

Modelsimulaties van het stadsklimaat van Rotterdam

Reinder Ronda, Gert-Jan Steeneveld, Bert van Hove



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

WUR publicatie, 20 December 2010

Copyright @ 2010

National Research Programme Knowledge for Climate (KfC)/Kennis voor Klimaat. All rights reserved. Nothing in this publication may be copied, stored in automated databases or published without prior written consent of the National Research Programme Knowledge for Climate/ Kennis voor Klimaat. In agreement with Article 15a of the Dutch Law on authorship is allowed to quote sections of this publication using a clear reference to this publication.

Liability

The National Research Programme Knowledge for Climate and the authors of this publication have exercised due caution in preparing this publication. However, it cannot be expelled that this publication includes mistakes or is incomplete. Any use of the content of this publication is for the own responsibility of the user. The Foundation Knowledge for Climate (Kennis voor Klimaat), its organisation members, the authors of this publication and their organisations cannot be held liable for any damages resulting from the use of this publication.

Inhoudsopgave

Samenvatting	5
1. Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Doelstellingen en afbakening.....	7
2. Opzet modelstudie	9
2.1 WRF model.....	9
2.2 Randcondities	9
2.3 Rekenroosters	9
2.4 Parameterisaties	9
2.5 Landgebruik en parameters stedelijk gebied	11
2.6 Initialisatie en simulatie	14
2.7 Meteorologische waarnemingen	14
3. Resultaten	17
3.1 De ruimtelijke verdeling van de temperatuur.....	17
3.2 Het dagelijks temperatuurverloop	17
3.3 De energiebalans van het stedelijk gebied vs. landelijk gebied	18
3.4 De invloed van antropogene warmte	20
3.5 De invloed van albedo en groen	21
4. Conclusies.....	23
5. Referenties	25
Bijlage: Eigenschappen Nederlandse steden	27

Samenvatting

Modellsimulaties zijn uitgevoerd ter inschatting van het Urban Heat Island effect van Rotterdam. Hiervoor is de meest recente versie van het Weather Research & Forecasting (WRF) model gebruikt dat is uitgerust met een Urban Canopy Model. Bovendien is gebruik gemaakt van specifieke stadeigenschappen die zeer recent beschikbaar zijn gekomen. De studie is uitgevoerd in het kader van het 'Heatstress in the City of Rotterdam project' (1^{ste} fase Kennis voor Klimaat programma).

De modelresultaten zijn vergeleken met twee weerstations in het stedelijk gebied en met een weerstation in het landelijk gebied ten noorden van Rotterdam. Het blijkt dat het WRF model goed in staat is om de luchttemperaturen op een referentiehoogte dichtbij het oppervlak te simuleren zoals die zijn waargenomen op twee weerstations in het stedelijk gebied van Rotterdam en op een weerstation in het landelijk gebied net buiten Rotterdam. Dit geldt vooral voor de late middag en tijdens de nacht.

Uit de berekeningen met behulp van het WRF model blijkt dat het stedelijk gebied van de stad Rotterdam gedurende de dag warmte opneemt. Deze warmte komt tijdens de nacht gedeeltelijk weer vrij wat ertoe leidt dat tijdens de nacht in het stedelijk gebied de berekende temperaturen op screen level hoger zijn dan in het omliggende landelijke gebied. Zo bedragen in stedelijke gebieden zoals Rotterdam, Den Haag en Delft de berekende 'screen level' temperaturen op 6 augustus 2010 om UTC 20:00 (22u00 lokale tijd) meer dan 26° C, terwijl de berekende screen level temperaturen op hetzelfde tijdstip in het omliggende landelijke gebied 20° C tot 23° C bedragen.

Voor het stedelijk gebied van Rotterdam is een gemiddelde waarde van 38 W m⁻² berekend voor de warmteafgifte door antropogene activiteiten berekend (Klok et al. 2010). De modellsimulaties laten zien dat indien de warmteafgifte deze waarde heeft het effect heeft op de luchttemperatuur op straatniveau ('screen level') slechts gering is: in de orde van een halve graad ter hoogte van het waarnemingsstation IJsselmonde. Echter, lokaal kan de afgifte van warmte vanuit antropogene bronnen vele malen hoger zijn. Om het effect van een verhoogde afgifte van warmte vanuit antropogene bronnen te bepalen, zijn ook simulaties uitgevoerd waarbij de afgifte van warmte vanuit antropogene bronnen is verhoogd. Uit deze berekeningen blijkt dat als de afgifte van warmte vanuit antropogene bronnen in WRF wordt verhoogd tot 200 W m⁻² de gesimuleerde screen level temperaturen op de locatie waar zich het waarnemingsstation IJsselmonde bevindt tot 2 °C hoger zijn dan in de referentiesituatie.

Het verhogen van de fractie groen van 3% tot 10 % leidt nauwelijks tot een verandering van de temperatuur op straatniveau ('screen level'). Verhoging van de albedo van het stedelijk gebied tot 0,5 heeft meer effect en leidt tot een vermindering van het UHI effect van enkele tienden graden. Bij het resultaat dient evenwel de kanttekening te worden gemaakt dat het eerste modellsimulaties betreft; gevoeligheidsstudies en verdere modelontwikkeling naar hogere resoluties

(downscaling) zijn onderwerp van de vervolgfase (project 'Climate Proof Cities', 2^{de} fase Kennis voor Klimaat Programma).

1. Inleiding

1.1 Achtergrond

Het is bekend dat met name tijdens de avond en tijdens de nacht stedelijke gebieden warmer zijn dan het omliggende rurale gebied, een effect dat bekend staat als het Urban Heat Island (UHI) effect. In de huidige studie zijn modelsimulaties uitgevoerd naar het Urban Heat Island effect van de stad Rotterdam. De studie gebeurde in het kader van het 'Heat stress in the city of Rotterdam' project (HSRR05, 1^e fase Kennis voor Klimaat).

De studie is een vervolg op een eerdere studie uitgevoerd met WRF waarin een eerste inschatting van het Urban Heat Island effect voor Rotterdam en omgeving is gemaakt (Steenefeld en Van Hove 2009). Omdat nog weinig bekend was over de stadseigenschappen, gebeurde dit met de standaard waarden van het model. Inmiddels is het Urban Canopy Model (UCM) van WRF verder verfijnd en zijn er ook meer gegevens over de UHI intensiteit en specifieke stads-eigenschappen beschikbaar gekomen. Zo zijn de statische en dynamische veroorzakers van het UHI effect van Rotterdam in kaart gebracht. Statische veroorzakers zijn hittefactoren die inspelen op landgebruik en landbedekking, zoals groen, water, wegen, gebouwen en stedelijke materialen. Deze factoren zijn voor Rotterdam per wijk gekwantificeerd op grond van geografische gegevens en in verband gebracht met de ruimtelijke verdeling van de oppervlaktetemperatuur (Klok et al. 2010). Onder dynamische veroorzakers worden de antropogene warmtebronnen verstaan. Dit is de warmteproductie die vrijkomt bij energieconversie door menselijke activiteiten (industrie, huishoudens, verkeer, ruimteverwarming, etc.). Voor het stedelijk gebied van Rotterdam is een inventarisatie gemaakt van de antropogene warmtebronnen die zouden kunnen bijdragen aan het stedelijk hitte-effect. Voor de warmteafgifte vanuit antropogene bronnen is een gemiddelde waarde van 38 W m^{-2} is hiervoor vastgesteld (Klok et al. 2010). Echter, lokaal kan de afgifte van warmte vanuit antropogene bronnen vele malen hoger zijn.

1.2 Doelstellingen en afbakening

Het doel van de huidige studie is om de simulaties voor Rotterdam te herhalen met de meest recente versie van WRF om na te gaan of de resultaten in overeenstemming zijn met eerdere modelstudies en recente waarnemingen. De simulatiestudie is uitgevoerd voor 5, 6 en 7 augustus 2009, een periode met voor Nederland zeer hoge maximum temperaturen ($> 30 \text{ }^\circ\text{C}$). Daarnaast is gekeken naar het effect van de vastgestelde waarde voor antropogene warmte op de UHI intensiteit van Rotterdam. Bovendien is onderzocht wat het effect is van het verhogen van de Albedo van het stedelijk gebied en het verhogen van de fractie groen in de stad op de UHI intensiteit.

2. Opzet modelstudie

2.1 WRF model

De studie is uitgevoerd met het Weather Research & Forecasting (WRF) model. Dit model is een zogenaamd mesoschaal model dat atmosferische processen simuleert die zich afspelen op een gridschaal van enkele kilometers tot maximaal enkele honderden kilometers (Skamarock et al. ,2005). Berekeningen zijn uitgevoerd met behulp van versie 3.2.1 van het WRF model dat op 18 augustus 2010 is vrijgegeven.

2.2 Randcondities

Grotere schalen dan de mesoschaal dienen aan het WRF model te worden aangeboden. Dit gebeurt doorgaans door de waarden van meteorologische variabelen zoals uitgerekend door een grootschalig model op te leggen aan die delen van het domein WRF model dat zich dichtbij de rand van het domein bevinden. In deze studie zijn als randcondities de analyses gebruikt zoals die door het mondiale weersverwachtingsmodel van het National Center for Environmental Prediction (NCEP) zijn berekend (<http://www.nco.ncep.noaa.gov/>). Deze velden zijn beschikbaar voor intervallen van 6 uur. De ruimtelijke resolutie van de analyses van het NCEP is $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ wat betekent dat in Noord-West Europa de resolutie van de atmosferische variabelen ongeveer 50 km x 50 km is.

2.3 Rekenroosters

Om de mesoschaal processen te simuleren is het domein van WRF model opgedeeld met behulp van rekenroosters, die zijn opgedeeld in roostercellen. Het buitenste rooster omspant het hele domein van het WRF model. Dit rooster bestaat uit 41 x 41 roostercellen die elk 25 km x 25 km groot zijn. Het domein van WRF heeft dus een totale omvang van 1.025 km x 1.025 km. De grootte van de roostercellen van buitenste domein zijn dusdanig gekozen dat zij aansluiten bij de ruimtelijke resolutie van de NCEP analyses. Echter, om het klimaat van de stad Rotterdam goed te modelleren zijn de roostercellen van het buitenste rooster te groot. Daarom zijn binnen het buitenste domein twee kleinere rekenroosters genest: een rooster van 41 x 41 cellen die elk 5 km x 5 km groot zijn waarin weer een binnenrooster is genest van 61 x 61 roostercellen die elk 1 km x 1 km groot zijn. Het hele domein van WRF is gecentreerd rondom het centrum van Rotterdam (51° 55'0.0" N, 4°, 28'3.7" E). Voor alle roosters worden voor de berekening van de verticale component van de atmosferische processen 27 lagen gebruikt. De onderste laag bevindt zich aan het oppervlak, de bovenste laag bevindt zich in de stratosfeer.

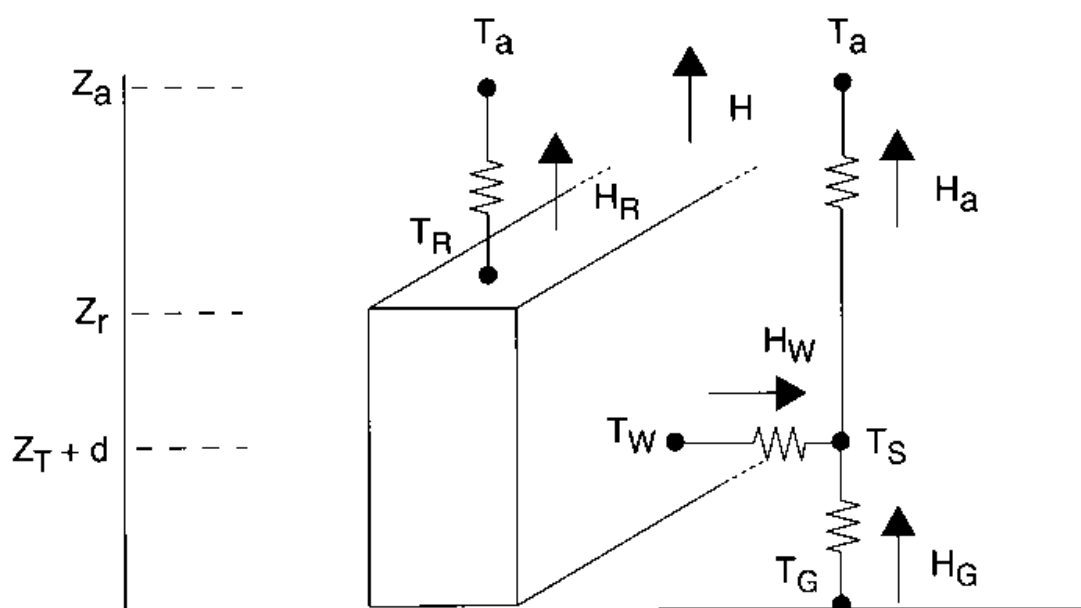
2.4 Parameterisaties

Atmosferische processen die zich afspelen op schalen die kleiner zijn dan de mesoschaal kunnen niet rechtstreeks door het model worden berekend. De effecten

van deze kleinschalige op de mesoschaalprocessen worden in het WRF model berekend door middel van parameterisaties. Deze vaak complexe schema's relateren de effecten van de kleinschalige processen aan grootheden die door het model wel worden opgelost, waarna de berekende effecten worden verdisconteerd.

Om de verticale menging door turbulentie te berekenen, is gebruik gemaakt van het Yonsei University (YSU) schema voor de atmosferische grenslaag (Hong et al. 2006). Diepe convectie is voor twee grootste rekenroosters berekend met behulp van het schema van Grell en Devenyi (2002), terwijl voor het binnenste rekenrooster geen parameterisatie voor de diepe convectie is toegepast. De verticale verdeling van fluxen van kortgolvlige straling in de atmosfeer is berekend met behulp van schema van Dudhia (1989). De verticale verdeling van de fluxen van langgolvlige straling is berekend met behulp van Rapid Radiative Transfer Model (Mlawer et al. 1997). De processen aan het oppervlak zijn berekend met het Noah landoppervlaktenmodel (Chen en Dudhia 2001; Chen et al. 2007), waarbij voor de koppeling tussen het landoppervlak en de atmosfeer gebruik is gemaakt van de Monin-Obukhov similariteitsrelaties.

Het Noah landoppervlaktenmodel is voorzien van een bulk parameterisatie voor het stedelijk gebied (Chen et al. 2010). In deze studie is echter gebruik van het model voor het stedelijk gebied zoals ontwikkeld door Kusaka et al. (2001) en Kusaka en Kimura (2004) dat door Chen et al. (2010) is geïmplementeerd in het WRF model. Het model dat is gebruikt is het zogenaamde single-layer urban canopy model (SLUCM) model. Het SLUCM model is schematisch weergegeven in figuur 1. Het model gaat uit van een oneindig lange streetcanyon dat wordt verdeeld in drie componenten: het dak, de muur aan weerszijden van de canyon en de weg. Voor elk van deze componenten wordt de energiebalans uitgerekend, als functie van de inkomende fluxen van kortgolvlige en langgolvlige straling, en de temperatuur op het laagste modelniveau (T_A in de figuur). Op deze manier wordt voor elke component een oppervlaktetemperatuur uitgerekend: T_R voor het dak, T_W voor de muur en T_G voor de weg. Hierbij neemt het model aan dat de muren en de weg zijn gekoppeld door middel van een temperatuur in de canyon, die in de figuur is weergegeven als T_C . Naast de verschillende temperaturen berekent het schema ook voor elke component de verschillende energiestromen aan het oppervlak. Dit betreft de uitwisseling van voelbare en latente warmte tussen het dak en de atmosfeer, de uitwisseling van voelbare en latente warmte tussen de street canyon en de atmosfeer, de uitwisseling van voelbare en latente warmtestromen tussen het dak en de atmosfeer, de uitwisseling van voelbare en latente warmte tussen de muur en de weg en de street canyon en de verschillende warmtestromen die vanuit het oppervlak het bouwmateriaal binnendringen of juist vanuit het bouwmateriaal naar het oppervlak worden vrijgegeven.



Figuur 2.1: Schematische overzicht single-layer urban canopy model (SUCM) (overgenomen uit Kusaka et al. 2001).

2.5 Landgebruik en parameters stedelijk gebied

Om met behulp van het WRF model simulaties uit te voeren, zijn invoergegevens met betrekking tot het landoppervlak vereist. Dit betreft onder andere gegevens met betrekking tot het landgebruik, het bodemtype en verschillende gegevens met betrekking tot de topografie. Deze gegevens zijn genomen uit de verschillende standaard databases zoals deze bij WRF worden meegeleverd.

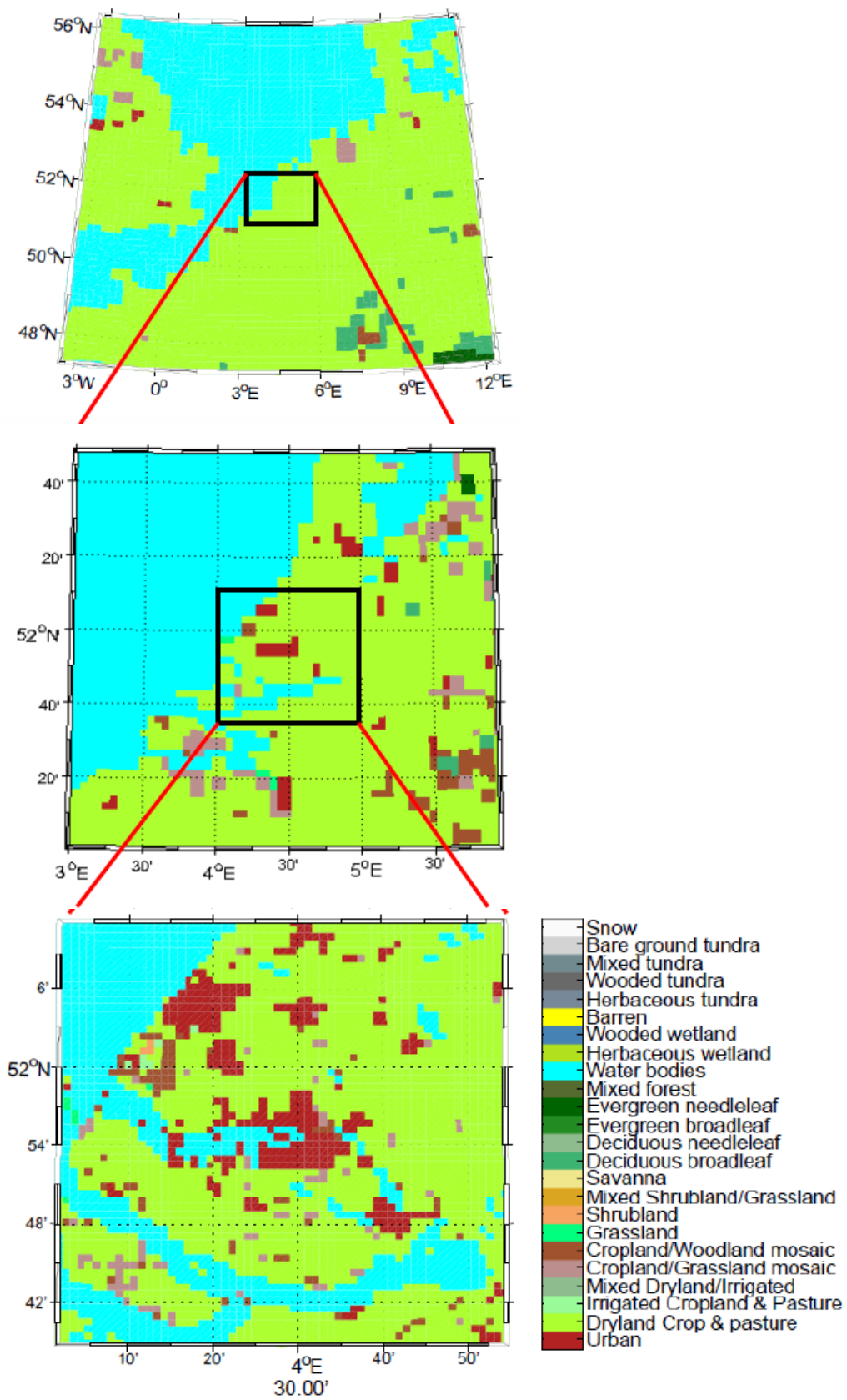
De gegevens met betrekking tot het landgebruik zijn onttrokken aan de USGS database. Deze gegevens classificeren het landgebruik op verschillende schalen waarvan de fijnste schaal een resolutie van 30" heeft. Dit betekent dat voor Noordwest Europa het landgebruik op een resolutie van ongeveer 0,9 km x 0,9 km is bepaald. Figuur 2 geeft voor de verschillende roosters de verdeling in landgebruik weer zoals dat voor de verschillende roosterzellen uit de USGS database is afgeleid. Op het buitenste rooster bestaat Nederland voornamelijk uit droog landbouwgebied en weiland. Op de fijnere roosters worden de verschillen in landgebruik binnen Nederland beter zichtbaar. Met name op het fijnste roosterzellen zijn de verschillende Nederlandse steden goed te onderscheiden.

De landgebruikkaart zoals dat is onttrokken aan de USGS database maakt geen onderscheid tussen verschillende soorten steden. Alle stedelijke gebieden worden in WRF behandeld als gebieden met woningbouw met een hoge dichtheid van woningen. De parameters zoals deze zijn ingevoerd in het WRF model zijn weergegeven in Tabel 1. De gemiddelde hoogte van de gebouwen zijn berekend door TNO (zie bijlage I). Deze waarde betreft de waarde voor het gebied dat is

gedefinieerd als Groot Centrum Rotterdam. De standaarddeviatie van de gebouwhoogte is geschat op basis van de verschillen in gebouwhoogte tussen het gebied dat is gedefinieerd als groot centrum van Rotterdam en de gebieden Centrum en Charlois in Rotterdam waarvoor in Rotterdam door TNO ook berekeningen van de gebouwhoogte zijn verricht. Voor de breedte van het dak is uitgegaan van een gemiddelde gebouwbreedte van 10 m en voor de breedte van de canyon is uitgegaan van een weg van twee rijbanen van elk 4 m breed die aan weerszijden wordt geflankeerd door een fietspad/voetpad van elk 3 m breed. De overige parameters voor de gebouwde omgeving zijn overgenomen uit de waarden zoals deze voor het WRF model zijn afgeleid door Chen et al. (2010). Voor de antropogene warmteafgifte is de gemiddelde schatting voor Rotterdam gebruik zoals die is afgeleid door Klok et al. (2010). Dit betekent dat de antropogene warmte voor alle roostercellen waarin het landgebruik stedelijk is, 38 W m^{-2} bedraagt. Naast deze schatting zijn drie additionele simulaties uitgevoerd voor verhoogde waarden. Dit betreft een simulatie waarin geen sprake is van uitgifte van warmte door antropogene bronnen, een simulatie waarin voor alle stedelijke roostercellen een afgifte van antropogene warmte van 100 W m^{-2} is gebruikt en een simulatie waarin voor alle stedelijke roostercellen een uitgifte van antropogene warmte van 200 W m^{-2} is gebruikt

Tabel 2.1: parameterwaarden SLUCM model

Parameter	Waarde
<i>Bebouwde omgeving</i>	
Gebouwhoogte	14,4 m
Standaarddeviatie gebouwhoogte	2,0 m
Breedte van het dak	10,0 m
Breedte van de canyon	14,0 m
Fractie groen in stad	3 %
Fractie bebouwd gebied	0,97
Warmtecapaciteit dak	$1.0 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$
Warmtecapaciteit muur	$1.0 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$
Warmtecapaciteit weg	$1.4 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$
Geleidbaarheid dak	$0,67 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Geleidbaarheid muur	$0,67 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Geleidbaarheid weg	$0,4004 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Albedo dak	0,2
Albedo muur	0,2
Albedo weg	0,2
Emissiviteit dak	0,9
Emissiviteit muur	0,9
Emissiviteit weg	0,95
Ruwheidslengte dak	0,01 m
<i>Anthropogene warmte</i>	
Referentiewaarde	0 W m^{-2}
Gemiddelde voor Rotterdam	38 W m^{-2}
Verhoogde waarde 1	100 W m^{-2}
Verhoogde waarde 2	200 W m^{-2}



Figuur 2.2: USGS landgebruik voor de verschillende rekenroosters.

2.6 Initialisatie en simulatie

Simulaties zijn opgestart op 3 augustus 2009 om UTC 12:00. Voor dit tijdstip zijn de waarden van de luchttemperatuur, de luchtvochtigheid, de verschillende componenten van de windsnelheid, de temperatuur van de bodem en de vochtigheid van de bodem voor de verschillende modellagen (verticaal) en roostercellen (horizontaal) bepaald met behulp van velden die zijn berekend met het mondiale weersverwachtingmodel van NCEP. Als beginwaarde voor de temperaturen van het materiaal in de bebouwde omgeving is een constante temperatuur van 20° C aangehouden.

In dit onderzoek is een spin-up periode van 1,5 dag gebruikt. Dit betekent dat berekende waarden op 3 en 4 augustus 2009 in dit onderzoek niet worden gebruikt. De analyse van de resultaten beperkt zich dus tot de berekende waarden in de periode van UTC 00:00 op 5 augustus 2009 tot UTC 18:00 UTC op 7 augustus 2009.

2.7 Meteorologische waarnemingen

In de periode van 5 augustus 2009 tot en met 7 augustus 2009 waren er nog geen gegevens beschikbaar van het meetnet Rotterdam. Om die reden is in deze studie gebruik gemaakt van waarnemingen die zijn verricht op het waarnemingsstation Rotterdam van het KNMI (51° 57' N, 4° 27' E), het waarnemingsstation IJsselmonde (51° 52' 50" N, 4° 31' 34"E) en het waarnemingsstation Rijnmond (51° 52' 30" N, 4° 28' 10"E). Een kaartje met daarop aangegeven de locatie van de verschillende waarnemingsstation is gegeven in figuur 3.

Het waarnemingsstation van het KNMI bevindt zich dicht bij de luchthaven Zestienhoven. In deze studie is dit station beschouwd als representatief voor het landelijk gebied rondom Rotterdam. Gebruikt zijn de waarnemingen van de temperatuur op 1,5 m hoogte.

De waarnemingsstations IJsselmonde (<http://www.weerstation-rotterdam-ijsselmonde.nl/>) en Rijnmond (<http://www.weerstation-rijnmond.nl/>) zijn stations die worden beheerd door weeramateurs. Voor beide stations zijn metingen gebruikt van de buitenluchttemperatuur. Voor weerstation IJsselmonde betekent dit dat de waarneming is verricht op 1,5 m hoogte in de achtertuin van de weeramateur. Voor weerstation Rijnmond betekent dit dat de waarneming is verricht door een sensor die is bevestigd aan het balkon van de woning van de weeramateur. In deze studie zijn de waarnemingen zoals deze door de weeramateurs zijn gedaan beschouwd als representatief voor de temperaturen zoals die worden gemeten in de stad.

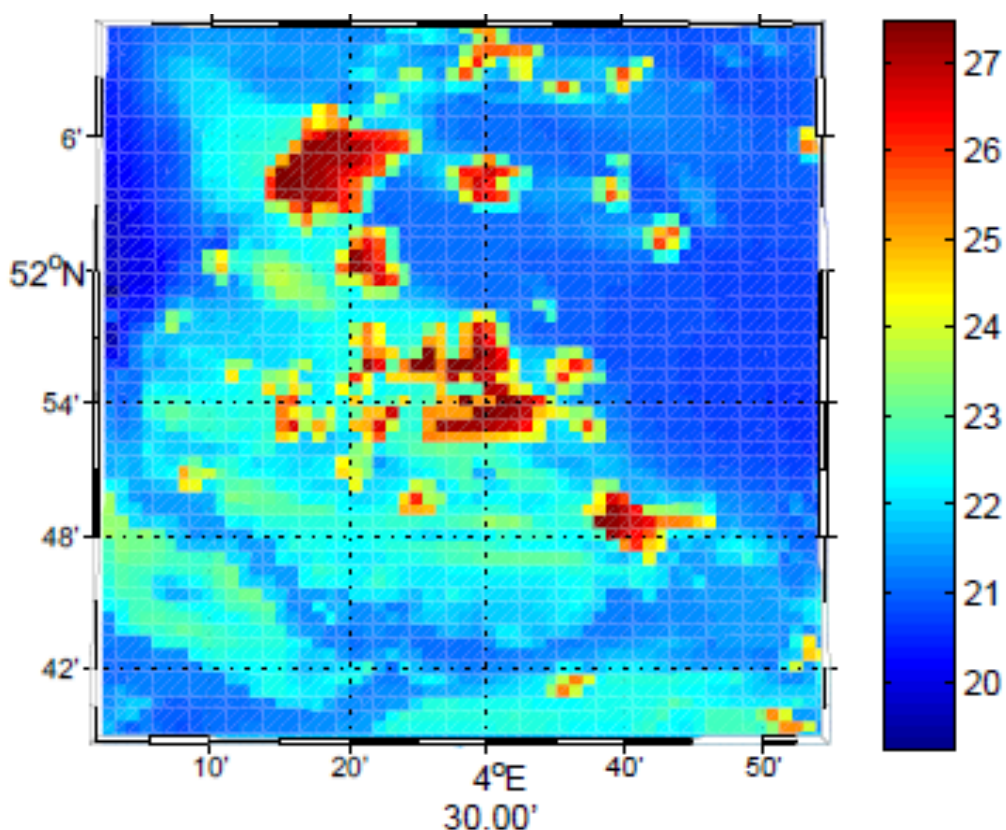


Figuur 2.3: Locaties weerstations in Rotterdam.

3. Resultaten

3.1 De ruimtelijke verdeling van de temperatuur

De onderstaande figuur geeft voor 20:00 UTC (22u00 Lokale tijd) op 6 augustus 2010 de temperatuur op screen level (2 m) weer voor alle cellen die onderdeel uitmaken van het fijnste rekenrooster. Voor de afgifte van warmte vanuit antropogene warmte in het model is de gemiddelde waarde van 38 W m^{-2} genomen. In de figuur zijn de steden (Dordrecht, Rotterdam, Delft, Den Haag en Zoetermeer) goed zichtbaar. In de stedelijke roosterpunten zijn temperaturen op screen level tot 27° Celsius berekend, terwijl de temperaturen in het rurale gebied aanmerkelijk lager zijn. Op 6 augustus was er sprake van een oostelijke wind. De figuur laat duidelijk de stadsinvloed op het gebied benedenwinds van de stad zien ('urban plume').



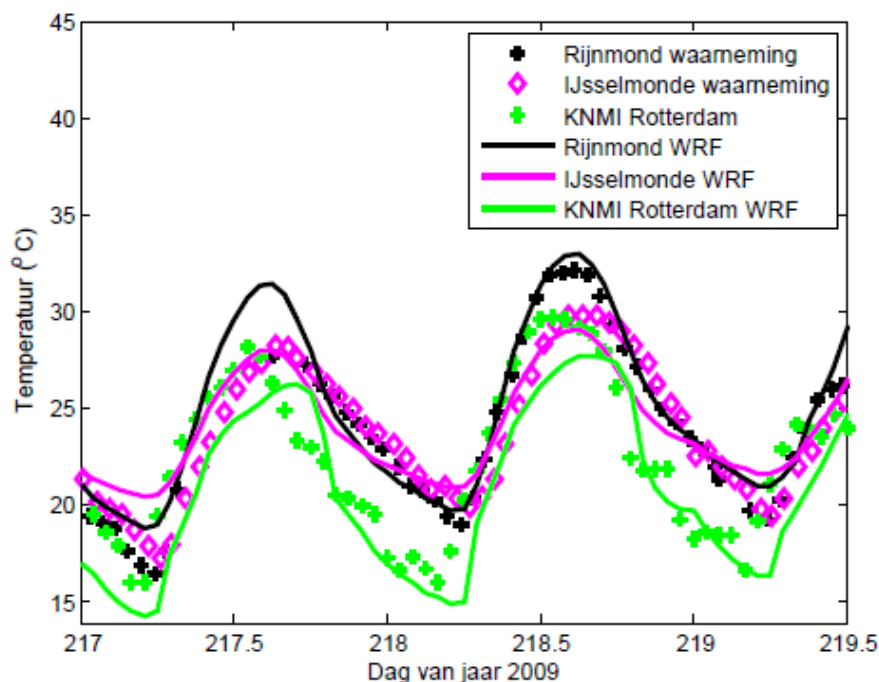
Figuur 3.1: Temperatuurverdeling in het binnenste rooster om UT 20:00 (22u00 LT). Temperaturen zijn in $^{\circ}$ Celsius.

3.2 Het dagelijks temperatuurverloop

Figuur 3.2 toont de gemeten temperaturen op de verschillende weerstations (KNMI Rotterdam, Rijnmond, IJsselmonde), en de gemodelleerde temperaturen voor die stations. De gemodelleerde temperaturen voor het KNMI weerstation zijn de temperaturen op screen level (2 m), terwijl voor de weerstations Rijnmond en

Ijsselmonde de street-canyon temperaturen zijn gemodelleerd (T_s in Figuur 2.1). Alle simulaties zijn uitgevoerd voor de gemiddelde antropogene warmte van 38 W m^{-2} voor het stedelijk gebied van Rotterdam.

WRF blijkt in staat om de waargenomen temperaturen door de weerstations in de stad goed te reproduceren. Voor het KNMI weerstation heeft het WRF model de neiging om de waargenomen temperatuur te onderschatten. Dit geldt met name in de ochtend en vroege middag. Later op de middag en tijdens de nacht berekent het WRF model ook voor het rurale gebied temperaturen die dichtbij de waargenomen temperaturen liggen.

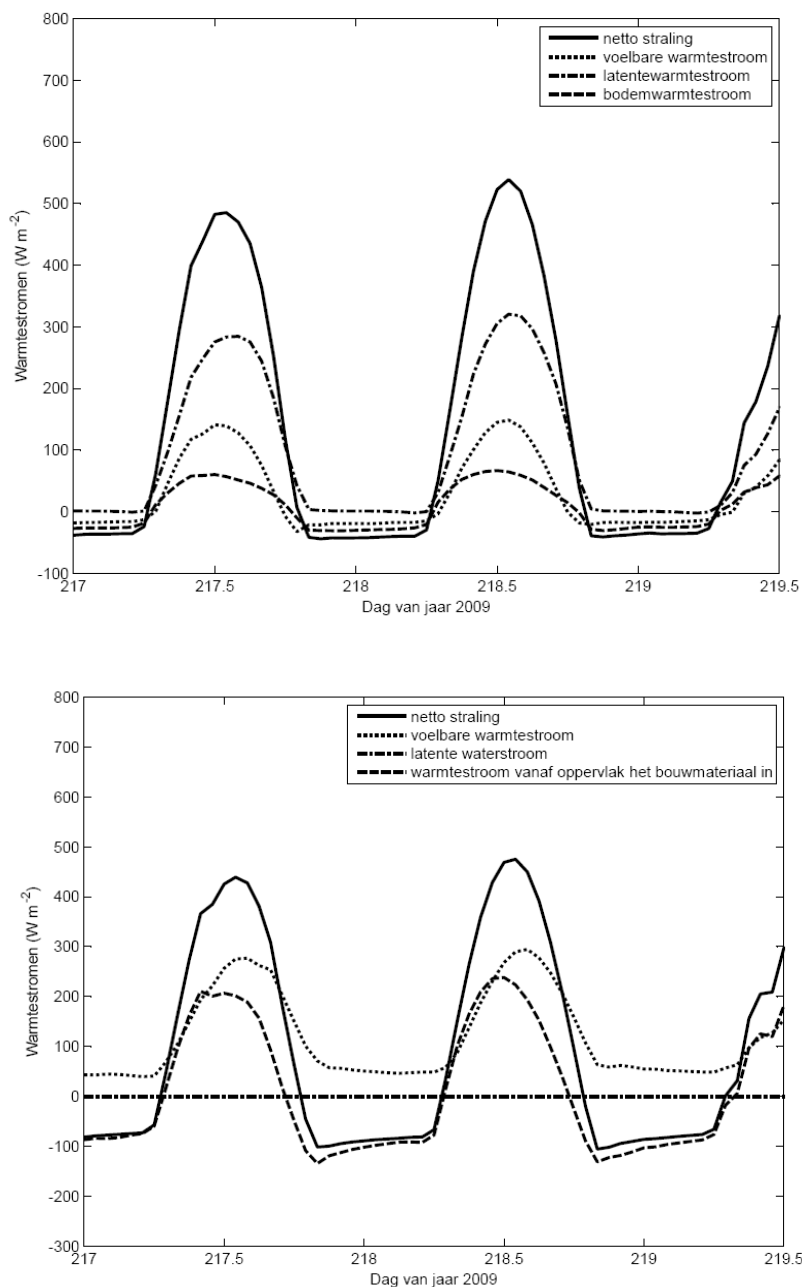


Figuur 3.2: Gemodelleerde en gemeten temperaturen als voor 5 augustus 2009 (Dag van jaar 2009 217), 6 augustus 2009 en 7 augustus 2009.

3.3 De energiebalans van het stedelijk gebied vs. landelijk gebied

Voor de locatie Ijsselmonde en locatie KNMI-Rotterdam laat Figuur 3.3 de verschillende termen van de oppervlakte-energiebalans zien zoals deze zijn berekend met behulp van WRF. Uit de figuur kan worden afgeleid dat de bebouwde omgeving gedurende de dag veel warmte opneemt. Deze opname leidt tot een warmtestroom vanuit het oppervlak naar het urbaan substraat die circa 200 W m^{-2} bedraagt. Gedurende de nacht wordt een deel van deze warmte weer vrijgegeven wat leidt tot een warmtestroom vanuit het oppervlak de lucht in van circa 100 W m^{-2} gedurende de nacht. In het rurale gebied is de opname van warmte door de bodem veel geringer. De opname (overdag) en afgifte (tijdens de nacht) van warmte door de bodem bedraagt ten hoogste 50 W m^{-2} . De berekende latente warmtestroom is in de stad gedurende zowel de dag als gedurende de nacht nihil. Daarentegen is er een aanzienlijke verdamping in het rurale gebied wat grotendeels kan worden toegeschreven aan de aanwezigheid van vegetatie. Ten gevolge hiervan bedraagt de

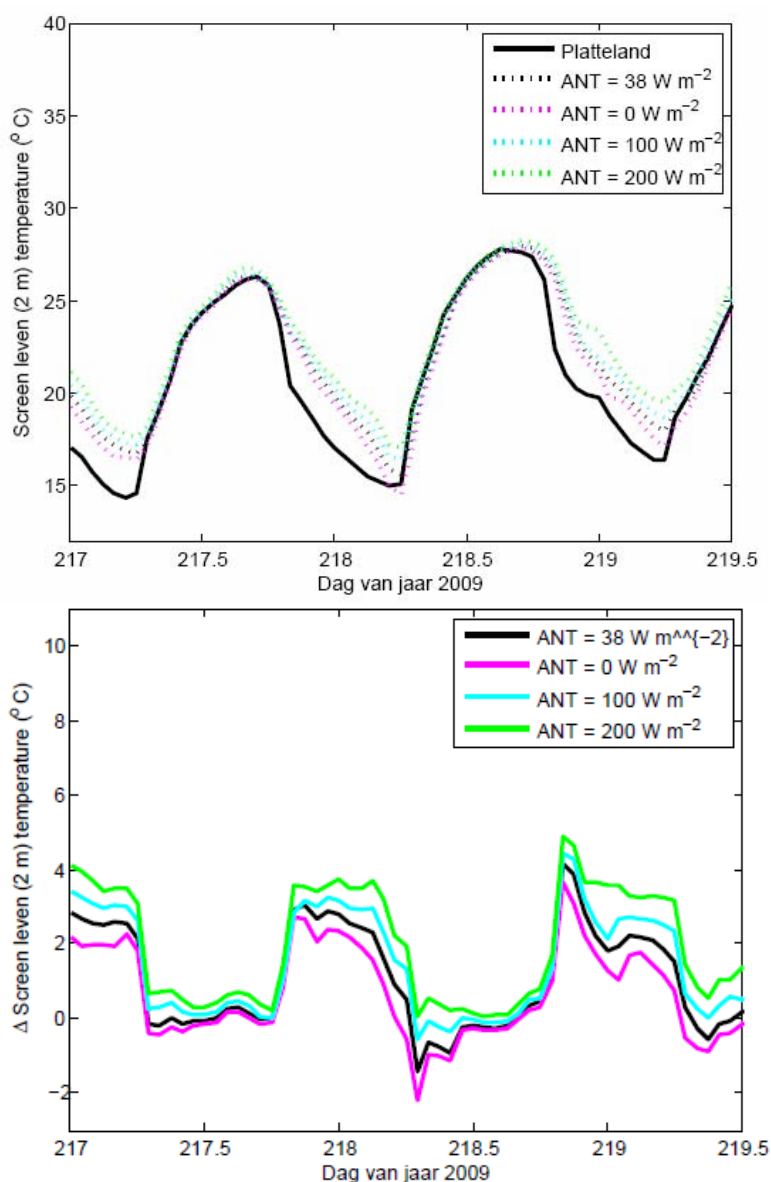
latente warmtestroom in het rurale gebied overdag circa 300 W m^{-2} . Door de grote verdamping in het rurale gebied, is de voelbare warmtestroom in het rurale gebied overdag veel kleiner dan die in de stad. Tijdens de nacht zijn voor zowel het rurale gebied als het stedelijk gebied de latente en voelbare warmtestromen klein. Dankzij de antropogene emissies van warmte blijft de voelbare warmtestroom ook tijdens de nacht in de stad positief. Dit betekent dat het stadsoppervlak de lucht ook tijdens de nacht de atmosfeer voorziet van voelbare warmte.



Figuur 3.3: Energiebalans van het oppervlak voor het stedelijk gebied ter plaatse van het waarnemingsstation IJsselmonde (boven) en die voor het rurale gebied ter plaatse van het KNMI waarnemingsstation Rotterdam (onder)

3.4 De invloed van antropogene warmte

Het effect van de antropogene warmte op de temperatuur op screen level (2 m) is berekend voor de locatie weerstation IJsselmonde. Voor de afgifte van antropogene warmte van 38 W m^{-2} berekent het model een extra temperatuurverhoging van ca. $0,5^\circ \text{ C}$. Echter, de studie van Klok et al. (2010) toont aan dat lokaal in Rotterdam de uitstoot van antropogene hoogte vele malen hoger kan zijn. Zo is de warmteproductie van industriële puntbronnen hoog: 820 W m^{-2} voelbare warmte op leefniveau en 300 W m^{-2} geëmitteerd uit schoorstenen. Indien voor alle gridcellen een antropogene warmte van 200 W m^{-2} wordt aangenomen, berekent het model een extra temperatuurverhoging van circa 2° C



Figuur 3.4: (Boven) Gemodelleerde screen level temperatuur ter plaatse van het KNMI waarnemingsstation Rotterdam en ter plaatse van het waarnemingsstation IJsselmonde voor de gemiddelde bepaalde antropogene warmte voor Rotterdam ($= 38 \text{ W m}^{-2}$), voor een antropogene warmte van 100 W m^{-2} en 200 W m^{-2} , en voor een simulatie waarin antropogene warmte = 0. (Onder) Gemodelleerde temperatuurverschil tussen de locatie IJsselmonde en de locatie KNMI weerstation.

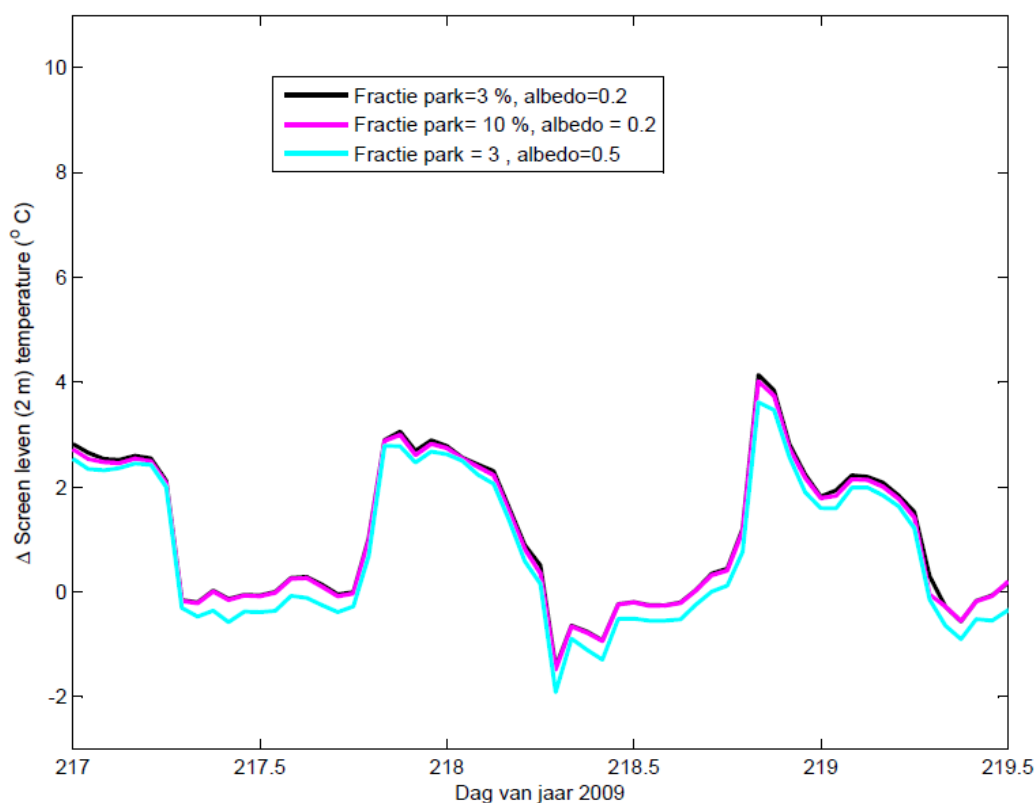
3.5 De invloed van albedo en groen

Naast de gevoeligheid voor de anthropogene warmte is ook onderzocht wat het effect is van het verhogen van de Albedo van het stedelijk gebied en het verhogen van de fractie groen in de stad op de UHI intensiteit. De onderstaande tabel geeft een overzicht van de uitgevoerde simulaties.

Tabel 3.1. Gebruikte parameters gebruikt voor de modelsimulaties met WRF om de invloed van albedo en groen te onderzoeken

Parameter	Waarde
Albedo	
Referentiewaarde	0.2
Verhoogde waarde	0.5
Fractie groen in stad	
Referentiewaarde	3 %
Verhoogde waarde	10 %

Figuur 3.5 laat de invloed zien van het veranderen van de fractie groen tot een waarde van 10 % en het veranderen van de albedo tot 0.5 voor de locatie waar zich het meetstation van de weeramateur IJsselmonde bevindt.



Figuur 3.5: Gemodelleerde 'screen level' temperatuurverschil tussen de locatie van het weerstation IJsselmonde en de locatie KNMI weerstation van Rotterdam, voor verschillende fracties groen (3 en 10%) en voor verschillende albedo's (0.2 en 0.5).

Uit de figuur blijkt dat het verhogen van de fractie groen van 3% (d.i. referentie) tot 10% nauwelijks leidt tot een verandering van de temperatuur op straatniveau ('screen level').

Daarentegen heeft het veranderen van de albedo van de stad een groter effect. De temperatuur op screen level wijkt voor de simulatie met de hogere albedo enkele tienden van graden af van de referentiesimulatie waarin de albedo voor het stedelijk gebied 0.2 is.

Bij het resultaat dienen echter de volgende kanttekeningen te worden geplaatst:

1. Het betreft eerste modelsimulaties; de gevoeligheid van het model voor groen, albedo en andere stadsparameters is nog onvoldoende getest.
2. Het resultaat van het temperatuureffect van bijvoorbeeld groen wordt door het model over 1 gridcell (1 x 1 km) uitgesmeerd; binnen deze gridcell kunnen de effecten van groen op het microklimaat veel groter zijn.

Bovenstaande onderwerpen komen o.a. aan bod in het project 'Climate Proof Cities' (2^{de} fase Kennis voor Klimaat).

4. Conclusies

- Het WRF model met de verbeterde versie van het Urban Canopy Model blijkt goed in staat te zijn om de temperaturen zoals die zijn waargenomen op twee weerstations in het stedelijk gebied van Rotterdam te simuleren. Het WRF model geeft echter een onderschatting van de temperaturen zoals deze zijn gemeten op het weerstation Rotterdam van het KNMI dat zich in het landelijk gebied ten noorden van Rotterdam bevindt. Deze onderschatting vindt met name plaats tijdens de ochtend en het begin van de middag. Aan het eind van de middag en tijdens de nacht stemmen de temperaturen zoals gesimuleerd met WRF goed overeen met de waargenomen temperaturen op weerstation Rotterdam van het KNMI.
- De resultaten bevestigen het beeld verkregen uit eerdere modelstudies en recente waarnemingen dat onder optimale weerscondities (heldere, warme dagen) de UHI intensiteit van Rotterdam en andere Nederlandse steden na zonsondergang aanzienlijk is. Bovendien laten de modelresultaten een duidelijke stadsinvloed zien op het gebied benedenwinds van de stad ('urban plume').
- Gedurende een heldere zomerse dag is de opname van warmte door de gebouwen aanzienlijk (circa 200 W m^{-2} , d.i. de helft van de netto straling). Gedurende de nacht wordt een deel van deze warmte weer vrijgegeven wat leidt tot warmtestroom vanuit het oppervlak de lucht in van circa 100 W m^{-2} gedurende de nacht. Dankzij de afgifte van warmte door antropogene emissies warmte blijft de voelbare warmtestroom ook tijdens de nacht in de stad positief i.e. vanuit het oppervlak de lucht in.
- De gemiddelde waarde voor de antropogene warmte voor Rotterdam van 38 W m^{-2} leidt tot een extra verhoging van de temperatuur op straatniveau van ca. $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Echter, lokaal kan de uitstoot van warmte vanuit antropogene bronnen vele malen hoger zijn. Deze studie toont aan dat een antropogene warmte van bijvoorbeeld 200 W m^{-2} leidt tot extra temperatuurverhoging van $2 \text{ }^\circ\text{C}$ op de locatie waar zich het waarnemingsstation IJsselmonde bevindt.
- In de eerste uitgevoerde modelsimulaties leidt het verhogen van de fractie groen van 3% tot 10 % nauwelijks tot een verandering van de temperatuur op straatniveau ('screen level'). Verhoging van de albedo van het stedelijk gebied tot 0,5 heeft meer effect en leidt tot een vermindering van het UHI effect van enkele tienden graden.

5. Referenties

Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model Implementation and Sensitivity. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 569-585.

Chen, F., and Coauthors, 2007: Description and evaluation of the characteristics of the NCAR high-resolution land data assimilation system. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **46**, 694-713.

Chen, F., and Coauthors, 2010: The integrated WRF/urban modeling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *Intern. J. Climatol.*, DOI: 10.1002/joc.2158.

Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sc.*, **46**, 3077-3107

Grell, G.A., and D. Devenyi, 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, **29(14)**, article 1693, DOI 10.1029/2002GL015311

Heusinkveld, B.G., L.W.A. van Hove, C.M.J. Jacobs, G.J. Steeneveld, J.A. Elbers, E.J. Moors, A.A.M. Holtslag 2010. Use of a mobile platform for assessing urban heat stress in Rotterdam. Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology. Albert-Ludwigs-University of Freiburg, Germany, 12-14 April 2010. 433-438. <http://www.meteo.uni-freiburg.de/forschung/publikatione/berichte/index.html>

Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with explicit treatment of entrainment processes. *Mon Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.

Klok, E.J., H. ten Broeke, T. van Harmelen, H. Verhagen, H. Kok, S. Zwart, 2010: Ruimtelijke verdeling en oorzaken van het hitte-eiland effect. TNO-rapport, Concept

Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura, 2001: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models. *Bound.-Layer Meteor.*, **101**, 329-358

Kusaka, H, and F. Kimura, 2004: Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: impact on urban hat island simulation for an idealized case. *J. Meteor. Soc. Jap.*, **82**, 67-80

Mlawer, E.J., S.J. Taubmann, P.D. Brown, M.J. Iacono, and S.A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102D**, 16 663 16 682

Skamarock, W.C., J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, W. Wang, and J.G. Powers, 2005: A description of the Advanced Research WRF version 2. NCAR Technical Note TN-468+STR, 88 pp.

Steenbergen, G-J en L.W.A. van Hove 2009. Een eerste inschatting van het Urban Heat Island effect voor Rotterdam en omgeving – een modelstudie. Tussentijdsrapport Heat stress in the city of Rotterdam project.

Dankwoord

In deze studie is gebruik gemaakt van waarnemingen zoals op meetstation Rotterdam uitgevoerd door het KNMI. Auteurs zijn KNMI erkentelijk voor het vrijgeven van deze gegevens. Daarnaast is in deze studie gebruik gemaakt van waarnemingen zoals deze zijn verricht door weeramateurs in Rijnmond en IJsselmonde. Auteurs zijn Willem van Duyn (IJsselmonde) en de weeramateur die het weerstation Rijnmond beheert, erkentelijk voor het beschikbaar stellen van deze gegevens via [www. wunderground.com](http://www.wunderground.com). Verder bedanken we Lissy Nijhuis en Jos Streng van de Gemeente Rotterdam voor de begeleiding van dit project.

Bijlage: Eigenschappen Nederlandse steden

	gebouwen parameters					berekende variabelen				d/h
	gebieds- opp. (km ²)	gem. hoogte (m)	totaal opp. (m ²)	totaal volume (m ³)	opp. muren (m ²)	gem. hoogte gewogen met opp.(m)	labda_p	labda_f	d (m)	
Tilburg*										
Grote uitsnede	6.4	8.5	2024165	17205403	7469205	8.5	0.32	0.29	6.1	0.72
Centrum	0.9	8.5	361427	3072130	908659	8.5	0.39	0.24	6.5	0.76
Breda										
Totaal		4.8								
Centrum	2.7	7.4	636384	3794891	2071061	6.0	0.24	0.19	3.9	0.66
Centrum_plus	27.3	7.4	4607431	22147028	12388976	4.8	0.17	0.11	2.9	0.60
Drechtsteden										
Zwijndrecht	1.5	4.6	388020	3139486	763743	8.1	0.25	0.12	5.4	0.67
Papendrecht	1.8	4.9	399076	3601908	766065	9.0	0.22	0.10	5.8	0.64
Dordrecht_centrum	1.1	10.0	372342	5018053	1423751	13.5	0.33	0.31	9.7	0.72
Uitsnede_drechten	35.7	6	5084798	46353181	10995581	9.1	0.14	0.08	5.2	0.57
Midden_Delftland										
Schipluiden	0.5	8.6	127048	1109589	298393	8.7	0.26	0.15	5.9	0.68
Midden_Delftland	0.5	8.5	121186	1031947	330476	8.5	0.23	0.16	5.6	0.66
Maasland	1.0	8.5	210412	1801844	587923	8.6	0.21	0.15	5.4	0.64
Rotterdam										
Centrum	3.5	12	1033468	15181408	4500431	14.7	0.30	0.32	10.3	0.70
Charlois	1.2	9.1	347075	3646411	1525221	10.5	0.30	0.33	7.4	0.70
Centrum groot	25.0	10.2	6008091	86248636	24677450	14.4	0.24	0.25	9.5	0.66

* aanname: alle gebouwen hebben een hoogte van 8.5 m