waarden van Nederlandse steden uiteenlopen van 3 tot meer dan 7 °C (Steenefeld et al., 2011; Wolters en Brandsma, 2012) (**Figuur 1.4**). Deze waarden zijn vergelijkbaar met UHI waarden die voor andere Europese steden zijn bepaald. Oke (1973) vond een lineaire relatie tussen de UHI_{max} en het inwoneraantal⁹ van een stad. Deze relatie vinden we niet voor Nederlandse steden (**Figuur 1.5**); ook in kleinere steden en dorpen kan het UHI aanzienlijk zijn. Hieruit blijkt dat lokale eigenschappen sterk bepalend zijn voor de UHI intensiteit.

Figuur 1.4 toont ook het effect op gevoelstemperatuur of thermisch comfort. De berekende 95 percentielwaarden voor thermisch comfort (op basis van de 'Approximated Wet Bulb Globe Temperature' (AWBGT), zie **Bijlage C**) in dichtbebouwde stedelijke gebieden in Nederland bevinden zich nu nog net onder de drempelwaarde voor hittestress. Dit betekent dat thermisch discomfort en hittestress een belangrijk issue kunnen worden indien de mondiale opwarming in de komende decennia doorzet.

⁹ Hij gebruikte de logaritmische waarde van het inwoneraantal



Figuur 1.4. Mediaan en percentielwaarden voor UHI_{max} en thermisch comfort in Nederlandse steden op basis van AWBGT. De stippellijn is de grenswaarde voor thermisch discomfort. Dakstations zijn gearceerd (bron: Steeneveld et al., 2011).



Figuur 1.5. UHI_{max} (95 percentielwaarden, in graden Kelvin) voor steden versus het inwoneraantal van steden (logaritmische schaal) voor Europese steden en Nederlandse steden. Stippellijnen zijn lineaire regressielijnen berekend voor de resultaten van Oke (1973), resultaten gepubliceerd in de periode 1987-2006 en voor Nederlandse steden (bron: Van Hove et al. 2011c).



Thermisch comfort en andere meteovariabelen

Het thermisch comfort is niet alleen afhankelijk van de luchttemperatuur, maar ook van andere meteorologische variabelen zoals, luchtvochtigheid, straling en windsnelheid. Met het meetnetwerk zijn ook deze parameters geanalyseerd.

De luchtvochtigheid in de stad is lager dan die van het platteland wat in principe gunstig is voor het thermisch comfort tijdens warme zomerdagen. Echter, de verschillen zijn gering; minder dan 5% voor de *absolute* luchtvochtigheid¹⁰ en 9-15% voor de *relatieve* luchtvochtigheid.

De verschillen in absolute vochtigheid zijn met name overdag aanwezig; door verdamping van de vegetatie bevat de lucht boven het platteland meer waterdamp, terwijl de hoeveelheid waterdamp in de stadslucht min of meer constant blijft. Daarentegen zijn de verschillen in relatieve luchtvochtigheid zowel overdag als 's nachts aanwezig. Overdag is de lagere relatieve luchtvochtigheid in de stad vooral het gevolg van geringere verdamping en gedurende de nacht van de hogere temperatuur.

Ook de gemiddelde globale straling (d.i. de hoeveelheid zonnestraling per oppervlakte-eenheid) in de stad is lager (12 – 24%) in vergelijking met de referentielocatie. Dit is voornamelijk een gevolg van schaduwwerking door gebouwen en andere objecten (bijvoorbeeld bomen) in de buurt van de meetstations. Tijdens zomerse dagen is een lagere hoeveelheid directe straling van de zon gunstig voor het thermisch comfort. Dit geldt overigens ook voor de diffuse straling maar deze is niet apart gemeten.

De gemiddelde gemeten windsnelheid in de stad is aanzienlijk lager (40-65%) dan in het rurale gebied. Vooral tijdens zomerse dagen is het ontbreken van luchtstroming ongunstig voor het thermisch comfort. Dit geldt ook voor de luchtkwaliteit. Beide hebben een ongunstig effect op de gezondheid van mens en dier.

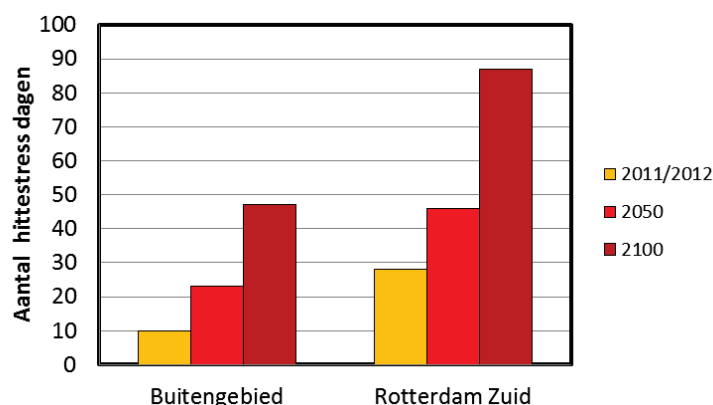
Klimaatverandering en het toekomstig stedelijk klimaat

Om een indicatie te krijgen van de urgentie van het hitteprobleem, zijn de temperatuurreksen van het weerstation 'Zuid'¹¹ in Rotterdam en de referentielocatie getransformeerd naar temperatuurreksen voor 2050 en 2100¹². Dit gebeurde voor het 'W+'-KNMI'06 klimaatscenario, dat met het oog op de hitteproblematiek als een realistisch "worst case" scenario beschouwd kan worden. Onder dit scenario kunnen we zowel in het buitengebied als in de stad een aanzienlijke toename van het aantal dagen met verminderd thermisch comfort verwachten (**Figuur 1.6**). We benadrukken dat dit een eerste grof resultaat is, waarbij alleen is gekeken naar de verandering in temperatuur. Voor een complete analyse dienen ook variabelen zoals hierboven beschreven te worden meegenomen.

¹⁰ De absolute luchtvochtigheid is de hoeveelheid waterdamp per volume lucht. De relatieve luchtvochtigheid is de hoeveelheid waterdamp in de lucht ten opzichte van de maximale hoeveelheid waterdamp die de lucht kan bevatten. I.t.t. de absolute luchtvochtigheid is de relatieve luchtvochtigheid afhankelijk van de luchttemperatuur; lucht met een hogere temperatuur kan meer waterdamp bevatten. We weten nog niet precies of de absolute luchtvochtigheid of de relatieve luchtvochtigheid de bepalende factor is voor thermisch comfort. Beide grootheden komen in de thermische indices voor.

¹¹ Nabij Zuidplein

¹² www.knmi.nl



Figuur 1.6. Het aantal dagen met matige tot sterke hittestress (Effectieve Temperatuur, zie **Bijlage C**) voor de locaties buitengebied en 'Rotterdam Zuid', berekend voor de huidige situatie en halverwege en aan het eind van deze eeuw onder het W+ KNMI'06 scenario.

1.2 De interactie tussen stad en platteland

Het is bekend dat de stad een invloed heeft op het klimaat van het omringende buitengebied. Andersom zou het landgebruik in het buitengebied een invloed op het klimaat in de stad kunnen hebben. Echter, onduidelijk is hoe groot de reikwijdten ('footprints') van beide effecten zijn. Om hierin meer inzicht te krijgen zijn door CPC vliegtuigmetingen uitgevoerd en is gebruik gemaakt van modelsimulaties.

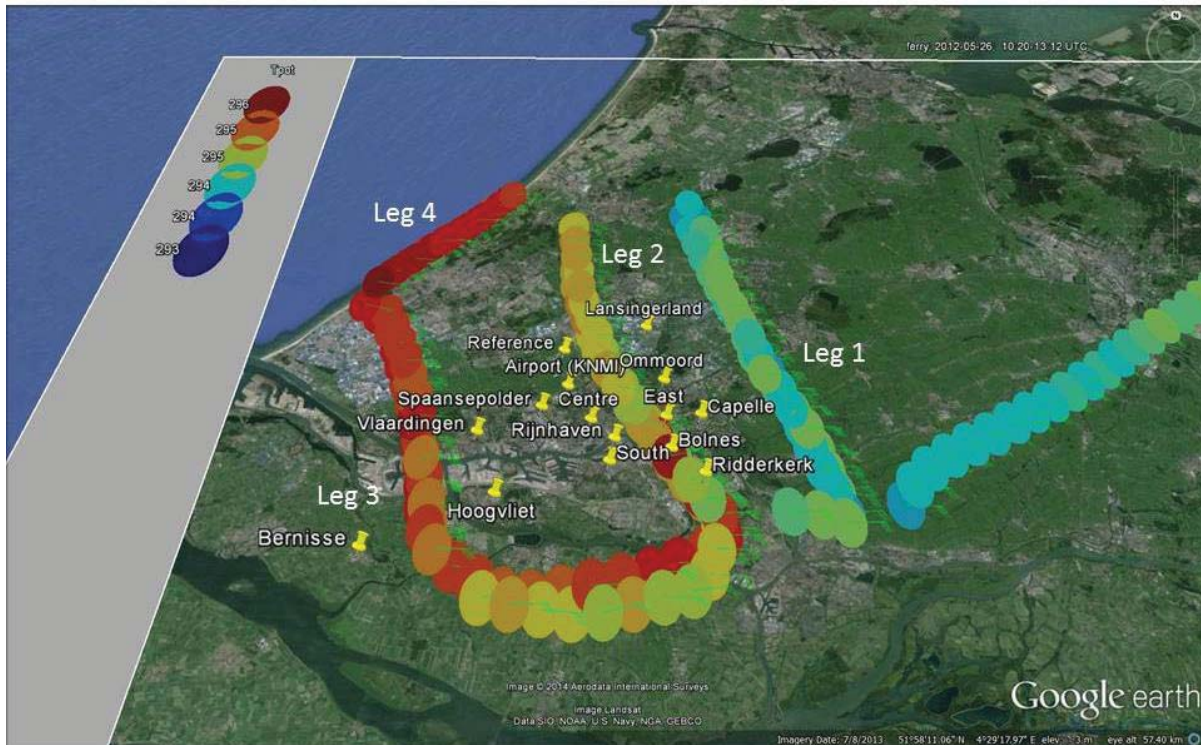
Een zestal vluchten zijn boven Rotterdam en omgeving uitgevoerd waarbij de luchttemperatuur, oppervlaktetemperatuur, luchtvochtigheid en CO₂ concentratie zijn gemeten. De metingen geven inzicht niet alleen inzicht in de horizontale reikwijdte ('footprint') van het UHI effect, maar ook van de verticale reikwijdte. De metingen hebben overdag¹³ plaatsgevonden, doorgaans op een hoogte van ongeveer 300m. Daarnaast zijn er verticale profielen (300 - 1700m hoogte) gemeten om de opbouw van de atmosferische grenslaag te karakteriseren (**Figuur 1.7**).

Het UHI effect op 300 m hoogte is gering en moeilijk te onderscheiden van de dagelijkse gang van de gemeten variabelen. Op warme dagen is de lucht op 300m boven de stad ongeveer 1 °C warmer. Even grote verschillen worden overdag ook voor de luchttemperatuur tussen de meetstations in Rotterdam en het referentiestation (ten noorden van Rotterdam) gevonden.

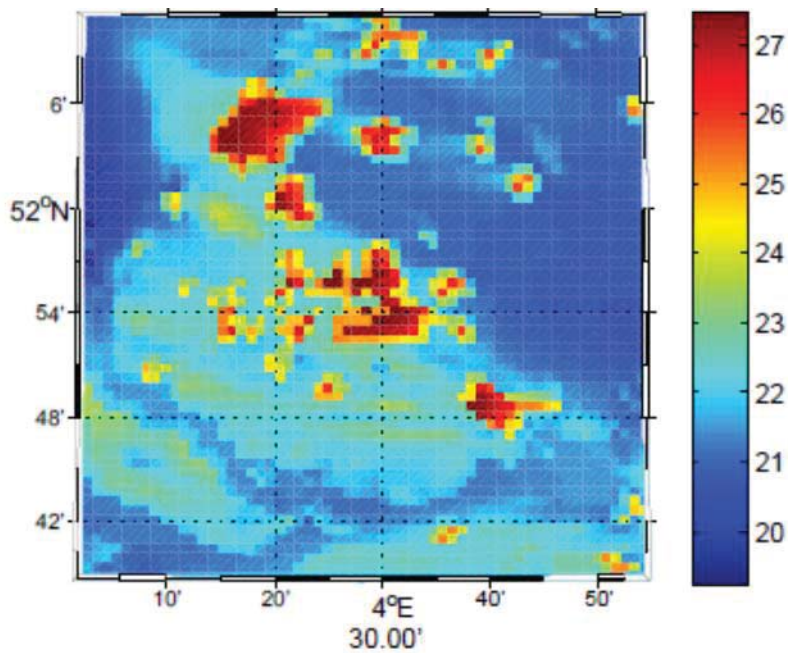
De luchttemperaturen benedenwinds (leg 2-4) zijn hoger (0.2 – 1.0 graden) dan de luchttemperaturen bovenwinds (leg 1). Opvallend zijn ook de hogere luchttemperaturen boven het kassengebied en boven de kustlijn (leg 4). Daarentegen laten de oppervlaktetemperaturen grote contrasten zien, bijvoorbeeld tussen oppervlaktetemperatuur voor water en voor bebouwde oppervlakte (asfalt op wegen of daken). Het verschil kan oplopen tot wel 40°C. De gemeten uitwaaiing van de stedelijke warmte benedenwinds van de stedelijke gebieden wordt ook in modelsimulaties teruggevonden, het zogenaamde 'urban plume'-effect (**Figuur 1.8**) (zie ook Theeuwes et al., 2013).

Het lijkt er dan ook op dat de verticale footprint van de stad beperkt is (zo'n 300 m), maar dat de horizontale footprint tot 10-tallen kilometers ver reikt in het rurale gebied benedenwinds van bebouwde gebieden. Vermeldenswaard is ook dat uit de metingen blijkt dat de lucht boven de stad gemiddeld 4 ppm rijker is aan CO₂ dan de lucht boven de omgeving, met een grote piekwaarde boven het Botlek gebied (ca. 8 ppm verschil).

¹³ Er was alleen toestemming om overdag te vliegen



Figuur 1.7 Trajecten en meetresultaten van Lagrangiaanse vluchten boven de zuidelijke Randstad op 300 m hoogte op 26 mei 2012 tussen 10:20 en 13:12 UTC (oosten wind 25-35 kn, helder $Q_n \sim 600 \text{ W m}^{-2}$, $T_{\text{max}} 26 \text{ }^\circ\text{C}$). De grenslaaghoogte (voor uitleg zie **Figuur 1.2**) was ongeveer 1200m op dat tijdstip. Leg 1 is bovenwinds van het stedelijk gebied, leg 2 volgt een traject dwars over de stad (of tussen de stedelijke gebieden door), leg 3 benedenwinds. Tevens zijn metingen langs de kust uitgevoerd (leg 4). De kleur van het traject correspondeert met de gemeten oppervlaktetemperatuur.



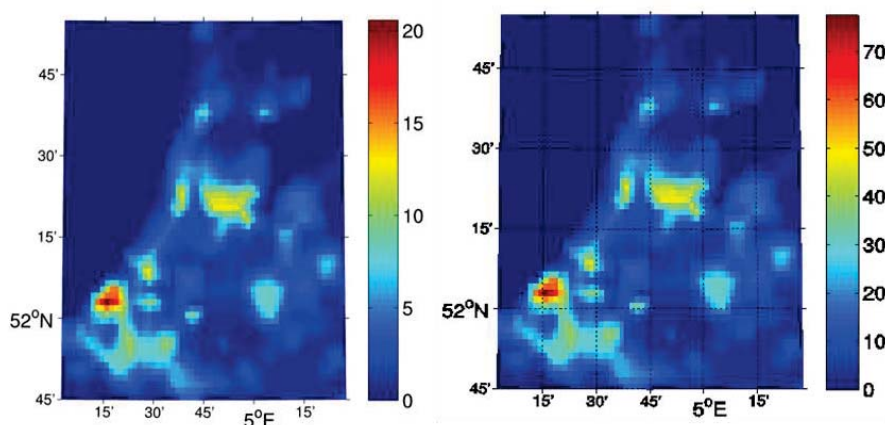
Figuur 1.8 Modelsimulatie van de temperatuurverdeling in de zuidwestelijke Randstad om UT 20:00 (22u00 LT). Temperaturen zijn in $^\circ\text{C}$ (bron: Ronda et al., 2010).



1.3 De invloed van antropogene warmteproductie

Binnen CPC is veel tijd besteed om de representatie van het stedelijk gebied in het meso-schaalmodel WRF ('Weather and Research Forecasting') te verbeteren, onder andere ten aanzien van antropogene warmtebronnen (Ronda et al., 2012). Belangrijke antropogene warmtebronnen zijn bijvoorbeeld: de industrie, individuele huishoudens, gebouwen, het verkeer en mensen en dieren. Tot voor kort waren weinig gegevens beschikbaar over enerzijds, de grootte van de antropogene warmtebronnen op stad- en wijkniveau in Nederlandse steden en anderzijds, de locaties van deze bronnen (Klok et al., 2010). Vandaar dat deze emissies doorgaans niet worden meegenomen in berekeningen van het UHI effect (of alleen op relatief eenvoudige wijze) door mesoschaal-modellen.

Met behulp van het LUCY-model (Large scale Urban Consumption of energy; Lindberg en Grimmond, 2013) is eerst gekeken naar de ruimtelijke variatie in antropogene emissies van de Randstad. Dit gebeurde voor een resolutie van 5 x 5 km. Voor een warme dag in Nederland blijken de lokale verschillen in geëmitteerde antropogene warmte vrij groot te zijn (**Figuur 1.9**): in de stedelijke gebieden rond Den Haag en Rotterdam loopt de emissie van antropogene warmte op tot een waarde van ongeveer 20 W m^{-2} gedurende de nacht en van ongeveer 70 W m^{-2} gedurende de dag, terwijl in het buitengebied de emissie van warmte veel lager is. Deze ruimtelijke verschillen in antropogene emissies verkregen met het LUCY model zijn vervolgens geïmplementeerd in het WRF model (Ronda et al., 2012).



Figuur 1.9 Antropogene emissies van warmte (in W m^{-2}) voor de Randstad voor 2 uur 's nachts lokale tijd (links) en 12 uur 's middags lokale tijd (rechts) zoals geschat met behulp van versie 3.1 van het LUCY model (Lindberg en Grimmond, 2013).

De belangrijkste conclusies zijn;

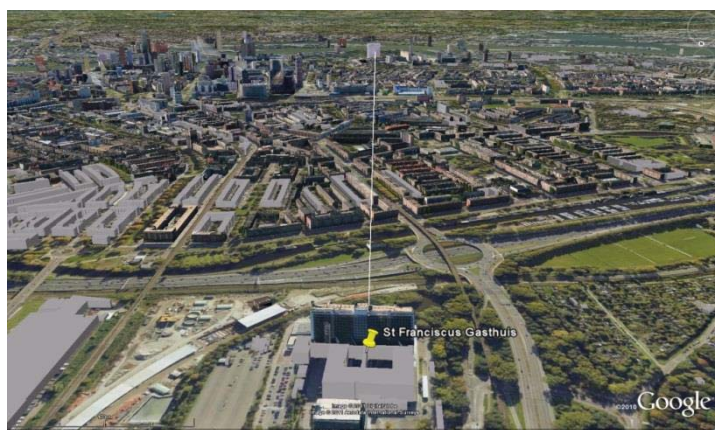
1. in Nederland zijn antropogene emissies van warmte een belangrijke parameter die het UHI effect in Nederlandse steden bepalen. Het inbouwen van antropogene emissies van warmte uit LUCY leidt tot gesimuleerde temperaturen die (lokaal) tot $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ hoger of tot $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ lager zijn dan de temperaturen die zijn berekend zonder dat er rekening is gehouden met antropogene emissies van warmte. Deze simulaties suggereren dat antropogene emissies in de Randstad lokaal verantwoordelijk zijn voor 10% extra UHI effect;
2. de ruimtelijk variaties in antropogene emissies hebben een niet te verwaarlozen effect op het lokale klimaat op stad- en wijkniveau in Nederland. Indien in het model er geen rekening wordt gehouden met temporele en ruimtelijke variaties in antropogene emissies wordt de temperatuur lokaal tot ca $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ onderschat of tot $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ overschat. Traditioneel wordt deze ruimtelijke variatie niet meegenomen in mesoschaalmodellen voor de atmosfeer. Dit betekent dat weersverwachtingen gebaseerd op deze modellen voor sommige gebieden een overschatting van de temperatuur berekenen, terwijl voor andere gebieden de temperatuur wordt onderschat.



1.4 Verdamping in de stad

Onder invloed van klimaatverandering zullen in de toekomst vaker lange warme en mogelijk droge periodes overbrugd moeten worden. Er zal meer behoefte zijn aan koeling van stedelijk gebied. Tegelijkertijd is het streven om zuinig met water om te gaan, juist in dergelijke periodes, om verdroging van natuurgebieden en daling van grondwaterstanden in stedelijk gebied te voorkomen. Verdamping staat centraal in dit probleem: verdamping kan helpen hitte in de stad te matigen, maar daarvoor is per definitie water nodig.

Over verdamping van water in de stad is relatief weinig bekend. Gegevens over verdamping kunnen helpen bij de invulling van het stedelijk waterbeheer. Een goede schatting van de verdamping tijdens warme, droge periodes kan helpen bij de verdeling van het beschikbare water over verschillende gebruiksbehoeftes (zoals groenbeheer, drinkwater), in relatie tot verschillende beleidsdoelen (zoals koeling van stedelijk gebied en voorkómen van paalrot en zoutindringing) (Brolsma et al., 2012). Inzicht in de werking van verdamping in de stad kan helpen om stedelijk gebied zó in te richten dat koeling door verdamping gewaarborgd is met een zo klein mogelijk waterverbruik. Zo kan bijvoorbeeld de waterbehoefte van vegetatie voor overleven en het in stand houden van verkoelend vermogen beter geschat worden.



Figuur 1.10 Links: Scintillometerpad tussen het Sint Franciscus Gasthuis (Lat/Lon 51.56478/4.27747, hoogte 51 m) en het Erasmus MC (Lat/Lon 51.54632/4.28128, hoogte 77 m) in Rotterdam. De afstand tussen zender en ontvanger is 3451 m, oriëntatie ~180°. Rechts: opstelling voor verdampingsmetingen boven op een appartementencomplex aan de Ingenieur J.P. van Muijwijkstraat in Arnhem (51°59'4.97"N, 5°55'5.73"E) <http://www.climatexchange.nl/sites/arnhem/index.htm>. Het meetsysteem bestaat uit 3D ultrasonische anemometer (Gill R3-50) in combinatie met een snelle open-pad infrarood gas analyzer (Li-Cor LI-7500) bevestigd aan de top van een 4 m hoge mast.

In CPC zijn eerste schattingen van de verdamping in Arnhem en Rotterdam gemaakt (Jacobs et al., 2014). Voor Arnhem zijn hiervoor de resultaten gebruikt van eddy-covariantiemetingen die sinds het voorjaar van 2012 worden uitgevoerd (**Figuur 1.10 rechts**). Voor Rotterdam zijn de 'Large Aperture Scintillometer'-gegevens gebruikt waaruit indirect de verdamping kan worden berekend¹⁴ (**Figuur 1.10 links; Bijlage D**). Bovendien zijn de resultaten van de sapstroommetingen geanalyseerd (Slingerland, 2012), waarmee ook een indicatie gekregen kan worden van het effect van de verdamping door bomen op de waterbalans van de stad.

¹⁴Recent is door WUR-MAQ in het kader van een STW project een zogenoemde 'microwave' scintillometer ontwikkeld (Hartogensis et al, 2012). Hiermee kan, samen met een optische scintillometer, zowel de gebiedsgemiddelde voelbare warmteflux als de verdamping worden bepaald. Deze ontwikkeling biedt nieuwe mogelijkheden (i.e. routinematige stadsgemiddelde verdampingsschattingen) voor het waterbeheer in de stad.



De resultaten van de scintillometer-metingen in Rotterdam laten een patroon zien waar de grote pieken in verdamping samengaan met relatief zonnige dagen (**Figuur 1.11 boven**). Ongeveer 21% van de gemiddelde neerslag in de zomermaanden in Rotterdam (3.2 mm per dag¹⁵) wordt weer verdampt (0,67 mm). Deze verdamping komt overeen met een koelsnelheid van 20 W m^{-2} (ca. 11% van de inkomende zonnestraling) (**Tabel 1.1**).

In Arnhem is de verdamping sterk gecorreleerd met neerslag (**Figuur 1.11 beneden**). Ongeveer 60% van de gemiddelde neerslag per dag (=24 uur) in de periode april tot en met september (1.44 mm) wordt gebruikt voor verdamping (0.86mm). Dit komt overeen met een koelsnelheid (E) van 25 W m^{-2} per dag; dit is ca. 14% van de gemiddelde dagelijks inkomende zonnestraling in die periode in Arnhem (ca. 180 W m^{-2}).

De samenhang met de neerslag tijdens de zomermaanden is volgens deze metingen in Arnhem duidelijk sterker dan in Rotterdam (**Figuur 1.11**). De verdamping in Arnhem neemt na neerslag ook veel minder snel af. Jacobs et al. (2014) dragen als mogelijke verklaring voor dit verschil aan dat de platte daken rond de meettoeren in Arnhem het water beter en langer vasthouden dan in Rotterdam. Dit zou betekenen dat bouwstijlen of andere maatregelen die helpen om regenwater beter en langer vast te houden de koeling aan het begin van warme, droge periodes bevorderen.

Sapstroommetingen zijn een heel ander type metingen dan de voorgaande metingen. Desondanks vinden we vergelijkbare verdampingssnelheden: 0.72 en 0.98mm per dag, overeenkomend met een koelsnelheid van 21 en 28 W m^{-2} . Berekeningen laten zien dat de gemiddelde koelsnelheid per boom varieert van 1.1 kW tot 2.2 kW. Op sommige heldere dagen loopt het uurgemiddelde maximum waterverbruik op tot 12 à 16 liter, wat overeenkomt met uurgemiddelde koelsnelheid van 8.2-10.9 kW per boom.

De waterconsumptie gemiddeld over de 5 onderzochte bomen bedraagt 50 liter per dag (april – september). Rekening houdend met de kroon diameter, berekenen we hieruit een gemiddeld waterverbruik van 0.64 mm per dag. Extrapolatie van dit resultaat naar alle bomen (600.000) in het kerngebied van Rotterdam (319 km^2) levert een totale verdamping van < 4% van de neerslag in deze periode (386mm). Alhoewel het hier eerste ruwe schattingen betreft, laten deze zien dat de waterconsumptie van het huidige aantal bomen slechts een gering effect heeft op de waterbalans van de stad. Maar plaatselijk kan dit anders zijn, zeker op dagen dat de waterconsumptie van de bomen maximaal is (ca. 170 l per dag).

Omdat metingen aan verdamping in de stad lastig routinematig zijn uit te voeren probeert men deze wel eens af te leiden uit de zogenoemde referentieverdamping. Dat is de verdamping van 'een goed van water voorzien, gezond en actief groeiend grasland' die vervolgens gecorrigeerd wordt voor de eigenschappen van het stadsoppervlak. Dit blijkt echter niet te kunnen: de verdamping in een stad reageert anders op het weer dan die van een grasland. In de stad nam op droge dagen de verdamping af, terwijl de verdamping van grasland of bos toenam (Jacobs et al., 2014).

De verdamping in een stad is veel geringer dan in het landelijke gebied. Ten gevolge daarvan wordt een groot deel van de inkomende zonne-energie omgezet in voelbare warmte. Om het UHI effect te beperken, zou de verdamping opgevoerd moeten worden. Vergroening en meer blauw in de stad dragen hieraan bij. Ook kan de vochtvoorziening van stedelijk groen tijdens droge perioden worden verbeterd, waardoor de verdamping redelijk op peil blijft.

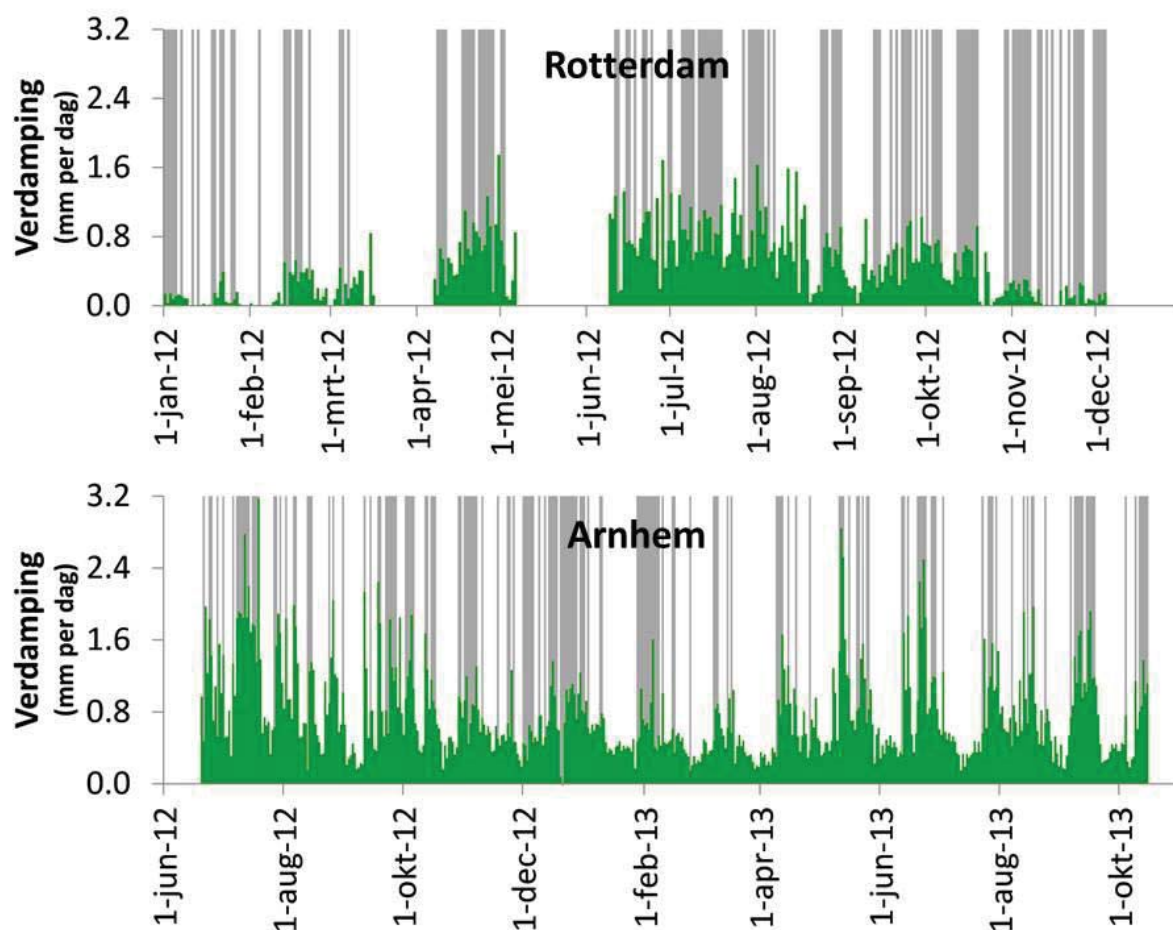
¹⁵ Het betrof hier wel een extreem natte zomer in Rotterdam.



Tabel 1.1 Vergelijking van de daggemiddelde verdamping in Arnhem (Eddy-covariantiemetingen) en in Rotterdam (LAS), en verdamping berekend op basis van sapstroommetingen aan bomen in Rotterdam. S_{in} kortgolvlige inkomende straling; L_{in} langgolvlige inkomende straling; All_{in} som kortgolvlige en langgolvlige inkomende straling; E evaporatie (bron: Jacobs et al., 2014).

| | S_{in} ($W m^{-2}$) | L_{in} ($W m^{-2}$) | All_{in} ($W m^{-2}$) | Verdamping ($mm dag^{-1}$) | E ($W m^{-2}$) | E/S_{in} (%) | E/All_{in} (%) |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| Arnhem EC | 183 | 352 | 535 | 0.86 | 25 | 14 | 5 |
| Rotterdam LAS | 188 | 354 | 542 | 0.68 | 20 | 11 | 4 |
| Sapstroom parkomgeving | 190 | 364 | 554 | 0.72 | 21 | 11 | 4 |
| Sapflow straatomgeving | 190 | 364 | 554 | 0.98 | 28 | 15 | 5 |

- Alle stralingsfluxen zijn eigen metingen, op het dak in Arnhem of van het Referentiestation uit het monitoring netwerk van Rotterdam.
- Periode Arnhem EC: juni-september 2012 en april-september 2013
- Periode Rotterdam LAS: april-september 2012
- Sapflowmetingen: juni-september 2012



Figuur 1.11 Gemeten dagelijkse verdamping (groene voorgrond, mm per dag) in Rotterdam in het jaar 2012 (boven) en in Arnhem in de periode juni 2012 – oktober 2013 (beneden). De grijze balken op de achtergrond geven dagen aan waarop meer dan 1 mm neerslag viel (bron: Jacobs et al., 2014).

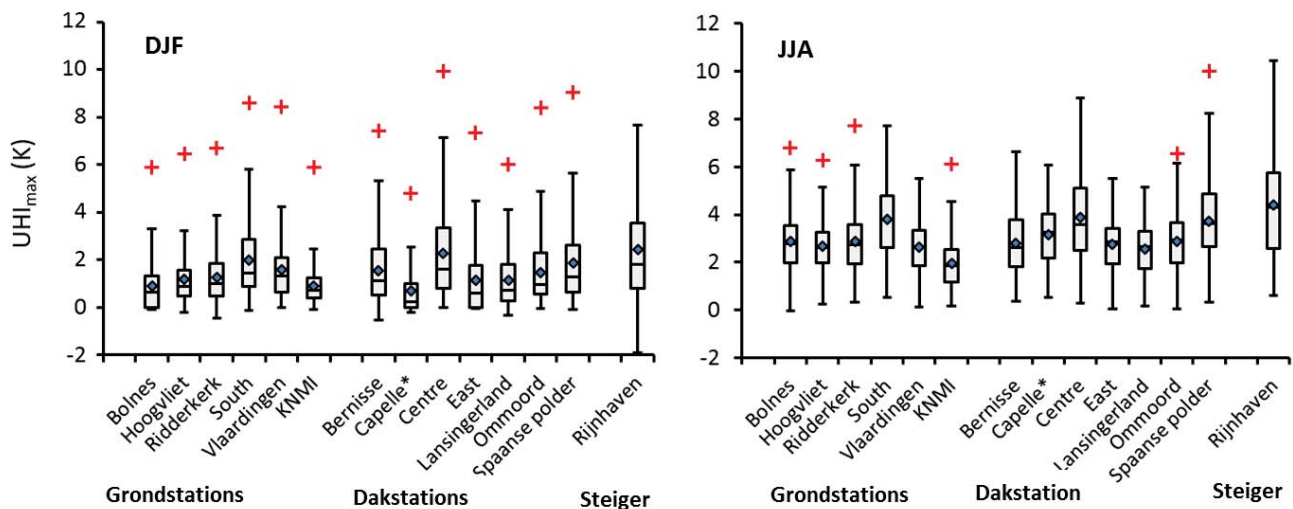


1.5 Variatie in klimaat binnen de stad

Onderstaande resultaten van lokale verschillen in stadsklimaat zijn grotendeels gebaseerd op de uitkomsten van het CPC-monitoringnetwerk van Rotterdam (Van Hove et al., 2011b, 2014). Het meetnet maakt het mogelijk om de temporele en ruimtelijke variatie in het lokale stadsklimaat in de agglomeratie meer gedetailleerd te analyseren en te relateren aan wijkeigenschappen. Elk weerstation meet niet alleen de gebruikelijke variabelen (luchttemperatuur, luchtvochtigheid en windsnelheid en -richting) maar ook de globale straling en zwarte-bol-temperatuur. Hiermee kan ook inzicht worden verkregen in de temporele en ruimtelijke variatie in thermisch comfort in de buitenruimte en de invloed van wijkeigenschappen hierop. Let op dat het hier gaat om gebiedsgemiddelde waarden; zeer plaatselijk (op de microschaal) kunnen grote verschillen in thermisch comfort voorkomen. Daarnaast hebben we gebruik gemaakt van resultaten die zijn verkregen uit satellietbeelden (Klok et al., 2012), mobiele metingen (Heusinkveld et al., 2014) en uit modelsimulaties (Schrijvers et al., 2014).

1.5.1 De variatie in temperatuur

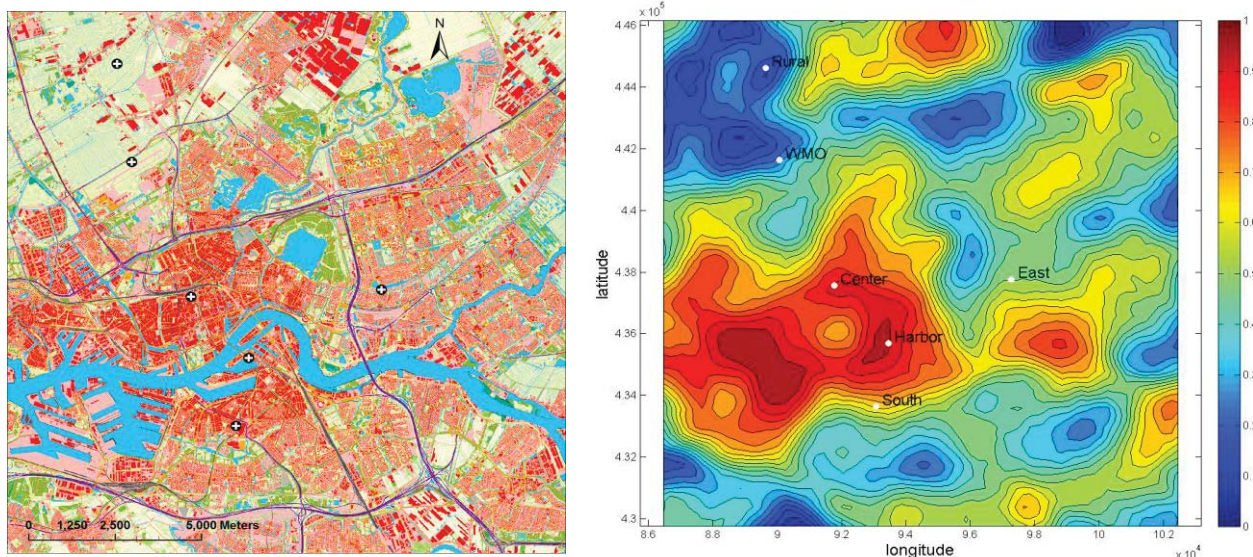
Het UHI in het stedelijke gebied van Rotterdam kan aanzienlijk zijn: maximum temperatuurverschillen (UHI_{max}) tussen de stad en het omringende platteland van 7 graden en meer zijn geen uitzondering (**Figuur 1.12**). Het blijkt dat dit niet alleen voor de zomermaanden geldt, maar ook voor een groot deel van het jaar. In de wintermaanden (DJF) zijn de UHI-intensiteiten over het algemeen gering. Desondanks kan op sommige winterdagen het UHI effect aanzienlijk zijn. Het effect is meestal kortdurend (minder dan 1 dag) en het treedt op als de wind naar het oosten draait en daarbij koude lucht aanvoert. Er treedt dan een scherpe daling van de temperatuur in het rurale gebied op, terwijl de temperatuur in de stad nog enige tijd onveranderd blijft.



Figuur 1.12 Box-whisker-plot van UHI_{max} op de meetlocaties in de Rotterdam-agglomeratie. NB: UHI_{max} is gedefinieerd als het maximale verschil in luchttemperatuur tussen stad en buitengebied gedurende een etmaal. De waarden zijn berekend voor de maanden juni, juli en augustus (JJA) van 2010, 2011 en 2012 en voor de maanden december, januari en februari (DJF) van 2009/2010, 2010/2011 en 2011/2012. Daarbij is een onderscheid gemaakt tussen dak- en grondstations (bron: Van Hove et al., 2014).



De variatie in UHI binnen Rotterdam is aanzienlijk zoals ook **Figuur 1.13** laat zien. De dichtbebouwde locaties 'Centrum', 'Rijnhaven', 'Zuid', en 'Spaanse polder' laten de hoogste UHI intensiteiten zien. Dit geldt voor alle onderzochte jaren (2010-2012) en seizoenen. Verder valt op dat de temperaturen gemeten door het KNMI station op het vliegveld Rotterdam-Haaglanden gemiddeld hoger zijn dan op de referentielocatie in het buitengebied ten noorden van Rotterdam. Een mogelijke oorzaak is het al eerder genoemde 'urban plume'-effect van de stad.



Figuur 1.13 Topografische kaart (links) en ruimtelijke variatie in UHI (rechts) in Rotterdam en omgeving (14.9 x 14.3 km). Genormaliseerde UHI waarden worden gepresenteerd (UHI Centrum = 1). In de zomer (JJA) zijn de gemiddelde mediaan- en 95 percentielwaarden voor UHI_{max} in Centrum 4.2 en 7.5 K (Bron: Heusinkveld et al., 2014).

1.5.2 De invloed van wijk eigenschappen op temperatuur

Om een indruk te krijgen van de invloed van wijk eigenschappen op de temperatuur zijn, is gekeken naar het landgebruik, de geometrie en het 'urban canyon'-effect.

Stedelijk landgebruik

Zowel voor de oppervlaktetemperatuur als voor de luchttemperatuur worden significante¹⁶ correlaties ($p < 0.05$) gevonden voor de fractie bebouwd oppervlak, de fractie verhard oppervlak en de fractie stedelijk groen. Dit is niet het geval voor de fractie oppervlaktewater (**Tabel 1.2** en **1.3**).

Bebouwing en verharding

Stedelijke gebieden met veel bebouwing en verharding hebben een grotere oppervlaktetemperatuur en UHI intensiteit. De fractie bebouwd oppervlak blijkt een sterk bepalende factor te zijn. Bij iedere stap van 10% toename van de bebouwde fractie stijgt de oppervlaktetemperatuur met 1.4 °C. De mediaan waarde voor luchttemperatuur stijgt in dit geval met 0.34 °C en de 95-percentiel waarde met 0.63 °C. Een toename van de fractie totaal verhard oppervlak met 10% geeft een 0.7 °C hogere oppervlaktetemperatuur en een toename van de mediaan en 95-percentiel UHI_{max} van respectievelijk 0.25 °C en 0.44 °C.

¹⁶ Met de p-waarde wordt beoordeeld of het verband 'significant' is. Bij een p-waarde die kleiner is dan 0.05 (d.i. 5% kans dat de relatie op toeval berust), is een verband statistisch significant.



Tabel 1.2 De invloed van het stedelijk landgebruik en geometrie op de variatie in **oppervlaktetemperatuur** overdag tussen wijken in de Rotterdamagglomeratie. De oppervlaktetemperaturen zijn berekend d uit satellietbeelden. De relaties zijn significant op basis van het 95% betrouwbaarheidsinterval (bron: Klok et al. 2012).

| Hittefactor | Range van waarden | Toename/afname in oppervlaktetemperatuur (°C) bij toename van 0.1 (10%) | | Pearson correlatie - r | Opmerkingen |
|--|-------------------|---|------|------------------------|---------------------------|
| | | | | | |
| Stedelijk landgebruik¹ | | | | | |
| Bebouwde fractie | 0.00 – 0.39 | | 1.4 | 0.54 | |
| Totaal verharde fractie | 0.00 – 0.96 | | 0.7 | 0.62 | |
| Groen fractie | 0.02 – 0.66 | | -1.3 | -0.83 | |
| Water fractie | 0.00 – 0.63 | | 0.2 | 0.13 | geen significante relatie |
| Stedelijke geometrie¹ | | | | | |
| Sky View Factor (SVF) | 0.52-1.00 | | -1.4 | -0.61 | Bij toename SVF |
| Gebouwhoogte | 3 - 38 m | | 0.3 | 0.52 | bij toename van 1 m |
| Albedo | 0.06 – 0.16 | | -0.8 | -0.64 | bij toename van 0.01 |
| Emissiviteit | 0.92 – 1.00 | | -1.7 | -0.90 | bij toename van 0.01 |

1: bepaald voor wijken

Tabel 1.3 De invloed van het stedelijk landgebruik en geometrie op de variatie in $UHI_{max}()$ binnen de Rotterdamagglomeratie. De UHI_{max} waarden zijn gebaseerd op **luchttemperatuurgegevens** na zonsondergang. De relaties zijn significant op basis van het 95% betrouwbaarheidsinterval ($p < 0.05$). (Bron: Van Hove et al. 2014).

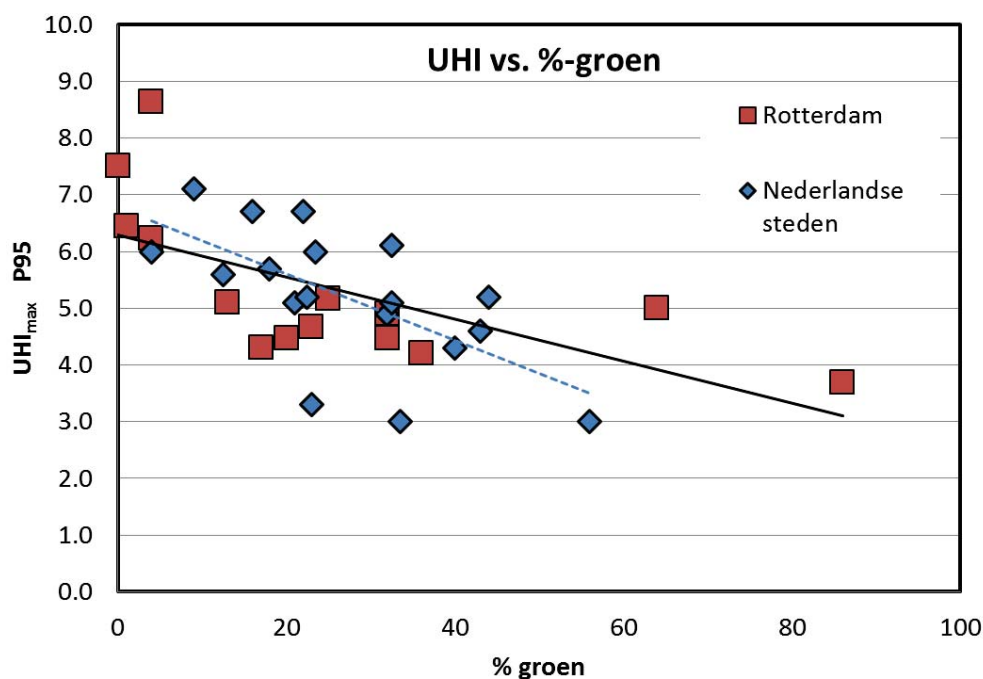
| Hittefactor | Range van waarden ² | Toename/afname in UHI_{max} (in °C) bij toename van 0.1 (10%) | | | | Opmerkingen |
|--|--------------------------------|---|-------|-------|-------|--------------------------|
| | | mediaan | r^2 | P95 | r^2 | |
| Stedelijk landgebruik¹ | | | | | | |
| Bebouwde fractie | 0.03-0.38 | 0.34 | 0.64 | 0.63 | 0.60 | |
| Totaal verharde fractie | 0.14-0.74 | 0.22 | 0.58 | 0.44 | 0.60 | |
| Groen fractie | 0.01-0.64 | -0.33 | 0.65 | -0.62 | 0.48 | |
| Water fractie | 0.00-0.39 | Geen significante relatie | | | | zowel toename als afname |
| Stedelijke geometrie¹ | | | | | | |
| Sky View Factor (SVF) | 0.44-0.78 | Geen significante relatie | | | | |
| Gebouwhoogte | 2.3 - 26.6 m | 0.08 | 0.69 | 0.19 | 0.80 | bij toename van 1 m |
| Albedo | 0.08-0.17 | Geen significante relatie | | | | |

¹: bepaald binnen een straal van 250m rondom elk weerstation; ² excl. Zestienhoven (WMO) en Referentie



Groen

De fractie groen is vaak omgekeerd evenredig met de fractie totaal verhard oppervlak. Immers, een stijging van de groenfractie gaat in veel gevallen ten koste van het verharde oppervlak¹⁷. Wanneer 10% van het verharde en bebouwde oppervlak plaats maakt voor groen, daalt de oppervlaktetemperatuur met 1.3 °C. In dit geval daalt de mediaanwaarde voor UHI_{max} met 0.33 °C en de 95 percentielwaarde met 0.62 °C. De resultaten van mobiele metingen laat een vergelijkbare afname zien (Heusinkveld et al. 2014). Hetzelfde geldt voor de relatie tussen UHI_{max} waarden van verschillende steden en de fracties groen in die steden (Steenefeld et al., 2011). De relatie tussen UHI_{max} en groenfractie blijkt dus robuust te zijn (Figuur 1.14).

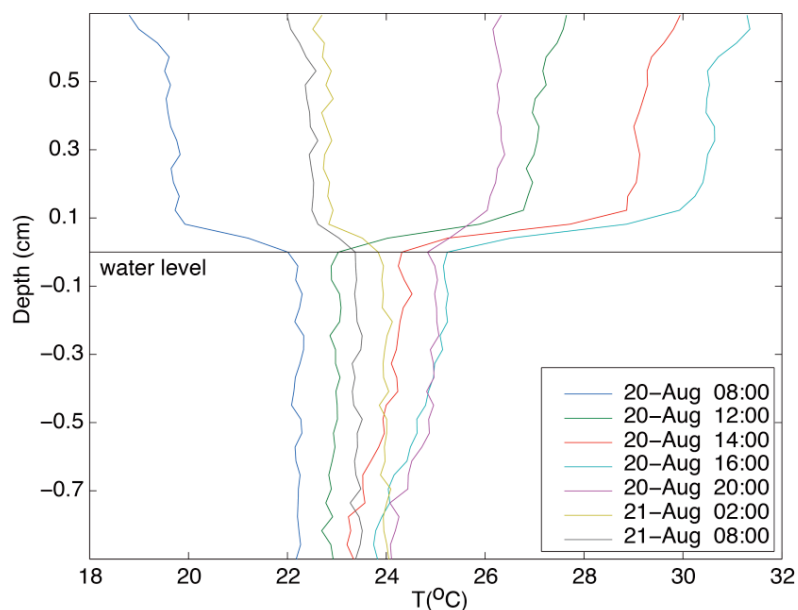


Figuur 1.14 Maximale UHI intensiteit (UHI_{max} 95 percentielwaarden) als functie van het percentage groen in een stedelijk gebied bepaald voor de Rotterdam agglomeratie en Nederlandse steden (bron: Steeneveld et al., 2011).

Oppervlaktewater

Over het algemeen wordt aangenomen dat in de zomer oppervlaktewater in de stad een verkoelend effect heeft op de aangrenzende omgeving. Dit is echter niet zonder meer het geval. Het verkoelend effect is te danken aan het feit dat een deel van de energie van de zon wordt geabsorbeerd en omgezet in verdamping van het water. Daarnaast vindt er opslag van zonne-energie plaats. Water heeft een grote warmtecapaciteit en kan de opgeslagen energie als warmte weer afstaan. De verkoelende werking van open water hangt dus sterk af van de watertemperatuur in vergelijking met de temperatuur van het aangrenzende gebied. Gedurende de zomer warmt het water geleidelijk aan op waardoor het verkoelend effect op de omgeving afneemt. Na zonsondergang kan dan de temperatuur zelfs hoger zijn dan de temperatuur in de aangrenzende bebouwde omgeving waardoor deze minder snel afkoelt (Figuur 1.15).

¹⁷ Groene daken, gevels en straatbomen vormen hier een uitzondering op.



Figuur 1.15 Variatie van de temperatuur van de lucht en van het water, gemeten in 2010 in de Westersingel in Rotterdam (Brolsma et al., 2011; Slingerland, 2012).

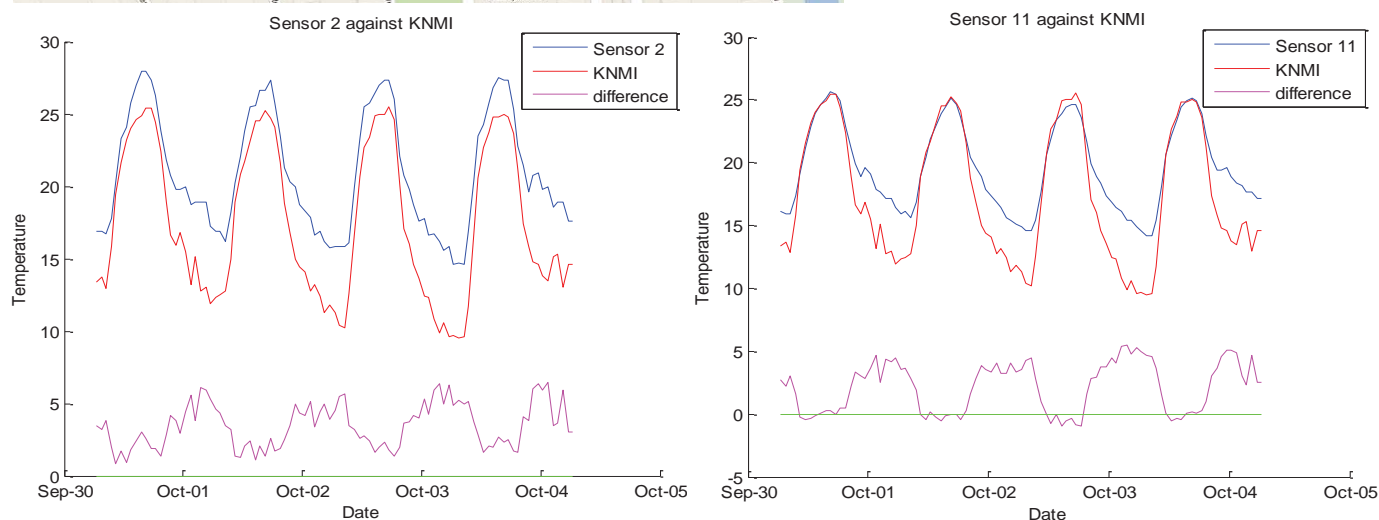
Steenefeld et al. (2014) geeft zelfs een zwakke positieve correlatie tussen UHI intensiteiten in Nederlandse steden en de fractie oppervlaktewater in die steden. Echter, grote wateroppervlakken vormen ook een oppervlak waarover de wind ongehinderd kan waaien. Overdag kan deze natuurlijke ventilatie een gunstige invloed hebben op het thermisch comfort gedurende warme dagen. De wijk 'Rijnhaven' kan als voorbeeld worden genomen voor de tegenstrijdige effecten van stedelijk oppervlaktewater. Voor deze locatie worden de hoogste UHI_{max} waarden gevonden door het verwarmend effect van het oppervlaktewater na zonsondergang. Overdag is de situatie evenwel anders: de relatief hogere windsnelheid zorgt ervoor dat het op zomerse dagen aangenamer is dan op de andere locaties in Rotterdam.

Het uiteindelijke effect van open water hangt dus sterk af van de dimensionering (oppervlakte, diepte), de ligging ten opzichte van de windrichting en de ligging ten opzichte van gebouwen en andere structuren in de omgeving. Dit 'complexe karakter' van water is ook een verklaring voor de afwezigheid van een duidelijke, sterke correlatie tussen luchttemperatuur en de fractie oppervlaktewater.

Zoals al eerder is opgemerkt, geven de bovenstaande analyses informatie over de invloed van 'gebiedsgemiddelde' eigenschappen op het niveau van een wijk. Daarbinnen (d.w.z. op de microschaal) kunnen de verschillen groot zijn. De resultaten van metingen uitgevoerd in een klein park in Rotterdam illustreren dit. Ze tonen aan dat op zomerse dagen (dagen met een maximum temperatuur tussen 25°C en 30°C) de gemiddelde luchttemperatuur in een park overdag wel tot 3 °C lager kan zijn dan buiten het park (**Figuur 1.16**; uit Slingerland, 2012). De luchttemperatuur is daarmee gelijk aan de temperatuur buiten de stad. Echter, de metingen geven ook aan dat dit 'Park Cool Island' effect slechts een beperkte invloed heeft op de luchttemperatuur in de aangrenzende bebouwde omgeving. Vergelijkbare resultaten zijn gevonden met de mobiele metingen (Heusinkveld et al., 2010).



Figuur 1.16 Temperatuurverloop aan de rand van een park (sensor 2) en in een park (sensor 11) in Rotterdam. Ook worden de verschillen in temperatuur tussen de sensoren en het KNMI weergegeven. KNMI is het meteorostation van vliegveld Zestienhoven aan de rand van Rotterdam (bron: Slingerland, 2012).



Stadsgeometrie

De ruimtelijke variatie in zowel oppervlaktetemperatuur als luchttemperatuur binnen Rotterdam blijkt gerelateerd te zijn aan lokale verschillen in gemiddelde hoogte van gebouwen en andere obstakels. Vooral voor de UHI_{max} is dit een sterk bepalende factor ($r^2 = 0.69-0.80$): bij een toename van de gebiedsgemiddelde hoogte met 1 m stijgt de mediaanwaarde met ca. 0.1 °C en de 95-percentielwaarde met ca. 0.2 °C.

De ruimtelijke variatie in oppervlaktetemperatuur blijkt ook gerelateerd te zijn met gebiedsgemiddelde 'Sky View Factor' (SVF) en oppervlakte albedo. Wijken in Rotterdam met een grotere gebiedsgemiddelde SVF en een grotere oppervlakte albedo hebben een lagere oppervlaktetemperatuur. Een verklaring hiervoor is dat bij een hogere SVF en een hogere oppervlakte albedo er minder zonnestraling wordt geabsorbeerd waardoor oppervlakken overdag minder opwarmen. Daarentegen vinden we voor de ruimtelijke variatie in luchttemperatuur binnen Rotterdam geen duidelijke relatie met deze parameters. Blijkbaar spelen na zonsondergang thermische eigenschappen van gebouwen in een gebied zoals 'thermal admittance' (het vermogen om warmte op te slaan en uit te stralen), een grotere rol. Bovendien zijn de verschillen in luchttemperatuur tussen de locaties minder groot dan die in oppervlaktetemperatuur wat een gevolg kan zijn van advectie (zijwaartse aanstroming van lucht).



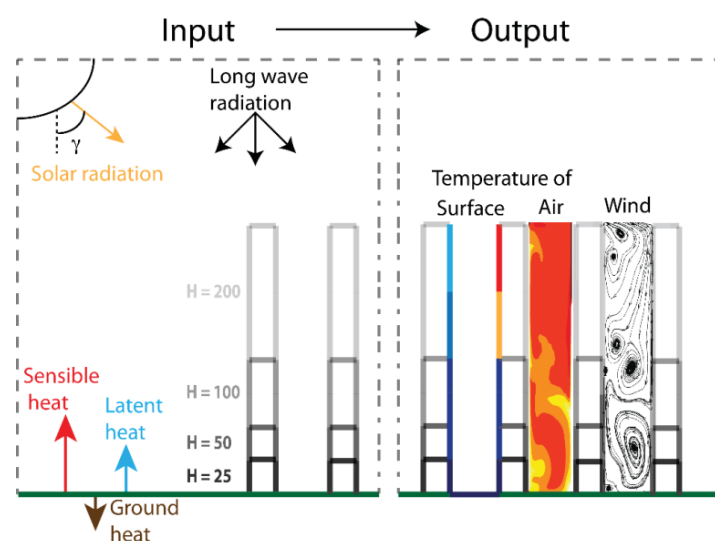
Urban Canyon Effect

Een belangrijk fenomeen op de microschaal is het zogenaamde ‘Urban Canyon’ effect. Onder een Urban Canyon verstaat men: een nauwe straat met aan weerszijden hoge gebouwen. Binnen CPC is een microklimaatmodel ontwikkeld dat het mogelijk maakt om processen in de Urban Canyon nauwkeuriger te analyseren. Het model combineert processen als stralingstransport (kortgolvig en langgolvig), warmteopslag in de grond en muren, verdamping door middel van een constante Bowen ratio en warmte transport door convectie (luchtstromingen) in de Urban Canyon (**Figuur 1.17**). Dit maakt het model uniek in vergelijking met andere modellen voor het microklimaat (Schrijvers et al., 2014).

Overdag kan men 2 tegengestelde effecten onderscheiden: Hoge gebouwen geven schaduw, met als gevolg dat straat- en muuroppervlakken in de Urban Canyon minder opwarmen. Echter, de modelsimulatie laat ook zien dat invallend zonlicht door ‘multireflectie’ zeer efficiënt wordt geabsorbeerd tussen hoge gebouwen. Er vindt dan een opwarming van straat- en muuroppervlakken in de Urban Canyon plaats. Na zonsondergang remmen de hoge gebouwen de thermische uitstraling van gebouwen naar de atmosfeer (‘long-wave trapping’) waardoor het in de Urban Canyon langer warm blijft.

Daarnaast toont de modelsimulatie aan dat ventilatie, ofwel warmtetransport door convectie, van groot belang is. De verhouding tussen gebouwhoogte en straatbreedte (H/W) is hierbij belangrijk. In modelsimulaties met (‘Weather and Research Forecasting’) WRF vinden Theeuwes et al. (2014) een optimum H/W ratio van ongeveer 1 (de gebouwen zijn even hoog zijn als de straat breed is). Hogere of lagere ratio’s hebben beide voor- en nadelen betreft ventilatie en schaduwwerking.

De beste ventilatie in de straat wordt bereikt bij een H/W verhouding van 0,5 of lager (de straat is (meer dan) 2 keer zo breed dan de gebouwen hoog zijn). Tot een hoogte-breedte verhouding van 1.0, vindt er nog menging van de lucht op straatniveau met de ‘canopy layer’ (luchtlaag boven de stad) plaats¹⁸. Bij hogere ratio’s (de gebouwen zijn hoger dan de straat breed is) wordt vooral het bovenste deel van de Urban Canopy gemengd. In dit geval ontstaat er een zeer stabiele lucht-situatie in het onderste deel van de canyon waar de windsnelheden zeer laag zijn en nauwelijks menging van de lucht plaatsvindt. Er is in deze situatie wel meer schaduw en er vindt dus minder opwarming van oppervlakken in de Urban Canopy plaats (al is het niet zo dat er bij een H/W verhouding van 1 of hoger helemaal geen opwarming door zonnestraling voorkomt) (Kleerekoper 2012).



Figuur 1.17 Schematische weergave van het ontwikkelde micro-schaal model. Aan de linkerkant de input, met onder meer gebouwen met bijbehorende parameters als hoogte-breedte verhouding, en materiaaleigenschappen zoals albedo en warmtecapaciteit. De verschillende fysische processen kunnen afzonderlijk aan- en uitgezet worden (ventilatie, kort/langgolvig stralingstransport etc.). Aan de rechterzijde de output, met oppervlakte temperatuur, luchttemperatuur en luchtstroming (Schrijvers et al., 2014).

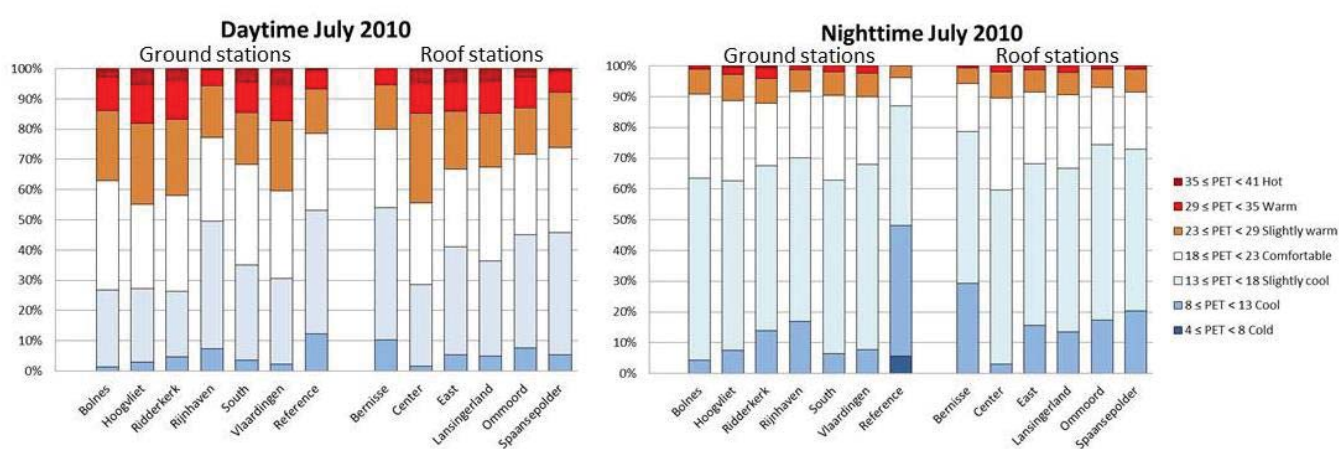
¹⁸ In Nederland zijn de meeste straten breder dan de gebouwen hoog zijn (ratio onder 1).



1.5.3 De variatie in thermisch comfort

De variatie in thermisch comfort in de Rotterdam agglomeratie is vastgesteld met behulp van de 'Physiologically Equivalent Temperature' (PET). De berekende PET waarden zijn vervolgens gerelateerd aan fysiologische stress en 'stress'-beleving of perceptie (**Bijlage C**).

Het aantal uren dat kan worden geclassificeerd als uren met matige tot sterke hittestress ($PET > 23^\circ$) is groter op de stadslocaties dan op de referentielocatie in het buitengebied (**Figuur 1.18**). Overschrijding van de drempelwaarde voor thermisch discomfort gebeurde bijna altijd overdag (157 uur op de stadslocaties en 93 uur op de referentielocatie, oftewel 21 en 12.5% van het totaal aantal uren in deze maand). De juli maanden in 2011 en 2012 waren koeler dan gemiddeld. Alhoewel het aantal uren met $PET > 23^\circ\text{C}$ veel minder was (32 uur in 2011 en 77 uur in 2012), zijn de gevonden relatieve verschillen tussen de locaties vergelijkbaar met die van 2010.



Figuur 1.18 Frequentieverdeling van de verschillende thermisch comfortklassen voor overdag en gedurende de nacht voor juli 2010 voor de verschillende locaties in de stad en voor de referentielocatie (bron: Van Hove et al., 2014).

Het groter aantal uren met verminderd thermisch comfort in de stedelijke gebieden kunnen we voornamelijk toeschrijven aan de lagere windsnelheden. De verschillen in luchttemperatuur tussen de stadslocaties en het buitengebied zijn overdag gering ($< 2^\circ\text{C}$) of zelfs negatief (bijvoorbeeld "Rijnhaven"). Bovendien hebben we gezien dat de directe straling van de zon op de stadslocaties gemiddeld minder is dan in het buitengebied. Hetzelfde geldt voor de luchtvochtigheid. De verschillen in straling en luchtvochtigheid hebben echter geen merkbaar effect op PET.

Ook de variatie in thermisch comfort binnen de agglomeratie blijkt grotendeels gerelateerd te zijn aan verschillen in windsnelheid. Zo is de windsnelheid op de 'Rijnhaven' locatie relatief hoog (ca. 80% van referentie) door de aanwezigheid van een groot oppervlak. Dit verklaart ook dat het aantal uren met verminderd thermisch comfort voor deze locatie relatief klein is. Omgekeerd kan het grote aantal overschrijdingsuren voor Ridderkerk worden verklaard met veel lagere windsnelheden op deze locatie.

De situatie verandert na zonsondergang wanneer het UHI effect een grotere rol speelt. De variatie in PET in het stedelijk gebied wordt dan voor een belangrijk deel bepaald lokale verschillen in temperatuur. Zoals we eerder hebben gezien, heeft Rijnhaven de hoogste maximale UHI waarden, terwijl voor de groene locatie Ridderkerk relatief lage waarden worden gevonden. Een belangrijke conclusie is dan ook dat een grotere UHI_{max} voor een bepaalde locatie niet automatisch minder thermisch discomfort overdag betekent.



1.5.4 De invloed van wijkeigenschappen op thermisch comfort

De ruimtelijke variatie in PET overdag wordt grotendeels bepaald door verschillen in gemiddelde windsnelheid tussen de locaties. Er kunnen geen duidelijke, directe relaties met landgebruik of geometrische factoren, zoals gebouwhoogte, worden afgeleid uit de metingen van het meetnet in Rotterdam. Wanneer de situatie verandert na zonsondergang en het UHI effect een meer prominente rol gaat spelen, is het thermisch comfort in de buitenruimte gerelateerd aan stadskenmerken die bepalend zijn voor het UHI effect.

Bij dit resultaat moeten echter een aantal kanttekening geplaatst worden:

- De PET waarden berekend voor de locaties in Rotterdam zijn gebiedsgemiddelde waarden. Zeer plaatselijk (op de microschaal) kunnen er grote verschillen in PET voorkomen. **Figuur 1.19** laat dit mooi zien voor een straat in de wijk Geitenkamp in Arnhem (Heusinkveld et al. 2012). In dezelfde straat zijn er verschillen van 15 graden in PET doordat de zuidelijke straatzijde in de schaduw is (bomen en huizen) en de noordzijde vol in de zon. Wind kan verkoelend werken maar op deze dag was wind geen significante term in de PET-reductie.
- PET is een van de vele thermische comfort indices die zijn ontwikkeld. De gevoeligheid van de verschillende indices voor meteorologische variabelen blijkt sterk te verschillen.
- PET wordt berekend op basis van fysische en fysiologische factoren. De laatste factoren zijn alleen voor een standaard persoon onderzocht. Vervolgens zijn de resultaten uit Duits onderzoek gebruikt om de berekende waarden te relateren aan 'stress'-beleving. Echter, deze relatie kan anders zijn voor Nederlandse burgers, voor Nederlandse weersomstandigheden. Bovendien is er geen rekening gehouden met psychologische factoren. Uit onderzoek van Klemm et al. (2014) blijkt dat deze sterk bepalend zijn voor hoe mensen werkelijk thermisch comfort in een omgeving beleven.



Figuur 1.19 Physiologically Equivalent Temperature (PET) en stralingsbelasting (mean radiant temperature, Tmrt) in de Doctor Schaepmanlaan en Rozendaalseweg in Arnhem. (bron: Heusinkveld et al., 2012).



Conclusies

Met betrekking tot de kwetsbaarheid van de bebouwde omgeving heeft het CPC-programma de volgende conclusies opgeleverd:

Hoe werkt het lokale klimaat in Nederlandse steden?

Temperatuur

- Elke stad of stadsdeel in Nederland heeft te maken met een stedelijk hitte-eiland effect (UHI) en er kunnen grote verschillen voorkomen in UHI op leefniveau binnen de stad;
- De UHI intensiteit van Nederlandse steden is aanzienlijk en vergelijkbaar met dat van andere Europese steden.;
- De UHI intensiteit is vooral na zonsondergang groot doordat het platteland veel sneller afkoelt dan de stad waar afkoeling pas aan het einde van de nacht plaatsvindt;
- De UHI intensiteit is in de zomermaanden en in het voorjaar het grootst en veel kleiner in de winter. Echter, ook op sommige winterdagen kunnen de nachtelijke verschillen in temperatuur tussen stad en platteland groot zijn. Dit laatste is veelal een kortdurend effect (< 1 dag);
- Het temperatuurverschil tussen stad en platteland is vooral op leefniveau groot; het UHI op grotere hoogte in de grenslaag boven de stad is gering;
- De ontwikkelingen aan het micro-schaalmodel geven aan dat de toegenomen absorptie van kortgolvlige zonnestraling door reflectie tussen hoge gebouwen de drijvende kracht is achter het UHI-effect; verdamping is in dit model voor dicht bebouwde hoogbouw omgevingen niet meegenomen.
- De warmteproductie door menselijke activiteiten levert een bijdrage aan het UHI. In en rond de grote steden Den Haag en Rotterdam zijn de antropogene emissies van warmte maximaal 20 W m^{-2} gedurende de nacht en ongeveer 70 W m^{-2} gedurende de dag.

Thermisch comfort

- Over het algemeen is het aantal dagen met hittestress in stedelijke gebieden groter dan op het platteland. In de komende decennia kunnen thermisch discomfort en hittestress een belangrijk 'issue' voor veel steden worden;
- Een grotere UHI_{max} voor een bepaalde locatie betekent niet altijd minder thermisch discomfort overdag. De waarde van UHI als een proxy of indicator voor thermisch comfort is dus beperkt;
- De ruimtelijke variatie in thermisch comfort overdag lijkt voornamelijk te worden bepaald door verschillen in gemiddelde windsnelheid tussen de locaties, terwijl de ruimtelijke variatie gedurende de nacht in belangrijke mate wordt bepaald door verschillen in maximum temperatuur.

Verdamping

- In de periode april tot en met september gaat 20-60% van de gemiddelde neerslag verloren door verdamping; dit zorgt voor een koelsnelheid van gemiddeld $20\text{-}25 \text{ W m}^{-2}$ per dag (d.i. 11-15% van de inkomende zonnestraling)
- Eerste ruwe schattingen voor Rotterdam laten zien dat de waterconsumptie van bomen slechts een gering effect heeft op de waterbalans; plaatselijk kan dit echter anders zijn.
- De geringe verdamping – deels door verharding van de stad, deels door vochttekort voor evapotranspiratie – zorgt ervoor dat de temperatuur van een stad verhoogd wordt. Hoe groot dit effect is, is nog onbekend. Het is ook nog niet duidelijk wat het effect van verdamping is op het thermisch comfort.



Wat is de invloed van stedelijke inrichting?

- De relatie tussen UHI en het inwoneraantal van een stad (als proxy voor de grootte van de stad) zoals gerapporteerd door Oke (1973), wordt niet bevestigd in ons onderzoek; andere factoren zoals populatiedichtheid en stad-/wijkeigenschappen, zijn waarschijnlijk meer bepalend zijn voor het UHI;
- De eigenschappen van een stad of wijk lijken ook meer bepalend voor de UHI te zijn dan geografische ligging;
- Zowel de oppervlaktetemperatuur overdag als maximum UHI intensiteit gedurende de nacht vertonen significante (lineaire) relaties met factoren voor het stedelijk landgebruik zoals de fractie bebouwd oppervlak, de fractie verhard oppervlak en de fractie groenoppervlak (zie **Tabel 1.4**).
- De oppervlaktetemperatuur overdag en maximum UHI intensiteit gedurende de nacht vertonen ook een significante relatie met de gemiddelde gebouwhoogte.
- Hoe langer de warmteperiode duurt, hoe minder snel een dichtbebouwde wijk 's nachts afkoelt. In een groene wijk treedt dit accumulerend effect minder op.
- Door transpiratie en schaduwwerking koelt stedelijk groen de omgeving. Daartoe moet dan wel voldoende water aanwezig zijn.
- Op zomerse dagen kan het in een klein park 3 °C koeler zijn dan in het aangrenzende bebouwde gebied. Echter, de invloed van het 'Park Cool Island' effect op de aangrenzende bebouwde omgeving is gering.
- De ratio tussen de gebouwhoogte en straatbreedte (H/W) vertoont een optimum bij H/W=1. Bij H/W <1 is er goede ventilatie, maar weinig schaduw, bij H/W >1 is er meer schaduw, maar vindt er bij de grond geen menging van de lucht meer plaats.
- Door de grote warmtecapaciteit van water, kan oppervlaktewater in de stad zowel een verkoelend als een verwarmend effect op de omgeving hebben. Zo neemt het verkoelend vermogen van oppervlaktewater in de zomermaanden af door een stijging van de watertemperatuur. Het uiteindelijke effect van open water hangt dan ook sterk af van de dimensionering (oppervlakte, diepte), de ligging ten opzichte van de windrichting en de ligging ten opzichte van gebouwen en andere structuren in de omgeving.

Tabel 1.4 Samenvattend overzicht van de invloed van wijkeigenschappen op het UHI_{max} (luchttemperatuur) (bron: Steeneveld et al., 2011)

| Factor | Effect of gemiddelde UHI_{max} zomermaanden |
|---------------------|--|
| Antropogene warmte | +0.5 °C gemiddeld over Rotterdam (38 W/m ²) +2.0 °C industriegebied (200 W/m ²) |
| Populatiedichtheid* | +0,1 °C tot +0.3 °C per 1000 inw toename/km ² |
| Bebouwd oppervlak | +0,4 °C tot +0.6 °C per 10% toename |
| Verhard oppervlak | +0,2 °C tot +0.4 °C per 10% toename |
| Stedelijk groen | -0,3 °C tot -0.6 °C per 10% toename |
| Open water | geen significatie correlatie |
| Sky View Factor | geen significatie correlatie |
| Albedo | geen significatie correlatie |
| Gebouwhoogte | +0.08-+0.19 °C per toename van 1 m |