

TNO-rapport**TNO-060-UT-2012-01117****De stedelijke hitte-eilanden van Nederland in
kaart gebracht met satellietbeelden**

Datum 18 september 2012

Auteur(s) Dr. Ir. E.J. Klok
Ir. S. Schaminée
Dr. Ing. J. Duyzer
Dr. Ir. G.J. Steeneveld (WUR)

Exemplaarnummer

Oplage

Aantal pagina's 28 (incl. bijlagen)

Aantal bijlagen 2

Opdrachtgever Stichting Kennis voor Klimaat
t.a.v. Prof. P. Vellinga
Daltonlaan 400
3584 BK Utrecht

Projectnaam Climate Proof Cities

Projectnummer 034.24083



Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

© 2012 TNO

Samenvatting

Omdat Nederland geen megasteden kent, zou men verwachten dat het aantal stedelijke hitte-eilanden gering is. Satellietbeelden van de oppervlaktetemperatuur in Nederland laten echter een ander beeld zien. Deze beelden, opgenomen tijdens een hittegolfperiode in 2006, laten zien dat bijna elke stad in Nederland te maken heeft met een hitte-eiland effect.

Het hitte-eiland effect voor de Nederlandse steden is zowel voor de situatie 's nachts als overdag in kaart gebracht op grond van twee NOAA-AVHRR beelden van de oppervlaktetemperatuur. Deze beelden zijn genomen tijdens de hittegolfperiode van 2006. Het verschil in de oppervlaktetemperatuur tussen stad en buitengebied is hierbij gedefinieerd als het oppervlakte hitte-eiland effect (of SHI – Surface Heat Island).

Overdag kan het oppervlakte hitte-eiland effect oplopen tot 9 °C, maar gemiddeld voor de 73 grootste steden in Nederland is het 2,9 °C. 's Nachts is het oppervlakte hitte-eiland effect, met een gemiddelde van 2,4 °C, lager dan overdag. Steden met veel bebouwing en verharding hebben over het algemeen te maken met een groter stedelijk hitte-eiland effect. Meer groen en minder verharding kunnen daarom worden gezien als maatregel om het stedelijk hitte-eiland effect te reduceren. Afname van de fractie verhard oppervlak in de stad met 10%, reduceert het oppervlakte hitte-eiland effect gemiddeld met 1,2 °C 's nachts en 2,0 °C overdag.

Er lijkt een relatie te zijn tussen de bodemsoort van de stad en het SHI. Het onderzoek liet zien dat steden gebouwd op zandgronden juist overdag een hoog SHI vertonen, terwijl steden gebouwd op klei en veen juist 's nachts een hoog SHI hebben. In een vervolgonderzoek zou deze relatie nauwkeuriger onderzocht kunnen worden.

De SHI resultaten zijn moeilijk vergelijkbaar met de meetresultaten van het atmosferische stedelijk hitte-eiland effect (UHI) gebaseerd op weeramateurmetingen voor een aantal plaatsen in Nederland uitgevoerd door Wageningen Universiteit. Dit heeft te maken met de verschillen in ruimtelijke schaal en tijd van beide resultaten. De gevonden UHI waarden zijn over het algemeen hoger dan de SHI waarden, maar wel van dezelfde orde grootte.

Dit onderzoekproject (wordt) werd uitgevoerd in het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat (www.kennisvoorklimaat.nl). Dit onderzoekprogramma wordt medegefinancierd door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	4
2	Werkwijze	5
2.1	Oppervlaktetemperaturen bepalen het oppervlakte hitte-eiland effect.....	5
2.2	Twee NOAA-AVHRR beelden brengen de oppervlaktetemperaturen van Nederland in kaart	6
2.3	Bewerking van NOAA-AVHRR beelden geeft een oppervlakte hitte-eiland kaart voor Nederland	8
3	Resultaten	10
3.1	Niet alleen de grootste steden hebben een hitte-eiland effect.	10
3.2	De bodemsoort lijkt van invloed te zijn op het SHI.	13
3.3	Steden met veel bebouwing en verharding zijn het warmst.	15
3.4	Het oppervlakte hitte-eiland is moeilijk vergelijkbaar met het atmosferisch hitte-eiland afgeleid uit weeramateurgegevens.	17
4	Conclusies en slotopmerkingen	20
5	Ondertekening	21
	Bijlage(n)	
	A Tabel met resultaten en kaart	
	B Effect of roof temperatures on the surface heat island of Rotterdam	

1 Inleiding

Omdat Nederland geen megasteden kent, zou je verwachten dat het aantal stedelijke hitte-eilanden gering is¹. Satellietbeelden van de oppervlaktetemperatuur laten echter een ander beeld zien. Deze beelden geven aan dat bijna elke stad in Nederland te maken heeft met een hitte-eiland effect.

Welke steden dit zijn, hoe groot het hitte-eiland effect is en hoe dit samenhangt met stedelijke eigenschappen zoals mate van verharding en bebouwing staat beschreven in dit onderzoeksrapport. Het onderzoek is uitgevoerd in het kader van het project Climate Proof Cities (CPC) – Werkpakket 1, dat onderdeel is van het onderzoeksprogramma Kennis voor Klimaat. Doel van dit onderzoek was om het stedelijke hitte-eiland effect van de Nederlandse steden en dorpen in kaart te brengen met behulp van thermisch infrarood satellietbeelden.

In eerder onderzoek² is met behulp van satellietdata het hitte-eiland effect van o.a. Rotterdam, Den Haag en Maastricht apart onderzocht. Dit is de eerste keer dat de stedelijke hitte-eilanden van Nederland in één keer in kaart worden gebracht gebruikmakend van satellietdata.

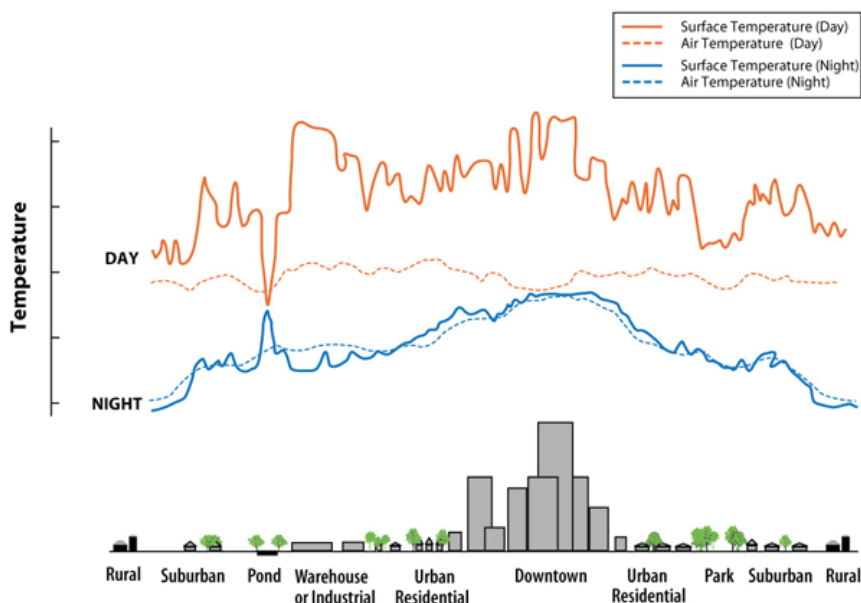
¹ In Hove et al. (2011), figuur 2, wordt dit verband geïllustreerd: Het UHI vertoont wereldwijd een sterk verband met populatiedichtheid. Exploring the Urban Heat Island Intesity of Dutch cities, assessment based on literature review, recent meteorological observations and datasets provided by hobby meteorologists, 2011, Hove et al. Alterra report 2170.

² Hoge temperaturen ten gevolge van het stedelijk hitte-eiland nu en in de toekomst: Een verkenning in de Noordelijke Stadsregio Rotterdam en het zuidelijk deel van Stadsgewest Haaglanden, 2011, Duyzer, J.H. Klok, E.J. Verhagen, H.L.M. TNO-034-UT-2011-00006.
Verhoging van de temperatuur ten gevolge van het hitte-eiland effect in Maastricht, 2011, Duyzer, J.H. Verhagen, H. Klok, E.J. TNO-060-UT-2011-01734;
Ruimtelijke verdeling en mogelijke oorzaken van het hitte-eiland effect, 2010, Klok, E.J. Broeke, H.M. ten Harmelen, A.K. van Verhagen, H.L.M. Kok, H.J.G. Zwart, S. TNO-034-UT-2010-01229.
Klok, L., Zwart, S., Verhagen, H. and Mauri, E. 2012. The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban characteristics. Resources, Conservation and Recycling, doi:10.1016/j.reconrec.2012.01.009.

2 Werkwijze

2.1 Oppervlaktetemperaturen bepalen het oppervlakte hitte-eiland effect

Thermisch infrarood satellietbeelden geven informatie over de oppervlaktetemperatuur: de temperatuur van het gras, de daken, wegen, gebouwen en vegetatie. Het voordeel van het gebruik van satellietbeelden voor de bepaling van het stedelijk hitte-eiland effect is dat een gebiedsdekkend inzicht wordt verkregen in de ruimtelijke variatie van de oppervlaktetemperatuur. Dit is een voordeel ten opzichte van het gebruik van temperatuurmetingen van weerstations, waarbij alleen op een aantal meetstations in en buiten de stad de temperatuur wordt gemeten. Het hitte-eiland effect, bepaald als het gemeten temperatuurverschil tussen stad en buitengebied is hierdoor alleen geldig voor een klein gebied nabij het weerstation. Uit gebiedsdekkende thermisch infraroodbeelden wordt duidelijk welke steden de hoogste oppervlaktetemperaturen kennen en welke daarom het gevoeligst zijn voor het hitte-eiland effect.



Figuur 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/index.htm>).

Meestal wordt de intensiteit van het stedelijk hitte-eiland beschreven als het verschil in de luchttemperatuur tussen stad en platteland: het atmosferisch stedelijke hitte-eiland. In het Engels is dit het *atmospheric urban heat island*. Er is echter ook een verschil in de oppervlaktetemperatuur tussen stad en omliggend platteland. Dit is het *surface heat island*, ofwel het oppervlakte hitte-eiland. In dit rapport wordt hiervoor de afkorting SHI gebruikt. Beide hitte-eilanden zijn weergegeven in Figuur 1. Het oppervlakte hitte-eiland is zowel 's nachts als overdag aanwezig, maar overdag is het SHI het sterkst door de instraling van de zon.

Het atmosferische stedelijke hitte-eiland manifesteert zich voornamelijk 's nachts, is minder sterk dan het oppervlakte hitte-eiland en vertoont een minder sterke ruimtelijke variatie³.

Het oppervlakte hitte-eiland effect verschilt dus van het atmosferisch hitte-eiland effect doordat oppervlakte- en luchttemperaturen van elkaar verschillen. Wel zijn oppervlakte- en luchttemperaturen aan elkaar gekoppeld door verschillende uitwisselingsprocessen van energie. Daardoor bepaalt de oppervlaktetemperatuur uiteindelijk in sterke mate de luchttemperatuur. Daarnaast is de oppervlaktetemperatuur een belangrijke term (via langgolvlige straling) in de bepaling van het thermisch comfort van de mens. Het thermisch comfort is van invloed op de menselijke gezondheid en welbevinden. Om die reden is de oppervlaktetemperatuur een goede indicator voor gebieden die gevoelig zijn voor hitte-problemen.

NB: Gebiedsgemiddelde oppervlaktetemperaturen afgeleid uit satellietbeelden bevatten naast een signaal van de oppervlaktetemperatuur van het landoppervlak, veelal ook een temperatuursignaal van gebouwen en daken. Zwarte, platte daken kunnen hoge temperaturen bereiken. Hierdoor kan de gebiedsgemiddelde oppervlaktetemperatuur geldig voor het landoppervlak en het SHI mogelijk overdag worden overschat. Uit een gedetailleerde studie voor de gemeente Rotterdam op basis van Landsat satellietbeelden bleek dat dit effect gering is op het schaalniveau van een stad, d.w.z. het schaalniveau van dit onderzoek. Uitsluiting van alle satellietpixels met daken zorgde voor een daling van het SHI in Rotterdam van 4,7 naar 4,1 °C. De verschillen worden wel groter wanneer er op wijkniveau wordt gekeken. De resultaten van dit onderzoek zijn als bijlage opgenomen (Bijlage II).

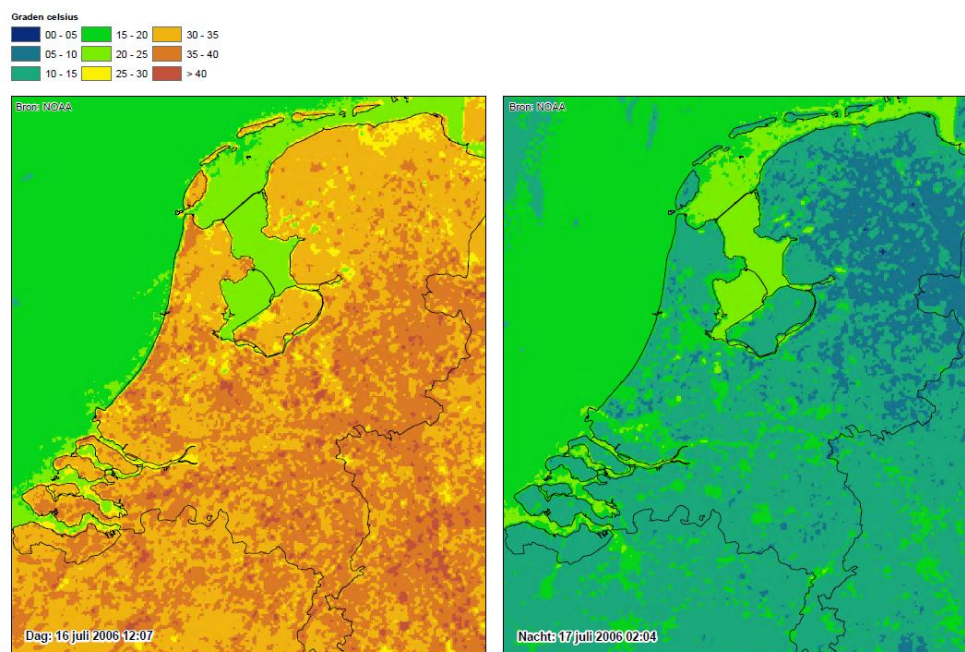
2.2 Twee NOAA-AVHRR beelden brengen de oppervlaktetemperaturen van Nederland in kaart

De infraroodbeelden die voor dit onderzoek zijn gebruikt zijn afkomstig van de Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) van de US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Deze beelden geven de oppervlaktetemperatuur voor Nederland en zijn beschikbaar gesteld door Instituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale in Triest, Italië. De ruimtelijke resolutie van de NOAA-AVHRR beelden varieert van 1,1 bij 1,1 km tot 4 bij 4 km aan de randen. Voor dit onderzoek zijn alle beelden omgerekend naar een resolutie van 1 bij 1 km. Ook zijn de satellietbeelden geometrisch gecorrigeerd naar het Nederlandse Rijksdriehoekstelsel. Door de variërende ruimtelijke resolutie is de nauwkeurigheid van de beelden niet op elke plek in Nederland gelijk. Aan de randen van Nederland, bijvoorbeeld in het zuiden van Limburg en langs de Waddenkust, is de onnauwkeurigheid het grootst.

NOAA-AVHRR beelden worden op verschillende momenten tijdens de dag genomen. Hierdoor kunnen zowel nacht- en dagsituaties worden onderzocht.

³ <http://www.epa.gov/heatisd/resources/compendium.htm>

In eerder onderzoek naar het oppervlakte hitte-eiland effect van Rotterdam is een reeks van 42 NOAA-AVHRR beelden geanalyseerd om de dagelijks variatie in het SHI te bestuderen⁴. Deze beelden waren genomen tijdens een warme onbewolkte periode, namelijk de tweede hittegolflperiode van 2006 (15 tot 30 juli). Uit deze reeks zijn twee beelden geselecteerd, 16 juli 2006 om 12:07 uur UTC (14:07 uur lokale tijd) en 17 juli 2006 om 2:04 uur (4:04 uur lokale tijd), om het oppervlakte hitte-eiland effect van de Nederlandse steden in kaart te brengen. Rond deze tijdstippen bereikte de gemiddelde oppervlaktetemperatuur in Rotterdam overdag een maximumwaarde en 's nachts een minimumwaarde⁴. Uit de geanalyseerde beelden bleek tegelijk dat het SHI op deze momenten overdag maximaal is en 's nachts minimaal.



Figuur 2 De NOAA-AVRR beelden die voor dit onderzoek zijn gebruikt tonen de oppervlaktetemperatuur voor Nederland een situatie overdag (links) en 's nachts (rechts).

De oppervlaktetemperaturen zoals afgeleid uit de satellietbeelden zijn in Figuur 2 weergegeven. Goed zichtbaar is dat de oppervlaktetemperaturen van zowel het IJsselmeer als van de Noordzee tijdens deze warme julidagen overdag en 's nachts hetzelfde zijn. Daarmee is de temperatuur van het IJsselmeer overdag lager dan van het landoppervlak en 's nachts hoger.

⁴ Ruimtelijke verdeling en mogelijke oorzaken van het hitte-eiland effect, 2010, Klok, E.J. Broeke, H.M. ten Harmelen, A.K. van Verhagen, H.L.M. Kok, H.J.G. Zwart, S.TNO-034-UT-2010-01229; Klok, L., Zwart, S., Verhagen, H. and Mauri, E. 2012. The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban characteristics. Resources, Conservation and Recycling, doi:10.1016/j.reconrec.2012.01.009

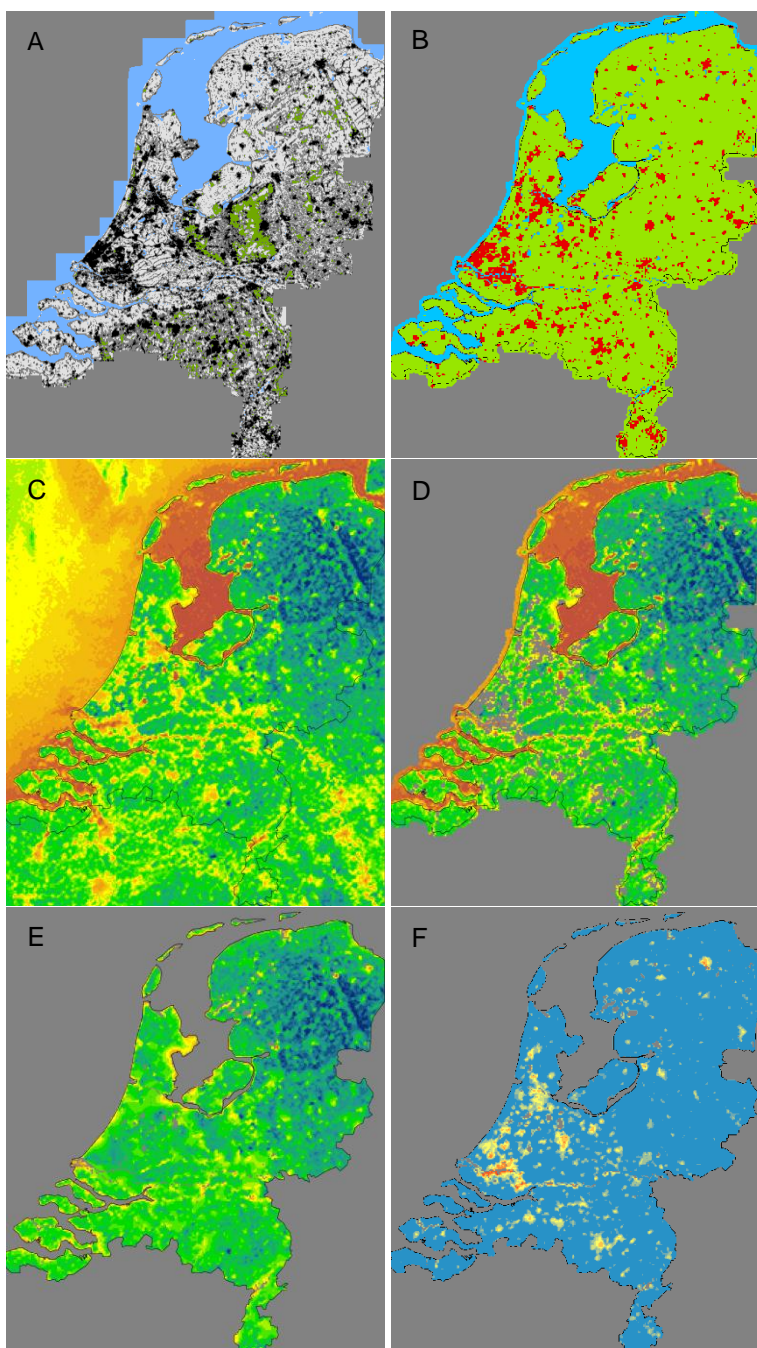
Ook kleinere meren, bijvoorbeeld in Friesland, en grote rivieren zijn te herkennen als relatief koele oppervlakken overdag en warme oppervlakken 's nachts. Op sommige plekken lichten de steden op als warme gebieden (Leeuwarden, Groningen, Utrecht, enz.), maar doordat de verschillen met de oppervlaktetemperatuur van het buitengebied soms klein zijn, is het stedelijk hitte-eiland effect niet overal goed zichtbaar.

2.3 Bewerking van NOAA-AVHRR beelden geeft een oppervlakte hitte-eiland kaart voor Nederland

De kaart met de hitte-eilanden in Nederland toont in wezen het verschil tussen de oppervlaktemperatuur van het verstedelijkte gebied en de oppervlaktetemperatuur van hetzelfde gebied als er geen verstedelijking zou zijn geweest. De werkwijze wordt stapsgewijs uitgelegd aan de hand van Figuur 3.

Op grond van TOP10NL data (een digitaal topografisch bestand) van heel Nederland (Figuur 3A), is voor elke NOAA-AVHRR gridcel van 1 bij 1 km bepaald welk van de drie landgebruikstypen water (blauw), stedelijk gebied (rood) en niet-stedelijk gebied (groen) de overhand heeft (Figuur 3B).

Vervolgens is het NOAA-AVHRR beeld genomen (Figuur 3C) en zijn de rode (stedelijke) gridcellen verwijderd (Figuur 3D). Daarna zijn voor deze cellen de oppervlaktetemperaturen opnieuw bepaald door middel van natural neighbour interpolatie van de oppervlaktetemperaturen van de omliggende niet-stedelijke (groene) cellen (Figuur 3E). De gridcellen met water zijn bij deze interpolatie weggelaten. De kaart met de stedelijke hitte-eilanden (Figuur 3F) is vervolgens het verschil tussen de geïnterpoleerde oppervlaktetemperatuurkaart (Figuur 3E) en de originele oppervlaktetemperatuurkaart (Figuur 3C).

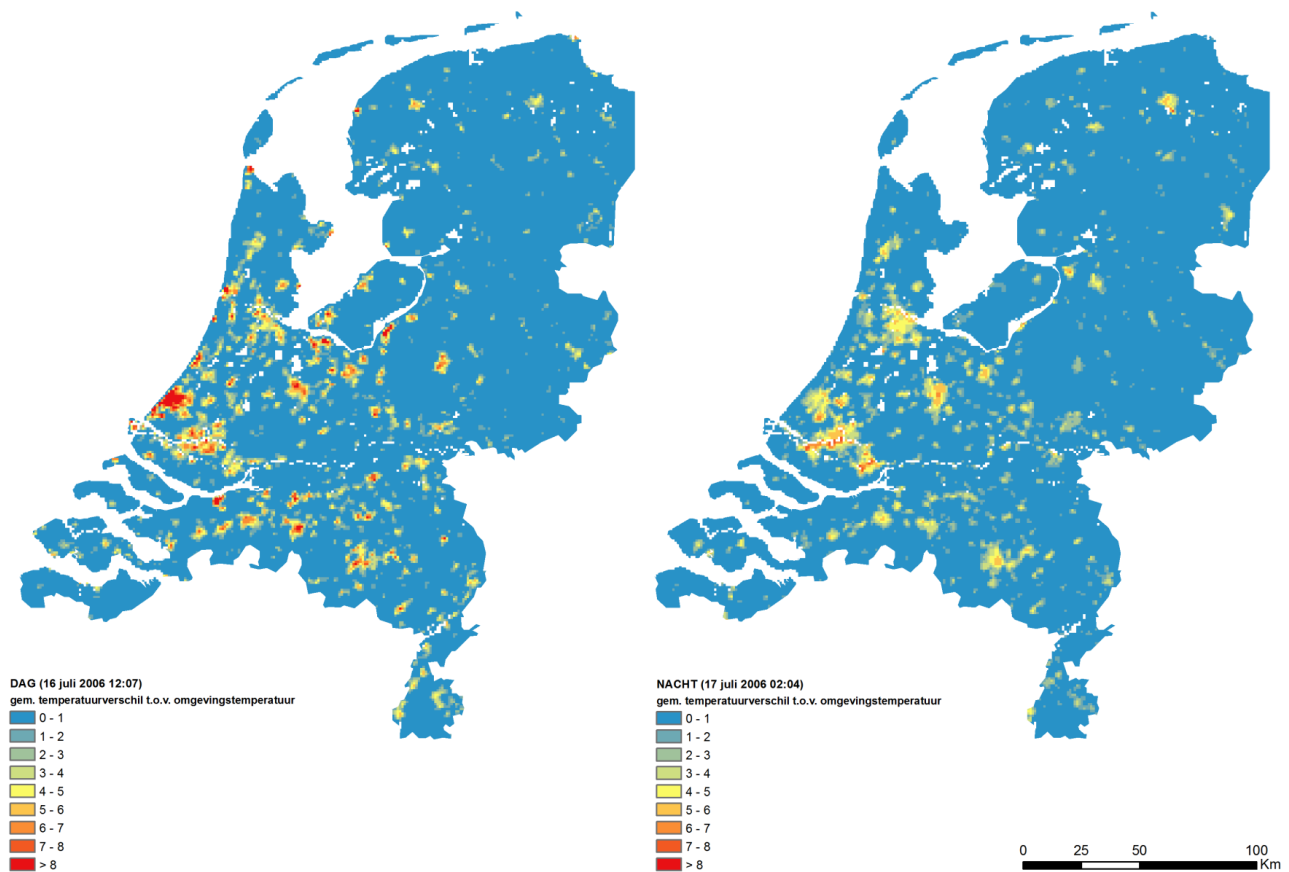


Figuur 3 Werkwijze voor de totstandkoming van de hitte-eiland kaarten (zie tekst). 3A: TOP10NL data van heel Nederland, 3B: Overheersende landgebruikstype voor elke NOAA-AVHRR gridcel: water (blauw), stedelijk gebied (rood) en niet-stedelijk gebied (groen), 3C: NOAA-AVHRR beeld met oppervlaktetemperaturen (de kleurenschaal is hierin anders genomen dan in Figuur 2), 3D: NOAA-AVHRR beeld waarbij de stedelijke gridcellen zijn verwijderd, 3E: NOAA-beeld waarbij de oppervlaktetemperaturen van de stedelijke cellen opnieuw bepaald zijn door interpolatie van de omliggende niet-stedelijke cellen, 3F: kaart met de stedelijke hitte-eilanden: het verschil (E) en (C).

3 Resultaten

3.1 Niet alleen de grootste steden hebben een hitte-eiland effect.

De kaarten met de stedelijke hitte-eilanden in Nederland (Figuur 4) laten zien dat niet alleen de grote steden in de randstad een duidelijk oppervlakte hitte-eiland effect vertonen. Ook kleinere steden en plaatsen zijn zichtbaar. Overdag zijn de hitte-eilanden sterker dan 's nachts. Dit heeft te maken met de zon die het aardoppervlak opwarmt en de verschillende thermische eigenschappen van het oppervlak, in dit geval dus stad en platteland. Hierdoor warmt het ene oppervlak meer op dan het andere en worden de temperatuurverschillen tussen de verschillende oppervlakken groter.



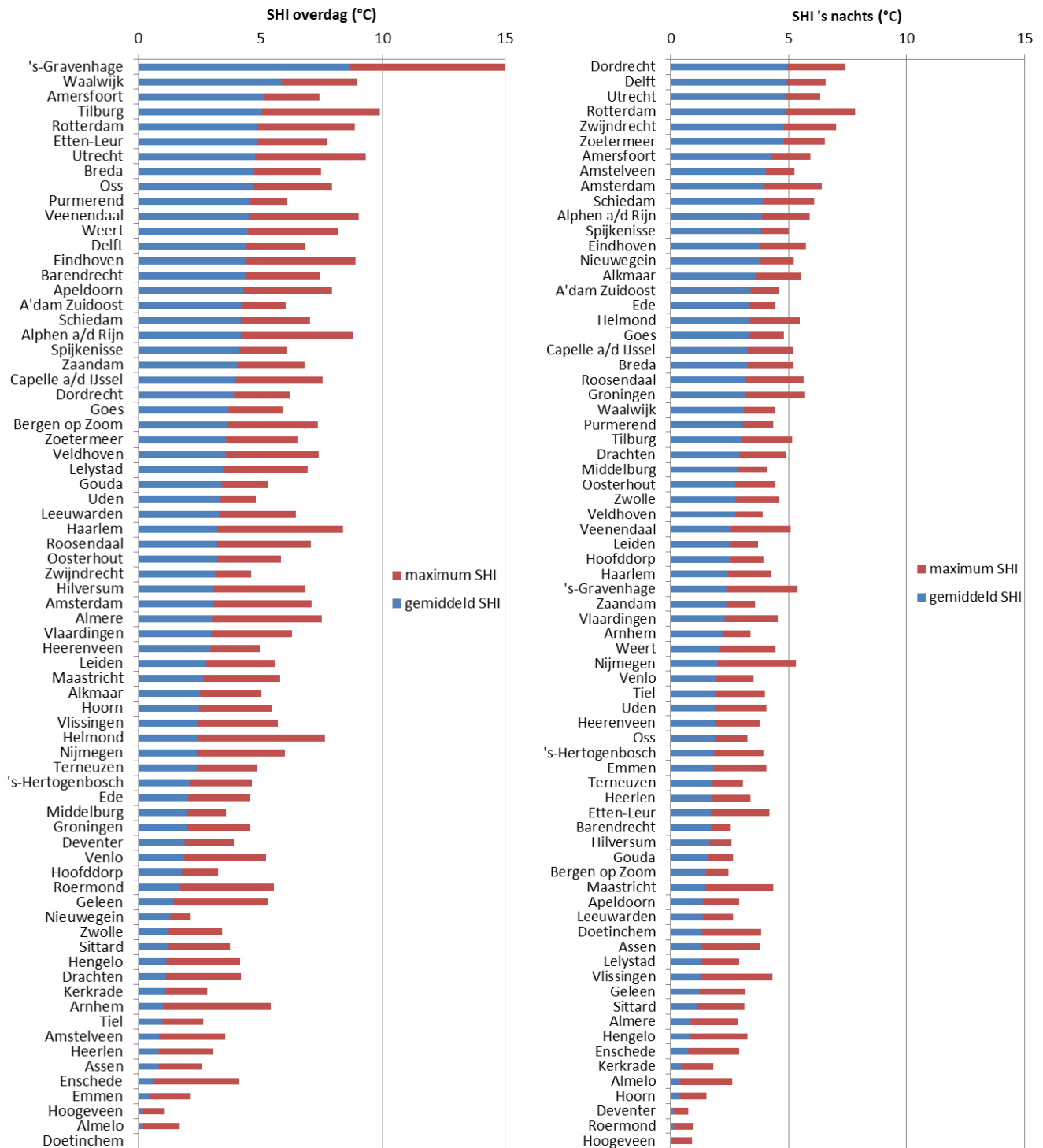
Figuur 4 Kaart met stedelijke hitte-eilanden (SHI) voor de situatie overdag (links) en 's nachts (rechts) afgeleid uit NOAA-AVHRR oppervlaktetemperaturen.

Het gemiddelde hitte-eiland effect is voor de 73 grootste plaatsen in Nederland weergegeven in Figuur 5. (De resultaten zijn ook opgenomen in Bijlage I, evenals een grote versie van de kaarten in Figuur 4.)

Dit zijn de plaatsen waarvoor een hitte-eiland effect bepaald kon worden op grond van 10 of meer NOAA-AVHRR gridcellen. Het gemiddelde hitte-eiland effect voor deze 73 plaatsen is 2,9 °C overdag en 2,4 °C 's nachts.

Overdag springt Den Haag eruit met een gemiddeld SHI van 8,6 °C en een maximum van 15,4 °C. Enerzijds heeft dit te maken met de hoge mate van verharding en met de relatief geringe hoeveelheid groen in deze stad (zie ook paragraaf 3.3). Anderzijds zijn de nabijgelegen duinen en de zandige ondergrond van Den Haag mogelijk van invloed (zie ook paragraaf 3.2). Zandgronden kunnen overdag hoge oppervlaktetemperaturen bereiken. Gridcellen die in de analyse als stedelijk zijn bepaald en aan de rand van de stad liggen, kunnen deels overlappen met het duinengebied. Hierdoor zullen zij bijdragen aan een verhoging van de gemiddelde oppervlaktetemperatuur.

's Nachts zijn het vooral Dordrecht, Delft, Utrecht en Rotterdam met het grootste oppervlakte hitte-eiland effect (gemiddeld 4,9 °C). Voor een stad als Rotterdam zou dit deels verklaard kunnen worden door de hoge gebouwen. Hierdoor wordt 's nachts de afgegeven warmte tussen de gebouwen weerkaatst en kan de stad haar warmte slecht afstaan aan de atmosfeer, waardoor de oppervlaktetemperatuur hoog blijft. Aan de andere kant is er voor deze steden het effect van het water. Veel pixels waarop de gemiddelde oppervlaktetemperatuur zijn gebaseerd bevatten wateroppervlakken: grachten, kanalen, rivieren. Deze oppervlakken konden niet geheel weggelaten worden uit de analyse. Omdat het water 's nachts warmer is dan het landoppervlak, zullen de NOAA-AVHRR gridcellen waarin water aanwezig is relatief hoge oppervlaktetemperaturen hebben. Hierdoor is het mogelijk dat voor deze steden een overschatting van het oppervlakte hitte-eiland effect is ontstaan. Verder valt het op dat al deze steden op klei- of veengronden zijn gebouwd. Dit wordt verder besproken in paragraaf 3.2.



Figuur 5 Het gemiddelde oppervlakte hitte-eiland effect (SHI) voor de 73 grootste plaatsen in Nederland, overdag (links) en 's nachts (rechts), gerangschikt van hoog naar laag. Ook is voor elke plaats de gridcelwaarde met de maximum SHI waarde weergegeven.

3.2 De bodemsoort lijkt van invloed te zijn op het SHI.

Wanneer we nauwkeuriger naar Figuur 5 kijken, lijken steden die op zandgronden zijn gebouwd juist overdag een hoog SHI te vertonen. Steden gebouwd op bodemsoorten zoals klei en veen hebben juist 's nachts een hoog SHI. Dit zou kunnen worden verklaard door de warmtecapaciteit en het warmtegeleidingsvermogen van deze bodemsoort, die in sterke mate de energiehuishouding van de bodem en de oppervlaktetemperatuur bepalen. Daarbij spelen natuurlijk ook de vochtigheid van de bodem en de grondwaterstand een rol. Droge gronden koelen tijdens een heldere nacht aanzienlijk sterker af dan natte gronden, en warmen overdag ook sneller op.

Figuur 6 brengt het verband tussen het SHI en de bodemsoort beter in beeld. De steden zijn op grond van hun SHI 's nachts en overdag gerangschikt van hoog naar laag, waarbij de kleur de overheersende bodemsoort voor elke stad weergeeft. De overheersende bodemsoort is bepaald op grond van de Grondsoortenkaart (Alterra, 2006), voor alleen het stedelijk gebied, d.w.z. de rode cellen in Figuur 3B. Voor 53% van de 15 steden met het grootste oppervlakte hitte-eiland effect overdag geldt inderdaad dat zij gebouwd zijn op zandgronden. Voor de situatie 's nachts geldt dat 66% van de top 15 steden met het grootste oppervlakte hitte-eiland effect op kleigronden is gebouwd.

SHI overdag		SHI 's nachts		
's-Gravenhage	8,6	Dordrecht	5,0	Zware klei
Waalwijk	5,9	Delft	4,9	Lichte klei
Amersfoort	5,2	Utrecht	4,9	Zand
Tilburg	5,1	Rotterdam	4,9	Veen
Rotterdam	4,9	Zwijndrecht	4,8	Zware zavel
Etten-Leur	4,8	Zoetermeer	4,8	Lichte zavel
Utrecht	4,8	Amersfoort	4,3	Leem
Breda	4,7	Amstelveen	4,0	Moerig op zand
Oss	4,7	Amsterdam	3,9	
Purmerend	4,6	Schiedam	3,9	
Veenendaal	4,5	Alphen aan den Rijn	3,9	
Weert	4,5	Spijkenisse	3,8	
Delft	4,4	Eindhoven	3,8	
Eindhoven	4,4	Nieuwegein	3,8	
Barendrecht	4,4	Alkmaar	3,6	
Apeldoorn	4,3	Amsterdam Zuidoost	3,4	
Amsterdam Zuidoost	4,3	Ede	3,4	
Schiedam	4,2	Helmond	3,4	
Alphen aan den Rijn	4,2	Goes	3,3	
Spijkenisse	4,1	Capelle aan den IJssel	3,3	
Zaandam	4,0	Breda	3,3	
Capelle aan den IJssel	4,0	Roosendaal	3,2	
Dordrecht	3,9	Groningen	3,2	
Goes	3,7	Waalwijk	3,1	
Bergen op Zoom	3,6	Purmerend	3,1	
Zoetermeer	3,6	Tilburg	3,0	
Veldhoven	3,6	Drachten	2,9	
Lelystad	3,4	Middelburg	2,8	
Gouda	3,4	Oosterhout	2,7	

Uden	3,4	Zwolle	2,7
Leeuwarden	3,3	Veldhoven	2,7
Haarlem	3,2	Veenendaal	2,6
Roosendaal	3,2	Leiden	2,5
Oosterhout	3,2	Hoofddorp	2,5
Zwijndrecht	3,1	Haarlem	2,4
Hilversum	3,0	's-Gravenhage	2,4
Amsterdam	3,0	Zaandam	2,4
Almere	3,0	Vlaardingen	2,3
Vlaardingen	3,0	Arnhem	2,2
Heerenveen	2,9	Weert	2,1
Leiden	2,8	Nijmegen	2,0
Maastricht	2,7	Venlo	2,0
Alkmaar	2,5	Tiel	1,9
Hoorn	2,5	Uden	1,9
Vlissingen	2	Heerenveen	1,9
Helmond	2,4	Oss	1,9
Nijmegen	2,4	's-Hertogenbosch	1,8
Terneuzen	2,4	Emmen	1,8
's-Hertogenbosch	2,1	Terneuzen	1,8
Ede	2,0	Heerlen	1,7
Middelburg	2,0	Etten-Leur	1,7
Groningen	2,0	Barendrecht	1,7
Deventer	1,9	Hilversum	1,7
Venlo	1,9	Gouda	1,6
Hoofddorp	1,8	Bergen op Zoom	1,5
Roermond	1,7	Maastricht	1,5
Geleen	1,4	Apeldoorn	1,4
Nieuwegein	1,3	Leeuwarden	1,4
Zwolle	1,2	Doetinchem	1,3
Sittard	1,2	Assen	1,3
Hengelo	1,1	Lelystad	1,3
Drachten	1,1	Vlissingen	1,3
Kerkrade	1,1	Geleen	1,2
Arnhem	1,0	Sittard	1,1
Tiel	1,0	Almere	0,8
Amstelveen	0,9	Hengelo	0,8
Heerlen	0,8	Enschede	0,8
Assen	0,8	Kerkrade	0,5
Enschede	0,6	Almelo	0,4
Emmen	0,5	Hoorn	0,4
Hoogeveen	0,2	Deventer	0,2
Almelo	0,2	Roermond	0,1
Doetinchem	0,0	Hoogeveen	0,1

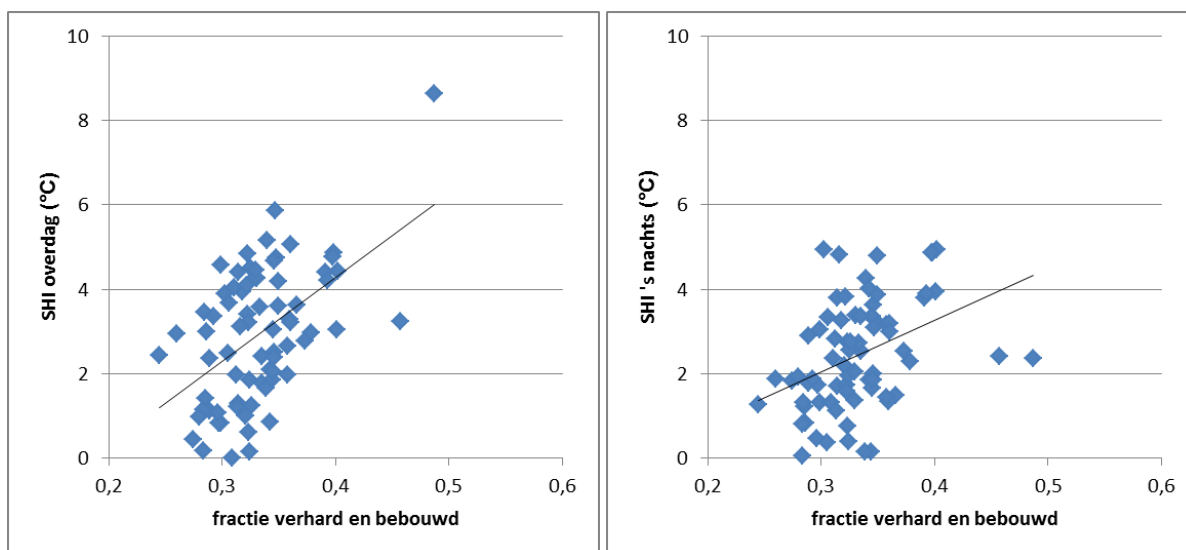
Figuur 6 Relatie tussen grondsoort van de stad en SHI. De steden zijn op grond van hun SHI 's nachts en overdag gerangschikt van hoog naar laag, waarbij de kleur de overheersende bodemsoort aangeeft voor elke stad.

Daarnaast heeft de bodemsoort van het buitengebied natuurlijk ook invloed op de oppervlaktetemperatuur van het gebied buiten de stad en daarmee de referentietemperatuur ten opzicht waarvan het hitte-eiland effect wordt bepaald.

Droge zandgronden in het buitengebied, denk aan stuifzanden of duingebieden, zullen overdag hogere oppervlaktetemperaturen hebben ten opzichte van natte kleigronden. Dit kan resulteren in een lager oppervlakte hitte-eiland effect voor steden met een dergelijke omgeving dan voor een stad gebouwd tussen de natte weilanden op kleigronden. Hoe dit precies van invloed is op de SHI waarden die gevonden zijn in deze studie is niet onderzocht. Dit zou in een vervolgonderzoek verder geanalyseerd kunnen worden.

3.3 Steden met veel bebouwing en verharding zijn het warmst.

In het kader van mitigatiemaatregelen is het interessant het SHI van de steden in Nederland in verband te brengen met hun stedelijke kenmerken. Eén van de belangrijkste kenmerken daarbij is de mate van verharding en bebouwing. Hoe meer verharding in de vorm van wegen, parkeerterreinen en bebouwing, hoe versteender het gebied. Verharde en versteende gebieden hebben over het algemeen hogere oppervlaktetemperaturen dan waterdoorlatende, natuurlijke oppervlakken.



Figuur 7 Het gemiddelde oppervlakte hitte-eiland effect (SHI) voor de 73 grootste plaatsen in Nederland, overdag (links) en 's nachts (rechts), neemt toe bij een hogere mate van verharding en bebouwing.

In Figuur 7 zijn de SHI waarden van de 73 grootste plaatsen uitgezet tegen de fractie verharding en bebouwing voor het stedelijk gebied van elke plaats. De informatie over verharde oppervlakken en bebouwing zijn afgeleid uit TOP10NL data. Het positieve verband tussen de fractie verharding/bebouwing en het SHI is aanwezig en is ook significant, alhoewel de Pearson correlatie laag is (zie Tabel 1).

De stad met verreweg de hoogste fractie verhard en bebouwd oppervlak (0,49) is Den Haag, waardoor ook het hoge SHI overdag kan worden verklaard. Deze uitschieter is duidelijk zichtbaar in Figuur 7. 's Nachts vertoont Den Haag een SHI dat overeenkomt met de gemiddelde waarde.

Een andere uitschieter wat betreft fractie verhard en bebouwd is Haarlem met een waarde van 0,46. Echter, het SHI van Haarlem is zowel overdag als 's nachts vergelijkbaar met het gemiddelde van alle steden. Dus veel verharding leidt niet voor alle steden tot een hoog SHI. Overigens leidt het weglaten van deze twee uitschieters uit de regressie-analyse overdag niet tot andere conclusies. De Pearson correlatie (r) neemt af naar 0,43, maar de regressiecoëfficiënt blijft nagenoeg ongewijzigd (18,2 °C en een p-waarde van 5,1E-4).

Uit de gevonden regressie-analyse wordt duidelijk dat minder verharding kan worden gezien als maatregel om het hitte-eiland effect te reduceren. Afname van de fractie verhard oppervlak met 10%, resulterend in een toename van groene en waterdoorlatende oppervlakken met 10%, reduceert het oppervlakte hitte-eiland effect gemiddeld met 2,0 °C overdag en 1,2 °C 's nachts. Dit verband is overigens niet één op één door te vertalen naar het effect van groen op straatniveau. Het effect van bijvoorbeeld meer bomen in een straat zal over het algemeen wel tot een verlaging van de oppervlaktetemperatuur leiden, maar een precieze kwantificering van het effect zou op grond van hogere detailmetingen of modelberekeningen bepaald moeten worden.

Uit de regressie-analyse (Tabel 1) wordt ook duidelijk dat er significant en positief verband bestaat tussen het wateroppervlak in de stad en het SHI 's nachts. Een toename van 10% in wateroppervlak verhoogt het oppervlakte hitte-eiland met gemiddeld 1,3 °C. Dit verklaart deels de hoge SHI waarden voor de steden Rotterdam en Dordrecht beschreven in paragraaf 3.1. Water werkt op dit schaalniveau dus niet als verkoelende maatregel, maar leidt tot hogere SHI waarden, omdat het wateroppervlak 's nachts warmer blijft dan het landoppervlak. Voor de situatie overdag blijkt er geen significant verband te bestaan tussen water en SHI.

Tabel 1 Relatie tussen **fractie** bebouwd en verhard oppervlak en de SHI, en **fractie** wateroppervlak en SHI. Weergegeven zijn de Pearson correlatie (r), de regressiecoëfficiënt (met standaard fout) en de p-waarde.

	range van waarden	SHI overdag			SHI 's nachts		
		r	regressie coëfficiënt (°C)	p-waarde	r	regressie coëfficiënt (°C)	p-waarde
bebouwd/ verhard water	0,24 – 0,49	0,52	19,8 (3,9)	3,2E-6	0,40	12,2 (3,4)	5,3E-4
	0,0 – 0,15	0,12	5,3 (5,3)	0,31	0,35	12,8 (4,0)	2,1E-3

3.4 Het oppervlakte hitte-eiland is moeilijk vergelijkbaar met het atmosferisch hitte-eiland afgeleid uit weeramateurgegevens.

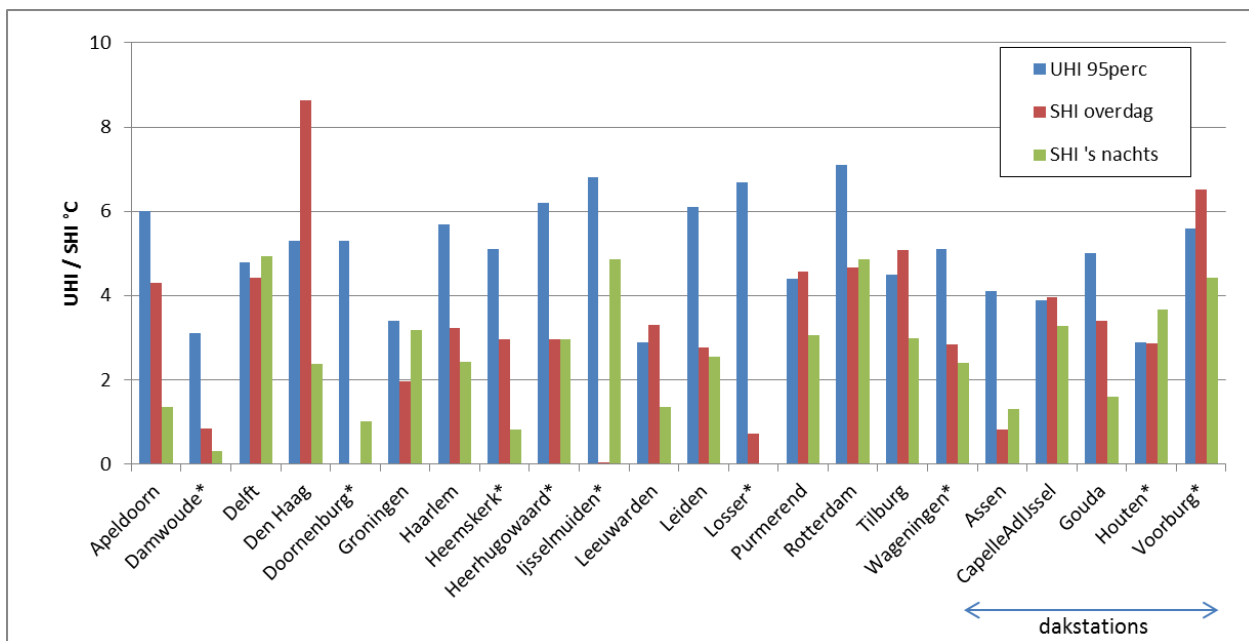
In eerder Kennis voor Klimaat onderzoek is door Steeneveld et al. (2011)⁵ van Wageningen Universiteit het atmosferische stedelijk hitte-eiland effect van een aantal plaatsen in Nederland onderzocht aan de hand van waarnemingen van weeramateurs. Doel van dit onderzoek was een indruk te krijgen het stedelijk hitte-eiland effect in Nederland. Met hetzelfde doel is in deze studie het oppervlakte hitte-eiland effect van de Nederlandse steden bepaald. Om die reden is het interessant om de resultaten van de beide studies te vergelijken.

Figuur 8 geeft voor de 22 plaatsen waarvoor Steeneveld et al. (2011) het atmosferisch UHI heeft afgeleid het UHI 95-percentiel. Dit is het 95-percentiel (UHI 95perc) van het dagelijkse maximale temperatuurverschil tussen de stad en het buitengebied. Hiervoor zijn de stations van de weeramateurs in de steden gekoppeld aan de dichtstbijzijnde KNMI-stations in het buitengebied. Daarnaast zijn de SHI waarden die zijn afgeleid uit de NOAA-AVHRR satellietbeelden voor zowel overdag als 's nachts weergegeven. De SHI waarden zijn ook in een scatterplot uitgezet tegen de UHI waarden (Figuur 9).

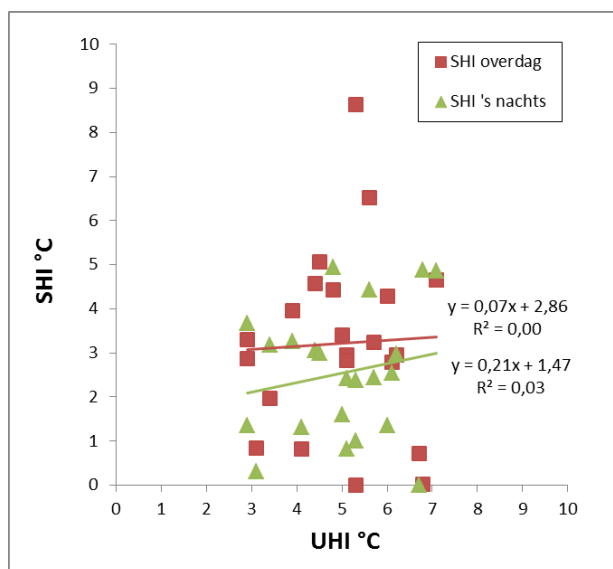
Beide figuren laten zien dat er weinig verband is tussen de UHI en de SHI waarden. De UHI is over het algemeen hoger dan de SHI. Gemiddeld over alle plaatsen is het UHI 95perc 5,0 °C, de SHI overdag 3,4 °C en de SHI 's nacht 2,7 °C. De order grootte van de UHI en SHI waarden komen wel overeen.

De dataset lijkt te beperkt om heldere conclusies te kunnen trekken over het verband tussen SHI en UHI. Hierbij speelt onder andere dat voor 9 van de 22 plaatsen de SHI is vastgesteld is op grond van minder dan 10 satellietpixels. Voor die plaatsen is de onzekerheid in de SHI waarden groter. Ook speelt mee dat de SHI resultaten zijn afgeleid uit één satellietbeeld voor een dag en een nacht in 2006. Het UHI 95perc is bepaald uit weeramateurmetingen van meerdere jaren.

⁵ Steeneveld, G.J., S. Koopmans, B.G. Heusinkveld, L.W.A. van Hove, and A.A.M. Holtslag, 2011: Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in The Netherlands, *J. Geophys. Res.*, 116, D20129, doi:10.1029/2011JD015988.



Figuur 8 Het 95-percentiel van het dagelijkse maximale verschil in luchttemperatuur tussen stad en platteland (UHI 95perc) gebaseerd op weeramateurgegevens (Steenefeld et al., 2011) en het SHI overdag en 's nachts voor een aantal plaatsen in Nederland. *Plaatsen waarvan het SHI bepaald is op grond van minder dan 10 satellietpixels.



Figuur 9 Het SHI overdag en 's nachts voor een aantal plaatsen in Nederland uitgezet tegen het 95-percentiel van het dagelijkse maximale verschil in luchttemperatuur tussen stad en platteland (UHI 95perc) gebaseerd op weeramateurgegevens (Steenefeld et al., 2011) .

Daarnaast wordt de vergelijking bemoeilijkt doordat het UHI 95perc gebaseerd is op metingen van één weeramateurstation in elke plaats, terwijl het SHI een gebiedsgemiddelde is van elke plaats. Binnen elke plaats kan er een redelijke variabiliteit in het UHI zijn. Dit blijkt onder andere uit bakfietsmetingen in Rotterdam⁶ en Arnhem. De UHI metingen hebben hierdoor een sterk lokaal karakter, en zijn waarschijnlijk niet altijd representatief voor een groter gebied. Toch lijkt het erop dat de UHI waarden van de dakstations redelijk overeenkomen met de SHI waarden. Dat zou verklaard kunnen worden doordat het oppervlak wat met de satelliet wordt gezien karakteristieken vertoont met wat de dakstations ook meten. De footprint van UHI metingen van de dakstations is groter dan in de straat en lijkt daarom meer op die van de satelliet.

Kortom, de SHI resultaten zijn moeilijk vergelijkbaar met de metingen van het atmosferische stedelijk hitte-eiland effect dat is uitgevoerd op basis van weeramateurmetingen. Dit heeft te maken met de verschillen in ruimtelijke schaal en tijd van beide metingen. De UHI waarden zijn over het algemeen hoger dan de SHI waarden, maar liggen wel in dezelfde range.

⁶ Heusinkveld, B., L.W.A. van Hove en C. Jacobs (2011). Ruimtelijke analyse van het stadsklimaat in Rotterdam. WUR-publicatie, 21 blz.

4 Conclusies en slotopmerkingen

In dit rapport is het hitte-eiland effect voor de Nederlandse steden voor zowel de situatie 's nachts als overdag in kaart gebracht op grond van twee NOAA-AVHRR satellietbeelden van de oppervlaktetemperatuur. Het verschil in de oppervlaktetemperatuur tussen stad en buitengebied is hierbij gedefinieerd als het oppervlakte hitte-eiland effect (SHI – Surface Heat Island). De verkregen kaarten van Nederland met oppervlakte hitte-eilanden kunnen worden gebruikt om een eerste indruk te krijgen van de grootte van het stedelijk hitte-eiland effect voor elke plaats. Hierbij geldt dat de SHI waarden indicatief zijn voor een zomerse situatie, omdat de satellietbeelden waren opgenomen tijdens de hittegolfperiode van 2006.

De resultaten laten zien dat het SHI overdag kan oplopen tot 9 °C, maar gemiddeld voor de 73 grootste steden in Nederland is het 2,9 °C. 's Nachts is het oppervlakte hitte-eiland effect 2,4 °C. Er is een positieve relatie gevonden tussen de mate van bebouwing en verharding en het stedelijk hitte-eiland effect. Als mitigatiemaatregel kan daaruit worden afgeleid dat 10% vermindering in de fractie verhard oppervlak in de stad het stedelijk oppervlakte hitte-eiland effect 's nachts met gemiddeld 1,2 °C kan reduceren en overdag met 2,0 °C.

Daarnaast lijkt er een verband te zijn tussen de bodemsoort van elke plaats en het SHI. Zandgronden leiden tot relatief hoge SHI waarden overdag, terwijl steden op klei- en veengronden vooral 's nachts een hoog SHI vertonen. Dit verband zou in een vervolgonderzoek nauwkeuriger bestudeerd kunnen worden.

Ook de relatie tussen het oppervlakte hitte-eiland effect en het atmosferisch hitte-eiland effect zou in een vervolgonderzoek meer aandacht kunnen krijgen. Uit de huidige resultaten bleek dat de SHI resultaten moeilijk vergelijkbaar zijn met het atmosferische stedelijk hitte-eiland afgeleid uit een aantal weeramateurmetingen voor 22 plaatsen in Nederland. Dit heeft vooral te maken met de verschillen in ruimtelijke schaal en tijd beide analyses.

5 Ondertekening

Naam en adres van de opdrachtgever
Stichting Kennis voor Klimaat
t.a.v. Prof. P. Vellinga
Daltonlaan 400
3584 BK Utrecht

Naam en functies van de medewerkers:
Dr. Ir. E.J. Klok
Ir. S. Schaminée
Dr. Ing. J. Duyzer
Dr. Ir. G.J. Steeneveld (WUR)

Datum waarop of tijdsbestek waarin het onderzoek heeft plaatsgehad:

Naam en paraaf tweede lezer:



Drs. P.R. Bosch

Ondertekening;



Dr. Ir. E.J. Klok
Projectleider

Autorisatie vrijgave:



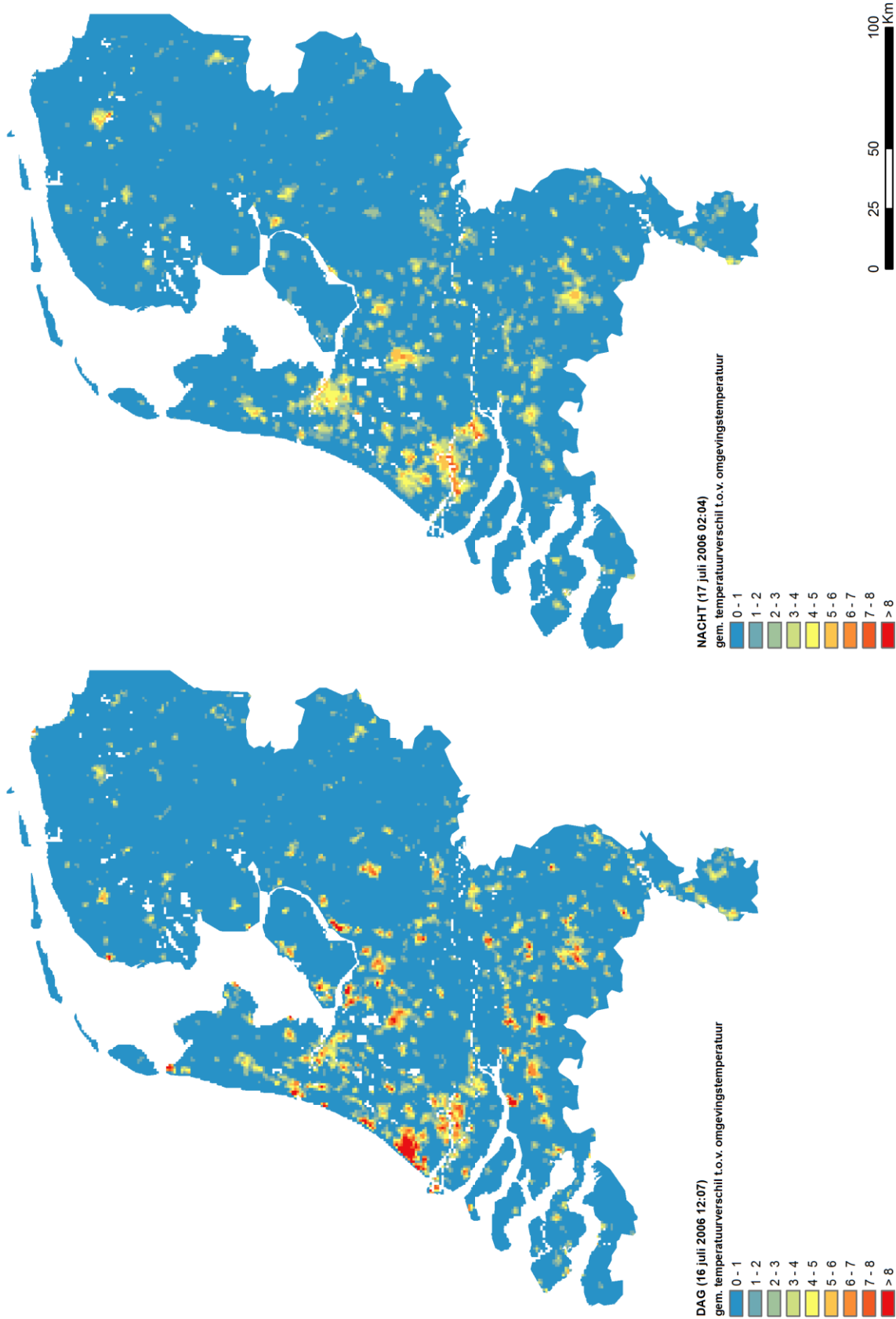
Drs. H.C. Borst
Research Manager

Bijlage A: Tabel met resultaten en kaart

Het gemiddelde oppervlakte hitte-eiland effect (SHI) voor de 73 grootste plaatsen in Nederland, overdag en 's nachts, is in onderstaande tabel opgenomen. Ook is voor elke plaats de fractie verharding voor het stedelijk gebied weergegeven en het aantal satelliet pixels waaruit de waarden zijn bepaald. De woonplaatsen zijn gerangschikt van hoogste SHI overdag naar laagste. De rangorde 's nachts is ook gegeven. De fracties verhard en bebouwd en de fracties wateroppervlak is voor elke woonplaats bepaald voor alleen het bebouwde gebied (d.w.z. de rode gridcellen, zie paragraaf 2.3).

Woonplaats	SHI dag (°C)	SHI nacht (°C)	rank dag	rank nacht	fractie verhard/ bebouwd	fractie water	aantal cellen
's-Gravenhage	8,6	2,4	1	36	0,49	0,05	54
Waalwijk	5,9	3,1	2	24	0,35	0,02	10
Amersfoort	5,2	4,3	3	7	0,34	0,03	25
Tilburg	5,1	3,0	4	26	0,36	0,03	42
Rotterdam	4,9	4,9	5	4	0,40	0,08	77
Etten-Leur	4,8	1,7	6	51	0,32	0,01	13
Utrecht	4,8	4,9	7	3	0,40	0,06	47
Breda	4,7	3,3	8	21	0,35	0,04	36
Oss	4,7	1,9	9	46	0,35	0,02	15
Purmerend	4,6	3,1	10	25	0,30	0,09	15
Veenendaal	4,5	2,6	11	32	0,33	0,03	13
Weert	4,5	2,1	12	40	0,33	0,02	12
Delft	4,4	4,9	13	2	0,40	0,06	16
Eindhoven	4,4	3,8	14	13	0,39	0,01	50
Barendrecht	4,4	1,7	15	52	0,31	0,07	11
Apeldoorn	4,3	1,4	16	57	0,33	0,02	33
A'dam Zuidoost	4,3	3,4	17	16	0,33	0,08	12
Schiedam	4,2	3,9	18	10	0,39	0,12	11
Alphen a/d Rijn	4,2	3,9	19	11	0,35	0,07	14
Spijkenisse	4,1	3,8	20	12	0,32	0,06	12
Zaandam	4,0	2,4	21	37	0,31	0,15	15
Capelle a/d IJssel	4,0	3,3	22	20	0,32	0,10	12
Dordrecht	3,9	5,0	23	1	0,30	0,13	27
Goes	3,7	3,3	24	19	0,31	0,06	10
Bergen op Zoom	3,6	1,5	25	55	0,37	0,04	13
Zoetermeer	3,6	4,8	26	6	0,35	0,06	21
Veldhoven	3,6	2,7	27	31	0,33	0,00	12
Lelystad	3,4	1,3	28	61	0,28	0,05	21
Gouda	3,4	1,6	29	54	0,32	0,12	12
Uden	3,4	1,9	30	44	0,29	0,01	11
Leeuwarden	3,3	1,4	31	58	0,36	0,08	23
Haarlem	3,2	2,4	32	35	0,46	0,06	23
Roosendaal	3,2	3,2	33	22	0,36	0,02	18

Oosterhout	3,2	2,7	34	29	0,32	0,06	15
Zwijndrecht	3,1	4,8	35	5	0,32	0,15	10
Hilversum	3,0	1,7	36	53	0,34	0,01	15
Amsterdam	3,0	3,9	37	9	0,40	0,11	92
Almere	3,0	0,8	38	65	0,29	0,06	38
Vlaardingen	3,0	2,3	39	38	0,38	0,05	12
Heerenveen	2,9	1,9	40	45	0,26	0,07	13
Leiden	2,8	2,5	41	33	0,37	0,08	21
Maastricht	2,7	1,5	42	56	0,36	0,04	26
Alkmaar	2,5	3,6	43	15	0,35	0,07	18
Hoorn	2,5	0,4	44	70	0,31	0,08	15
Vlissingen	2,4	1,3	45	62	0,24	0,12	18
Helmond	2,4	3,4	46	18	0,34	0,03	22
Nijmegen	2,4	2,0	47	41	0,35	0,05	33
Terneuzen	2,4	1,8	48	49	0,29	0,10	10
's-Hertogenbosch	2,1	1,8	49	47	0,34	0,07	25
Ede	2,0	3,4	50	17	0,35	0,01	14
Middelburg	2,0	2,8	51	28	0,31	0,06	10
Groningen	2,0	3,2	52	23	0,36	0,07	35
Deventer	1,9	0,2	53	71	0,34	0,05	16
Venlo	1,9	2,0	54	42	0,32	0,03	23
Hoofddorp	1,8	2,5	55	34	0,34	0,09	12
Roermond	1,7	0,1	56	72	0,34	0,04	11
Geleen	1,4	1,2	57	63	0,28	0,00	14
Nieuwegein	1,3	3,8	58	14	0,31	0,10	14
Zwolle	1,2	2,7	59	30	0,33	0,05	28
Sittard	1,2	1,1	60	64	0,31	0,00	11
Hengelo	1,1	0,8	61	66	0,28	0,02	26
Drachten	1,1	2,9	62	27	0,29	0,05	15
Kerkrade	1,1	0,5	63	68	0,30	0,00	11
Arnhem	1,0	2,2	64	39	0,32	0,06	31
Tiel	1,0	1,9	65	43	0,28	0,08	12
Amstelveen	0,9	4,0	66	8	0,34	0,06	14
Heerlen	0,8	1,7	67	50	0,30	0,01	18
Assen	0,8	1,3	68	60	0,30	0,03	19
Enschede	0,6	0,8	69	67	0,32	0,02	33
Emmen	0,5	1,8	70	48	0,27	0,03	17
Hoogeveen	0,2	0,1	71	73	0,28	0,04	15
Almelo	0,2	0,4	72	69	0,32	0,04	18
Doetinchem	0,0	1,3	73	59	0,31	0,02	12



Het oppervlakte hitte-eiland effect van de Nederlandse steden voor de situatie overdag en 's nachts. De kaarten zijn gebaseerd op twee NOAAVHRR satellietbeelden van de oppervlaktetemperatuur opgenomen tijdens de hittegolperiode van 2006. Het verschil in de oppervlaktetemperatuur tussen stad en het buitengebied is hierbij gedefinieerd als het oppervlakte hitte-eiland effect.

Bijlage B: Effect of roof temperatures on the surface heat island of Rotterdam

Introduction

Thermal infrared high resolution satellite images from Landsat sensors were used by Klok et al. (2010, 2012) to spatially quantify the surface heat island (SHI) of Rotterdam. Based on surface temperature maps retrieved on 15 summer days since 1984, the average surface temperature of each district (and each neighbourhood) within the city was compared to the rural surface temperature outside the city, defined as the SHI intensity. The results showed that the daytime SHI intensity of Rotterdam can be as large as 10 °C (Fig. 1).

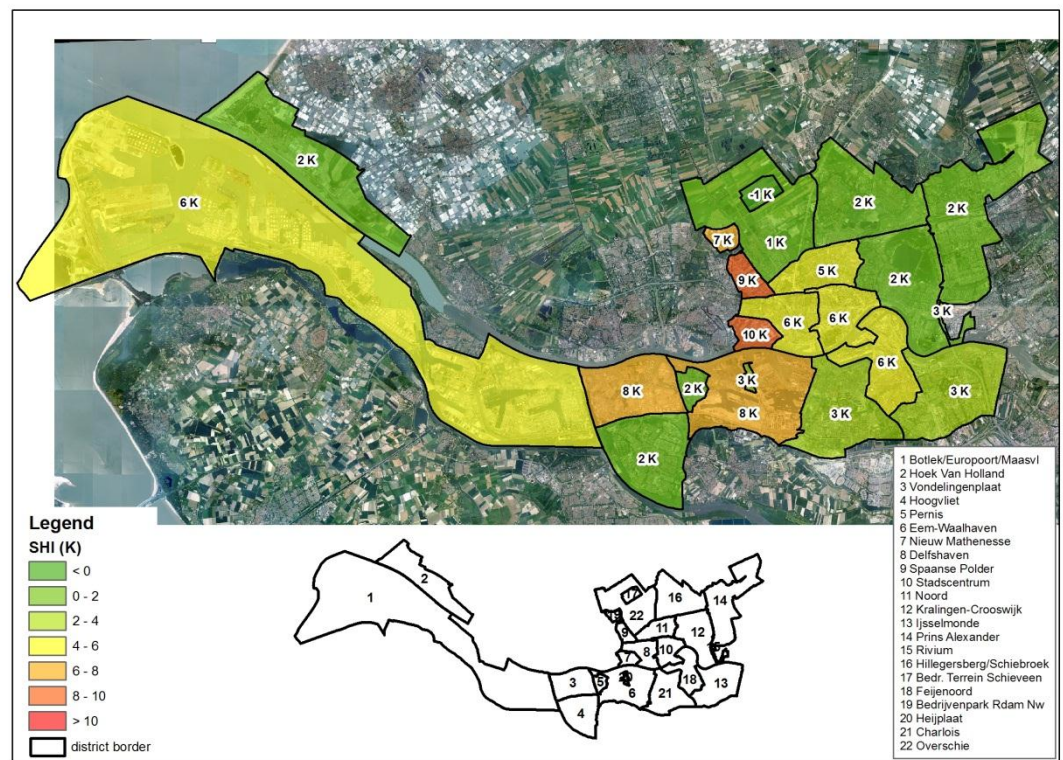


Fig. 1 Summer daytime average SHI intensity of 22 districts of Rotterdam based on 15 Landsat images projected on an aerial photograph.

In this analysis, ground surface temperatures were not distinguished from roof surface temperatures. Each district average SHI is an average of all Landsat satellite pixels (excluding water surfaces) in each district. This implies that the average surface temperature calculated for each district is a mixture of ground and roof surfaces. One could argue that ground surface temperatures better represent the urban heat island effect experienced at street level than roof surface temperatures. For this reason, roof surface temperatures should be excluded from the SHI analyses. In this study, the effect of roof temperatures on the calculated SHI intensity of Rotterdam has been investigated.

Method

The analysis was carried out on neighbourhood scale. Rotterdam exists of 89 neighbourhoods. For each neighbourhood, the SHI intensity was calculated from the average Landsat surface temperature map (Klok et al., 2012) including and excluding the roof surfaces. Locations of the roofs were derived from an urban digital elevation model (DEM) of Rotterdam with a spatial resolution of 10 x 10 m. The average Landsat surface temperature map with a spatial resolution of 30 x 30 m, resampled from Landsat images with a spatial resolution of 60 x 60 m and 120 x 120 m, was projected onto this DEM. Subsequently, neighbourhood average surface temperatures were calculated from all 30 x 30 m pixels in the neighbourhood and the pixels which do not overlap with roof surfaces.

In densely built neighbourhoods, a large number of Landsat pixels overlap with roofs surfaces and only a small number remain to calculate the neighbourhood average. For 38 neighbourhoods, the number of pixels which do not overlap with roofs decreases below 20% of the total number. These neighbourhood results were not reported.

Results

On average, 7.3% of the Rotterdam area exists of roofs, and the average Landsat surface temperature of Rotterdam is 27.8 °C. This value is calculated from all satellite pixels within the boundary of Rotterdam. If we calculate the average surface temperature from all pixels which do not overlap with roofs, the temperature is 27.2 °C. Consequently, it can be concluded that the average SHI intensity of Rotterdam reduces by 0.6 °C when roof pixels are excluded (a decrease of 4.7 to 4.1 °C).

This will be different when looking at the SHI of the individual neighbourhoods. Fig. 2 shows the difference in the average surface temperature of each neighbourhood when roof surface pixels are excluded from the average, as a function of the SHI including roof surfaces. The maximum difference is 3.1 °C. The average difference is 0.8 °C. The figure indicates that the SHI of all neighbourhoods, independent of the size of its SHI, decreases when roof pixels are excluded. Fig. 3 shows that exclusion of roof surfaces seems to have a larger effect on the SHI of neighbourhoods with a large percentage of roof surfaces. In Fig. 4, the individual SHI's of all neighbourhoods including and excluding roof surfaces are plotted.

References

- Klok, E.J. Broeke, H.M. ten Harmelen, A.K. van Verhagen, H.L.M. Kok, H.J.G. Zwart, S., 2010: Ruimtelijke verdeling en mogelijke oorzaken van het hitte-eiland effect, TNO-034-UT-2010-01229.
- Klok, L., Zwart, S., Verhagen, H. and Mauri, E., 2012: The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban characteristics. Resources, Conservation and Recycling, doi:10.1016/j.reconrec.2012.01.009

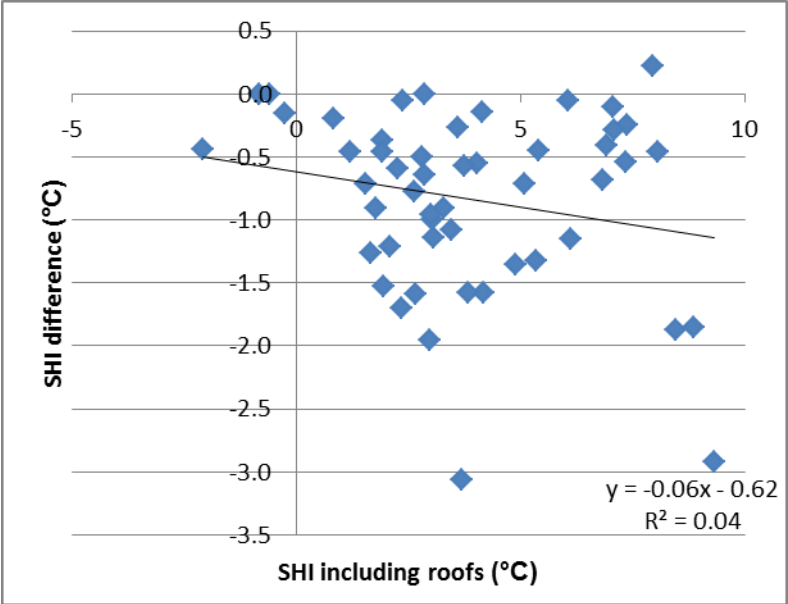


Fig. 2 SHI difference (excluding - including roofs) as a function of the neighbourhood average SHI including roofs.

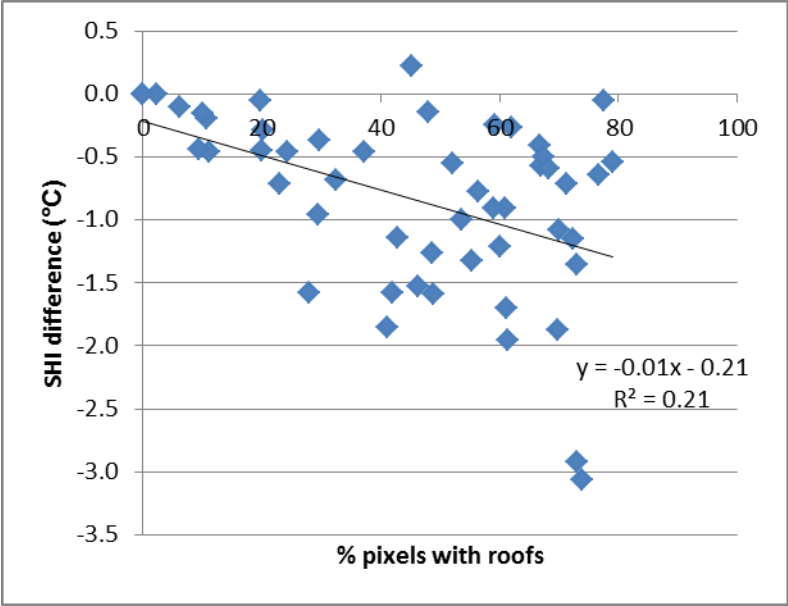


Fig. 3 Difference in neighbourhood average surface temperature when roofs are included and excluded, as function of the roof surface percentage of each neighbourhood.

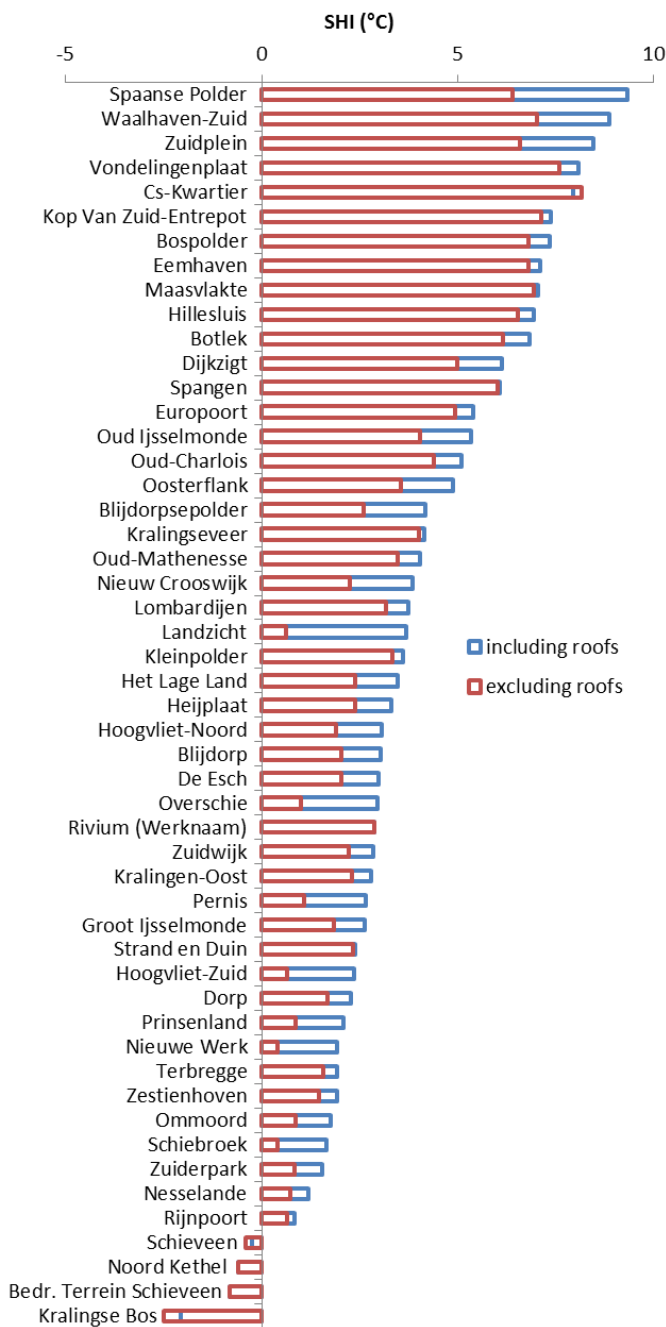


Fig. 4 SHI of all neighbourhoods in Rotterdam when roof surfaces are included and excluded from the SHI analysis.