



**TNO-rapport**

**TNO-034-UT-2010-01229\_RPT-ML**

**Ruimtelijke verdeling en mogelijke oorzaken van  
het hitte-eiland effect**

**Milieu en Leefomgeving**  
Princetonlaan 6  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 30 256 42 56  
F +31 30 256 44 75  
[wegwijzer@tno.nl](mailto:wegwijzer@tno.nl)

Datum	7 juli 2010
Auteur(s)	Lisette Klok*, Harm ten Broeke*, Toon van Harmelen*, Henk Verhagen*, Herman Kok*, Sander Zwart◇  * TNO Bouw en Ondergrond, Utrecht ◇ Waterwatch BV, Wageningen
Opdrachtgever	Dit onderzoekproject werd uitgevoerd in het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat ( <a href="http://www.kennisvoorklimaat.nl">www.kennisvoorklimaat.nl</a> ). Dit onderzoekprogramma wordt medegefinancierd door het Ministerie van VROM.
Projectnummer	034.21618
Aantal pagina's	78
Aantal bijlagen	3

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke 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 onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

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



## Samenvatting

Dit rapport beschrijft de ruimtelijke verdeling van het stedelijk hitte-eiland effect in Rotterdam en de mogelijke oorzaken. De ruimtelijke verdeling van het stedelijk hitte-effect is voor zomerse dagen in kaart gebracht op grond van satellietbeelden (thermisch infrarood opnames) die overdag zijn genomen. Uit deze beelden is de oppervlaktetemperatuur afgeleid. Hieruit is vastgesteld dat het oppervlakte hitte-eiland van Rotterdam overdag kan oplopen tot 10 °C. Daarnaast is uit een reeks van satellietgegevens die zowel overdag als 's nachts tijdens een hittegolfperiode zijn opgenomen de dagelijkse variatie in het hittepatroon bestudeerd. Wijken die overdag het warmst zijn verschillen van de wijken die 's nachts het warmst zijn.

Het ruimtelijke patroon in de oppervlaktetemperatuur van Rotterdam is vervolgens gekoppeld aan mogelijke oorzaken van het hitte-eiland effect. De oorzaken zijn hierbij gesplitst in statische en dynamische veroorzakers. Statische veroorzakers zijn hittefactoren die inspelen op gebiedskenmerken zoals groen, water, wegen, gebouwen en stedelijke materialen. Deze factoren zijn op grond van geografische gegevens voor Rotterdam per buurt gekwantificeerd en in verband gebracht met de ruimtelijke verdeling in de oppervlaktetemperatuur. 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 Rotterdam is een inventarisatie gemaakt van de antropogene warmtebronnen die mogelijk bijdragen aan het stedelijk hitte-effect.

Gebiedskenmerken die de ruimtelijke variatie in de oppervlaktetemperatuur verklaren zijn voornamelijk gerelateerd aan groen, verharding, bebouwing, gebouwhoogte, en de materiaaleigenschappen zoals albedo en emissiviteit. Een statistische analyse tussen de buurtgemiddelde oppervlaktetemperaturen van Rotterdam en deze kenmerken toont significante relaties aan. Vermindering van het verharde oppervlak en het uitbreiden van het totale of openbare groengebied verlaagt de buurtgemiddelde oppervlaktetemperatuur. Het effect ligt in de orde van 1°C wanneer het percentage verharde of groenoppervlak verandert met 10%. Een verhoging van de buurtgemiddelde albedo of emissiviteit met 0,01 door het gebruik van andere oppervlaktmaterialen heeft een verlagend effect op de oppervlaktetemperatuur overdag van respectievelijk 0,8 en 1,7 °C.

De conclusies naar aanleiding van de inventarisatie van antropogene warmtebronnen in Rotterdam betreffen warmtebelasting op drie schaalniveaus, te weten de stad, de straat en het gebouw. Strikt genomen betreft het hitte-eiland effect alleen het buitenklimaat, dus de stad en de straat. Echter, hittestress treedt ook op als gevolg van hoge temperaturen in gebouwen waar mensen het overgrote deel van de tijd verblijven. Daarom is dit gebouwniveau meegenomen in de analyse.

De totale warmteproductie van de stad Rotterdam is gemiddeld over het gemeenteoppervlak 38 W/m<sup>2</sup>, waarvan 22 W/m<sup>2</sup> vrijkomt in de vorm van voelbare warmte op leefniveau. Het overige deel betreft energie die in de vorm van vocht in de lucht zit en dus niet direct voelbaar is. De industriële puntbronnen stoten verreweg de meeste warmte uit: 31 W/m<sup>2</sup>. Hierbij moet opgemerkt worden dat het gros van de industrie in een gebied is gelegen waar zeer weinig bevolking woont. Verkeer produceert 5 W/m<sup>2</sup> gemiddeld over Rotterdam. Warmteproductie als gevolg van

energiegebruik in woningen bedraagt minder dan  $2 \text{ W/m}^2$ . Zelfs als elke woning in Rotterdam een airco zou krijgen, zou de warmteproductie minder bedragen dan  $3 \text{ W/m}^2$ , een toename met 30%. De antropogene warmteproductie in Rotterdam is laag vergeleken bij andere wereldsteden die een sterk hitte-eilandeffect vertonen zoals Amerikaanse steden (meer dan  $60 \text{ W/m}^2$ ) en Tokyo (meer dan  $200 \text{ W/m}^2$ ). Daarom is de voorlopige conclusie dat de bijdrage van antropogene warmteproductie aan de stijging van de buitentemperatuur niet groot zal zijn. De exacte bijdrage aan het temperatuureffect zal op stadsniveau nader onderzocht worden met het mesoschaal meteorologisch model van de WUR.

Lokaal gezien en dicht in de buurt van warmtebronnen op straat of in gebouwen kan de warmtebelasting hoger zijn de hiervoor genoemde waarden. De warmteproductie van de puntbronnen op bedrijventerreinen zou in die zin belangrijk kunnen zijn voor de temperatuur daar en de productiviteit van de werknemers op de terreinen. Het exacte temperatuureffect van de antropogene warmteproductie zou in een vervolgonderzoek met microschaal klimaatmodellering onderzocht moeten worden. Ook in gebouwen kan de hittebelasting groter zijn dan buiten gebouwen, helemaal als bedacht wordt dat de verblijftijd in gebouwen relatief groot is. Hierbij dienen we ons te realiseren dat deze warmte niet gemakkelijk weg kan maar in de ruimte blijft hangen en zich over de dagen kan ophopen.

# Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting.....</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Introductie.....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Hittekaarten van Rotterdam op grond van satellietbeelden.....</b>	<b>9</b>
2.1	Inleiding.....	9
2.2	Satellietdata en methode.....	10
2.3	Resultaten.....	14
2.4	Conclusies.....	23
<b>3</b>	<b>Statische oorzaken: gebiedskenmerken.....</b>	<b>25</b>
3.1	Inleiding.....	25
3.2	Data en methode.....	25
3.3	Resultaten.....	28
3.4	Conclusies.....	36
<b>4</b>	<b>Dynamische oorzaken: antropogene warmtebronnen.....</b>	<b>39</b>
4.1	Inleiding.....	39
4.2	Bronnen van antropogene warmte en aanpak.....	39
4.3	Industriële warmteproductie.....	41
4.4	Warmteproductie door het wegverkeer in Rotterdam.....	46
4.5	Warmteproductie door inwoners in gebouwen.....	55
4.6	Antropogene warmte en het effect op de temperatuur.....	66
4.7	Conclusies antropogene warmte.....	68
<b>5</b>	<b>Referenties.....</b>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>Dankwoord.....</b>	<b>75</b>
<b>7</b>	<b>Verantwoording.....</b>	<b>77</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
	A Karakteristieken van postcodegebieden in Rotterdam	
	B Categorieën energiegebruik door inwoners	
	C Vergelijking van resultaten met eerder onderzoek voor Rotterdam	



# 1      **Introductie**

Dit rapport beschrijft de ruimtelijke verdeling van het stedelijk hitte-eiland effect in Rotterdam. De ruimtelijke verdeling van het stedelijk hitte-effect is voor zomerse dagen in kaart gebracht op grond van satellietbeelden (thermisch infrarood opnames) die overdag zijn genomen. Uit deze beelden is een gemiddelde oppervlaktetemperatuur afgeleid. De oppervlaktetemperatuur van Rotterdam geeft informatie over de gebieden die gevoelig zijn voor extreme warmte. Daarnaast is uit een reeks van satellietgegevens die zowel overdag als 's nachts tijdens een hittegolfperiode zijn opgenomen de dagelijkse variatie in het hittepatroon bestudeerd. Hieruit zijn conclusies getrokken voor de hittegevoeligheid van de Rotterdamse wijken.

Het ruimtelijke patroon in de oppervlaktetemperatuur van Rotterdam is vervolgens gekoppeld aan mogelijke oorzaken van het hitte-eiland effect. De oorzaken en veroorzakers zijn hierbij gesplitst in statische en dynamische veroorzakers. Statische veroorzakers zijn hittefactoren die inspelen op landgebruik en landbedekking, en betreffen gebiedskenmerken zoals groen, water, wegen, gebouwen en stedelijke materialen. Deze factoren zijn voor Rotterdam per buurt gekwantificeerd op grond van geografische gegevens en in verband gebracht met de ruimtelijke verdeling van de oppervlaktetemperatuur. Daarnaast zijn gemiddelde oppervlaktetemperaturen voor de verschillende stedelijke gebiedstypen in Rotterdam bepaald.

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 Rotterdam is een inventarisatie gemaakt van de antropogene warmtebronnen die mogelijk bijdragen aan het stedelijk hitte-effect. De relevantie van deze bijdragen voor het hitte-eilandeffect in Rotterdam wordt tenslotte bediscussieerd.





## 2 Hittekaarten van Rotterdam op grond van satellietbeelden

### 2.1 Inleiding

Op grond van thermisch infraroodbeelden afkomstig van satellieten kan de temperatuurverloop tussen verschillende buurten en wijken en ten opzichte van het omliggende platteland in kaart worden gebracht. Dit type onderzoek is voor veel Nederlandse steden nog niet eerder uitgevoerd. Rotterdam is de eerste stad waarbij op deze manier het stedelijk hitte-eiland in kaart is gebracht. De resultaten hiervan zullen in dit hoofdstuk in een aantal hittekaarten worden gepresenteerd.

Thermische infraroodbeelden geven informatie over de temperatuur van het oppervlak: de oppervlaktetemperatuur. Het voordeel van het gebruik van satellietbeelden voor de bepaling van het stedelijk hitte-effect is dat een gebiedsdekkend inzicht wordt verkregen in de ruimtelijke variatie in de oppervlaktetemperatuur. Dit is een voordeel ten opzichte van het gebruik van temperatuurmetingen van weerstations, waarbij alleen op een aantal locaties in de stad de luchttemperatuur wordt gemeten. Uit thermisch infraroodbeeld wordt duidelijk welke wijken of delen van de stad de hoogste oppervlaktetemperaturen kennen en welke wijken daarom het gevoeligst zijn voor het hitte-eiland effect.

Thermische infraroodbeelden geven de oppervlaktetemperatuur weer en niet de luchttemperatuur. Deze oppervlaktetemperatuur representeert de temperatuur van het gras, de daken, wegen, gebouwen en vegetatie, etc. De oppervlaktetemperatuur verschilt van de luchttemperatuur, maar is wel gekoppeld aan de luchttemperatuur door verschillende uitwisselingsprocessen van energie, die samen de energiebalans vormen. De relatie tussen oppervlakte- en luchttemperatuur wordt later in dit hoofdstuk (§2.3.3) geïllustreerd.

Satellietbeelden hebben een resolutie die geschikt is om oppervlaktetemperaturen op wikschaal en stedelijke schaal in beeld te brengen. Het is met deze beelden niet mogelijk om de temperatuur van afzonderlijke wegen, gebouwen, daken, en kleine groen- en waterelementen (< 60 m) te identificeren. Voor dit gedetailleerdere schaalniveau kunnen thermisch infrarood opnames met vliegtuigjes worden gebruikt.

Normaalgesproken wordt de intensiteit van het stedelijk hitte-eiland bepaald door het verschil in de luchttemperatuur tussen stad en platteland. In het Engels is dit de *urban heat island intensity (UHI)*. Echter, doordat in dit onderzoek de oppervlaktetemperaturen bepaald worden, zal de intensiteit van het hitte-eiland van Rotterdam worden afgeleid uit de oppervlaktetemperaturen: het oppervlakte hitte-eiland. Dit is het verschil in de oppervlaktetemperatuur tussen de stad en het omliggende platteland. In het Engels heet dit de *surface heat island intensity (SHI)*.

De hittekaarten die in dit hoofdstuk worden getoond, zijn afgeleid uit verschillende satellietbeelden. Omdat hittestress optreedt in de zomer, zijn alleen satellietbeelden onderzocht die tijdens zomerse dagen zijn genomen. De ruimtelijke variatie in de oppervlaktetemperatuur van Rotterdam is voor de situatie overdag bepaald op grond van 15 Landsatbeelden (zie §2.2). Daarnaast is ook onderzocht hoe de dagelijkse variatie in de oppervlaktetemperatuur verloopt voor verschillende Rotterdamse wijken.

Hierdoor ontstaat inzicht in het verschil in het stedelijk hitte-effect overdag en 's nachts. Dit is gedaan voor een hittegolfperiode in 2006 op grond van een serie NOAA-AVHRR satellietbeelden (zie §2.2).

## 2.2 Satellietdata en methode

Er zijn verschillende satellieten die metingen uitvoeren in het infrarode spectrum, waaruit oppervlaktetemperaturen kunnen worden bepaald. De satelliet Landsat Thematic Mapper (Landsat TM) voert al infraroodmetingen uit sinds 1984, en tussen 1999 en 2003 heeft de vergelijkbare Landsat Enhanced Thematic Mapper satelliet (Landsat ETM) metingen uitgevoerd. De ruimtelijke resolutie van Landsat TM is 120 bij 120 m en deze is verbeterd naar 60 bij 60 m voor Landsat ETM. Landsat satellieten maken eenmaal in de 16 dagen een opname, en dit gebeurt rond het middaguur.

Voor de analyse van het hitte-eiland van Rotterdam zijn uit de periode tussen 1984 en 2007 15 Landsatbeelden geselecteerd (Tabel 1). De beelden zijn genomen rond het middaguur op een aantal wolkenloze zomerdagen in de maanden juni, juli of augustus. De beelden zijn geometrisch gecorrigeerd naar het Nederlandse Rijksdriehoekstelsel en de spectrale radiantie is afgeleid met behulp van de radiometrische calibratiefactoren die voor elke Landsatsensor bekend zijn. De beelden zijn vervolgens omgezet naar een resolutie van 30 bij 30 m. Om de oppervlaktetemperatuur uit de spectrale radiantie te kunnen bepalen, moet de emissiviteit (vermogen van een materiaal om geabsorbeerde energie uit te kunnen stralen) van het oppervlak bekend zijn. Deze is geschat op grond van een vegetatie index, de NDVI, die de "groenheid" van het oppervlak weergeeft (Tucker, 1979), en een relatie tussen de emissiviteit en de NDVI van Van Griend en Owe (1992). Vervolgens zijn de oppervlaktetemperaturen afgeleid met behulp van de wet van Planck en is uit de 15 temperatuurbeelden een gemiddelde oppervlaktetemperatuur bepaald.

Om het dagpatroon in de oppervlaktetemperatuur te analyseren zijn NOAA-AVHRR beelden gebruikt. Deze zijn beschikbaar gesteld door Instituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale in Triest, Italië. Het NOAA systeem bevat meerdere satellieten die zowel overdag als 's nachts opnames maken. De ruimtelijke resolutie van deze beelden varieert van 1,1 bij 1,1 km tot 4 bij 4 km aan de randen van de beelden. Dat is een veel lagere resolutie dan de Landsatbeelden. Echter, het voordeel van NOAA-AVHRR is dat het systeem meerdere opnames per dag kan maken. 42 wolkenvrije NOAA-AVHRR beelden zijn voor de analyse geselecteerd (zie Tabel 2) uit een periode van vijf dagen uit de recentste Nederlandse hittegolfperiode. Deze vond plaats van 15 tot 30 juni 2006. De beelden komen van de NOAA 12, 14, 15, 17 en 18 sensoren. Alle beelden zijn omgerekend naar een resolutie van 1 bij 1 km. Vervolgens is dezelfde procedure als voor de Landsatbeelden gebruikt om de metingen om te zetten naar oppervlaktetemperaturen

Tabel 1 Landsatbeelden gebruikt in het onderzoek. De daggemiddelde (T<sub>24</sub>) en de maximum (T<sub>max</sub>) luchttemperaturen gemeten op vliegveld Zestienhoven zijn ook vermeld.

<i>sensor</i>	<i>datum</i>	<i>tijdstip</i>	T <sub>24</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)
Landsat TM	20/08/84	12:10	21,5	27,8
Landsat TM	23/06/86	12:03	19,3	26,7
Landsat TM	03/08/86	11:55	19,2	27,8
Landsat TM	10/08/86	12:01	17,2	23,3
Landsat TM	05/07/87	11:58	20,9	25,8
Landsat TM	25/06/95	11:39	17,2	24,3
Landsat TM	12/08/95	11:37	22,2	29,4
Landsat ETM	01/08/00	12:25	20,7	27,9
Landsat ETM	24/08/00	12:31	15,7	23,3
Landsat ETM	03/07/01	12:23	21,1	26,3
Landsat ETM	29/07/02	12:28	24,5	30,6
Landsat TM	27/06/05	12:27	17,9	23,8
Landsat TM	30/08/05	12:28	19,1	25,0
Landsat TM	16/07/06	12:32	16,5	29,2
Landsat TM	04/08/07	12:33	19,6	25,1

Tabel 2 NOAA-AVHRR beelden en opnametijdstippen.

<i>datum</i>	<i>tijdstip</i>	<i>datum</i>	<i>tijdstip</i>	<i>datum</i>	<i>tijdstip</i>	<i>datum</i>	<i>tijdstip</i>
15-Jul	04:25	16-Jul	11:55	17-Jul	17:46	19-Jul	03:43
15-Jul	06:57	16-Jul	12:19	18-Jul	03:54	19-Jul	06:59
15-Jul	08:47	16-Jul	14:07	18-Jul	07:23	19-Jul	07:12
15-Jul	12:08	16-Jul	17:59	18-Jul	07:35	19-Jul	11:16
15-Jul	12:42	17-Jul	04:04	18-Jul	11:29	19-Jul	12:50
15-Jul	14:17	17-Jul	07:48	18-Jul	13:13	19-Jul	13:36
15-Jul	18:33	17-Jul	07:59	18-Jul	13:46	19-Jul	15:17
15-Jul	22:29	17-Jul	11:42	18-Jul	15:27	19-Jul	18:25
16-Jul	04:14	17-Jul	11:56	18-Jul	18:50	19-Jul	18:38
16-Jul	08:13	17-Jul	13:56	18-Jul	19:02		
16-Jul	08:23	17-Jul	17:34	18-Jul	23:00		

Uit de Landsat en NOAA-AVHRR beelden zijn gemiddelde oppervlaktetemperaturen voor de 22 wijken van Rotterdam bepaald. De wijken van Rotterdam zijn in Figuur 1 weergegeven. In deze wijkgemiddelde temperaturen zijn de wateroppervlakken (op grond van een TOP10 GIS bestand van Rotterdam) zoals plassen, havens, rivieren, en Noordzee niet meegenomen, omdat de gemiddelde oppervlaktetemperatuur van wijken met veel water anders te veel bepaald zou worden door de watertemperatuur. Hierdoor zou de wijkgemiddelde oppervlaktetemperatuur niet representatief zijn voor de temperatuur van het bebouwde gebied. Voor de NOAA-AVHRR beelden was het niet mogelijk watergebieden uit de analyse te filteren, omdat de resolutie van deze beelden te grof is. Hierdoor bevatten de wijkgemiddelde oppervlaktetemperaturen van deze beelden wel een temperatuursignaal dat afkomstig is van het water.

Uit de Landsat temperatuurkaart is de intensiteit van het oppervlakte hitte-eiland berekend als het temperatuurverschil tussen de wijkgemiddelde oppervlaktetemperatuur en een gemiddelde oppervlaktetemperatuur van het omliggende platteland. Deze laatste is bepaald uit het gemiddelde van 19 geselecteerde groengebieden, voornamelijk weilanden, in de omgeving van Rotterdam (zie Figuur 1). Voor de NOAA-AVHRR beelden was het vanwege de lage resolutie niet mogelijk om dezelfde gebieden te gebruiken voor een representatieve temperatuur van het omliggend platteland. Daarvoor in de plaats is het temperatuurverschil ten opzichte van de gemiddelde oppervlaktetemperatuur van Hoek van Holland genomen, zijnde een relatief groene wijk.



1 Botlek/Europoort/Maasvlakte	9 Spaanse Polder	17 Bedrijventerrein Schieveen
2 Hoek v. Holland	10 Stadscentrum	18 Feijnoord
3 Vondelingenplaat	11 Noord	19 Bedrijvenpark R'dam NW
4 Hoogvliet	12 Kralingen-Crooswijk	20 Heijplaat
5 Pernis	13 IJsselmonde	21 Charlois
6 Eem-Waalhaven	14 Prins Alexander	22 Overschie
7 Nieuw Mathenesse	15 Rivium	
8 Delfshaven	16 Hillegersberg/Schiebroek	

Figuur 1 Onderverdeling van de Gemeente Rotterdam in wijken en de groengebieden (groen gearceerde vlakken) die de gemiddelde oppervlaktetemperatuur van het omliggende platteland bepalen.

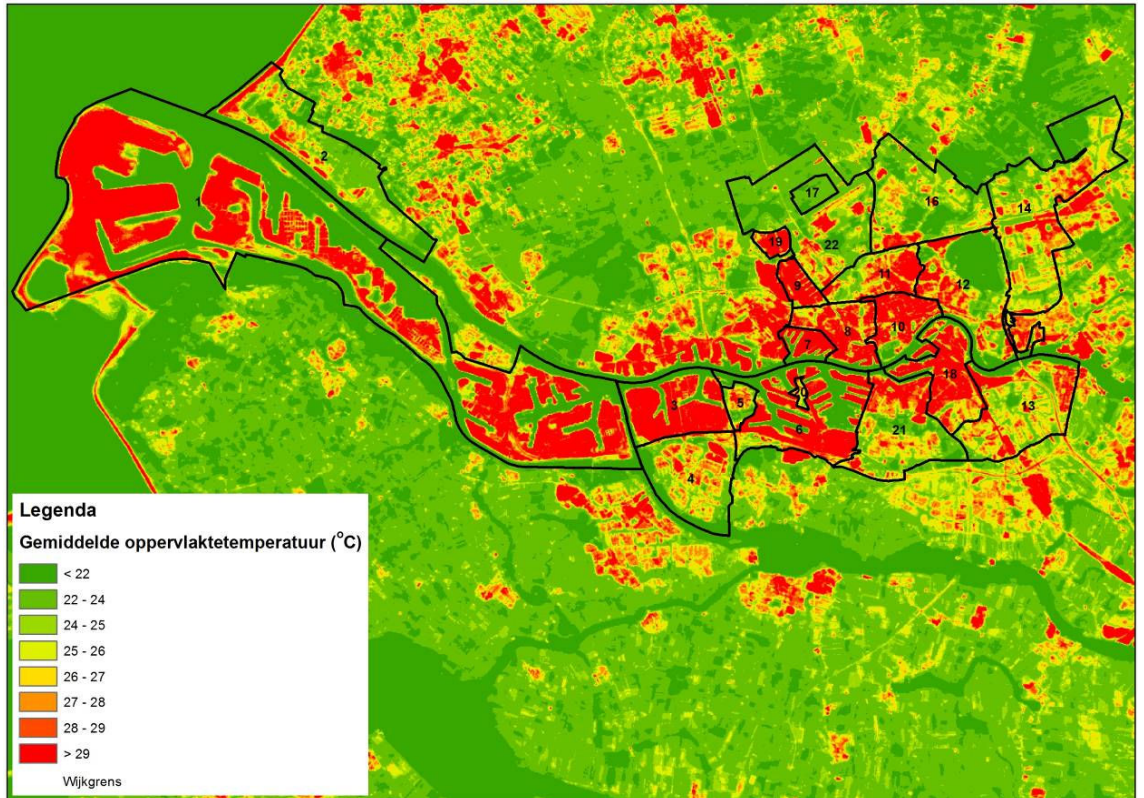
## 2.3 Resultaten

### 2.3.1 Landsat hittekaarten (overdag voor een zomerse dag)

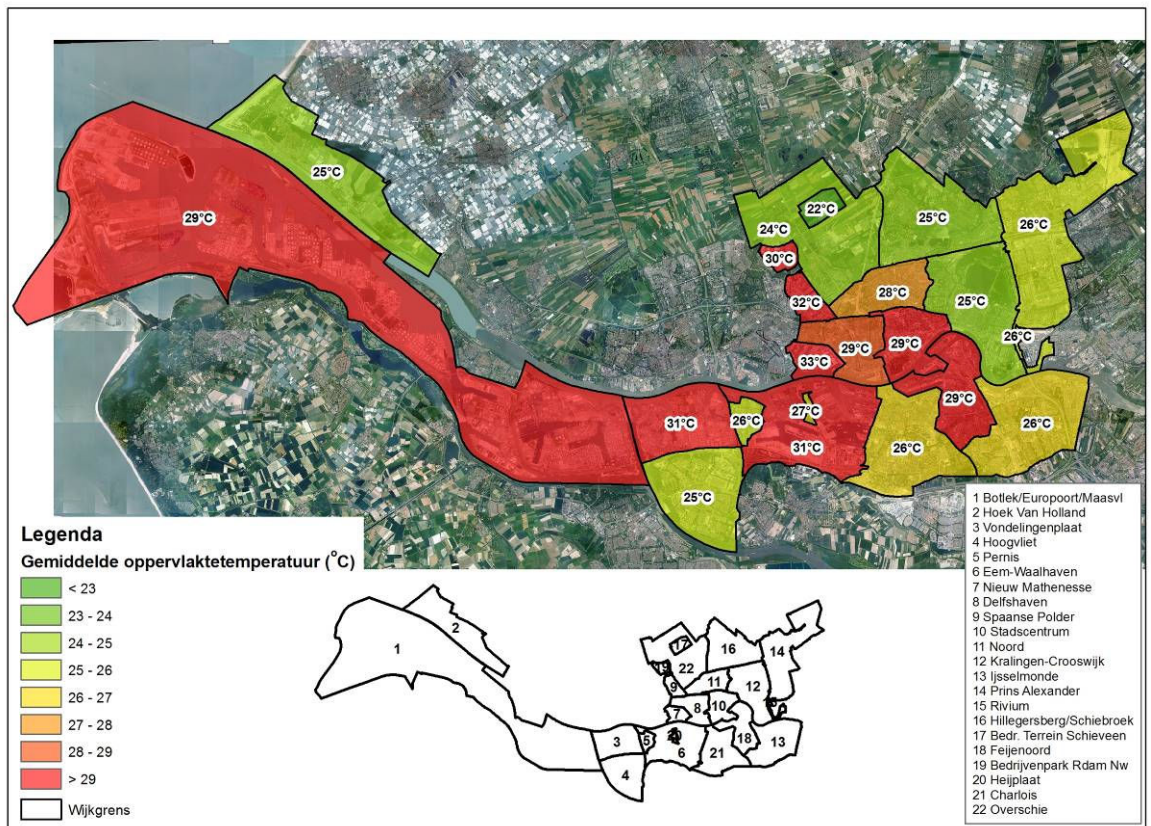
Een kaart met de gemiddelde oppervlaktetemperatuur van Rotterdam afgeleid uit de 15 Landsatbeelden is opgenomen in Figuur 2. Uit deze kaart is heel duidelijk het stedelijk gebied te herkennen. De wateroppervlakken zijn het koelst, gevolgd door weide- en akkerbouwgebieden. Vooral industriegebieden en dichtbebouwde gebieden in het centrum van Rotterdam vertonen hogere oppervlaktetemperaturen. De gemiddelde oppervlaktetemperatuur van het water is rond de 20 °C, terwijl de warmste zwarte daken in het gebied een gemiddelde oppervlaktetemperatuur van meer dan 38 °C vertonen.

Figuur 3 toont de gemiddelde oppervlaktetemperatuur voor elk van de 22 Rotterdamse wijken. Het verschil tussen deze wijktemperaturen en de gemiddelde oppervlaktetemperatuur van de 19 groengebieden uit de omgeving van Rotterdam (23,1 °C) is een maat voor het oppervlakte hitte-eiland. Deze staan in Tabel 3 opgenomen. Uit deze tabel is af te leiden dat Nieuw Mathenesse, Spaanse Polder en Vondelingenplaat de hoogste oppervlaktetemperaturen kennen die meer dan 8 °C verschillen van de oppervlaktetemperatuur van het omliggende platteland. De koelste wijken zijn Kralingen-Crooswijk, Hoek van Holland, Hillegersberg/Schiebroek, Overschie en Bedrijventerrein Schieveen met oppervlaktetemperaturen die minder dan 2 °C afwijken van het omliggende platteland. De oppervlaktetemperatuur van het centrum van Rotterdam verschilt 6 °C met het omliggende platteland. Tabel 3 laat ook de standaarddeviatie in de oppervlaktetemperatuur zien. Dit is een maat voor de ruimtelijke variatie in de oppervlaktetemperatuur binnen de wijken. De wijken Rivium en Bedrijventerrein Schieveen hebben een kleine standaarddeviatie, en Eem-Waalhaven en Kralingen-Crooswijk een grote. De variatie in de oppervlaktetemperatuur van deze laatste twee wijken zal daarom groter zijn.





Figuur 2 Gemiddelde oppervlaktetemperatuur overdag van Rotterdam gebaseerd op de 15 Landsatbeelden (Tabel 1), omgezet naar een resolutie van 30 m.



Figuur 3 Gemiddelde oppervlaktetemperatuur overdag van de 22 Rotterdamse wijken gebaseerd op de 15 Landsatbeelden (Tabel 1) geprojecteerd op een luchtfoto van het gebied.

Tabel 3 Gemiddelde oppervlaktetemperatuur overdag van de 22 Rotterdamse wijken gebaseerd op de 15 Landsatbeelden (Tabel 1) gerangschikt van warm naar relatief koel met standaarddeviatie en de berekende intensiteit van het oppervlakte hitte-eiland. Deze laatste is bepaald als het verschil tussen de gemiddelde oppervlaktetemperatuur van de betreffende wijk en de oppervlaktetemperatuur van de 19 geselecteerde groengebieden uit de omgeving van Rotterdam (23,1 °C).

<i>Wijknaam</i>	<i>Gemiddelde oppervlakte-temperatuur (°C)</i>	<i>Standaard deviatie (°C)</i>	<i>Hitte-eiland intensiteit (°C)</i>
Nieuw Mathenesse	32,9	2,4	9,9
Spaanse Polder	32,1	3,6	9,1
Vondelingenplaat	31,1	2,5	8,1
Eem-Waalhaven	30,6	3,7	7,6
Bedrijvenpark Rotterdam NW	29,7	2,7	6,6
Botlek/Europoort/Maasvlakte	29,4	3,4	6,3
Feijenoord	29,3	2,4	6,2
Stadscentrum	29,2	3,0	6,2
Delfshaven	29,0	2,2	5,9
Noord	27,7	3,0	4,6
Heijplaat	26,5	1,7	3,5
IJsselmonde	26,5	2,8	3,4
Charlois	26,1	3,1	3,1
Rivium	26,0	0,7	2,9
Pernis	25,6	2,5	2,5
Prins Alexander	25,6	2,4	2,5
Hoogvliet	25,5	2,9	2,4
Kralingen-Crooswijk	25,0	3,7	1,9
Hoek van Holland	24,7	2,7	1,7
Hillegersberg/Schiebroek	24,7	2,4	1,6
Overschie	24,1	2,5	1,1
Bedrijventerrein Schieveen	22,4	0,4	-0,6

### 2.3.2 NOAA-AVHRR hittekaarten (dag-nacht patroon tijdens een hittegolfperiode)

De NOAA-AVHRR opnamen tijdens de hittegolfperiode van 2006 laten zien dat wijken die overdag het warmst zijn, niet 's nachts ook het warmst zijn (Figuur 4). Deze informatie is interessant in het kader van te nemen maatregelen tegen hittestress. Als hittestress voornamelijk 's nachts optreedt, dan laat deze analyse zien dat er vermoedelijk in andere wijken maatregelen genomen zouden moeten worden dan wanneer hittestress gerelateerd is aan hitte overdag. Hittestress moet dus scherp gedefinieerd worden.

De temperatuurverschillen tussen de warmste en koelste wijken gedurende deze hittegolfperiode lopen op tot 12 °C overdag en 9 °C 's nachts. Deze spreiding komt ook overeen met de variatie in de gemiddelde oppervlaktetemperatuur tussen de wijken bepaald voor zomerse dagen uit de 15 Landsatbeelden in het vorige hoofdstuk. Hoek van Holland is zowel overdag als 's nachts de koelste locatie. De ligging nabij zee speelt hierin een rol, maar ook het hoge percentage groen in dit gebied (zie ook

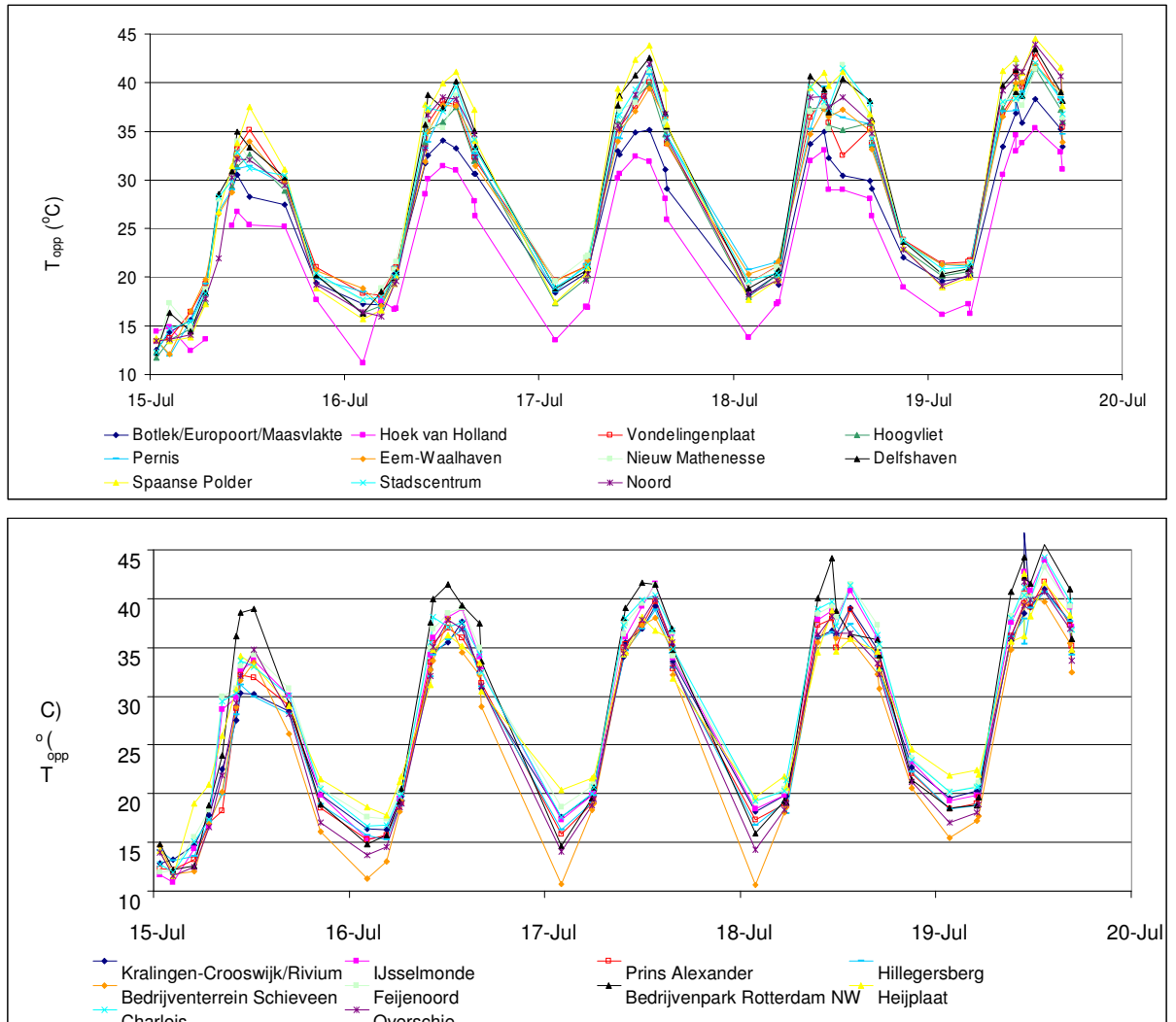


Hoofdstuk 3). Verder valt op in Figuur 4 dat er een geleidelijke stijging in de oppervlaktetemperatuur waarneembaar is. De temperatuurmaxima en -minima liggen aan het einde van de hittegolfperiode hoger dan aan het begin.

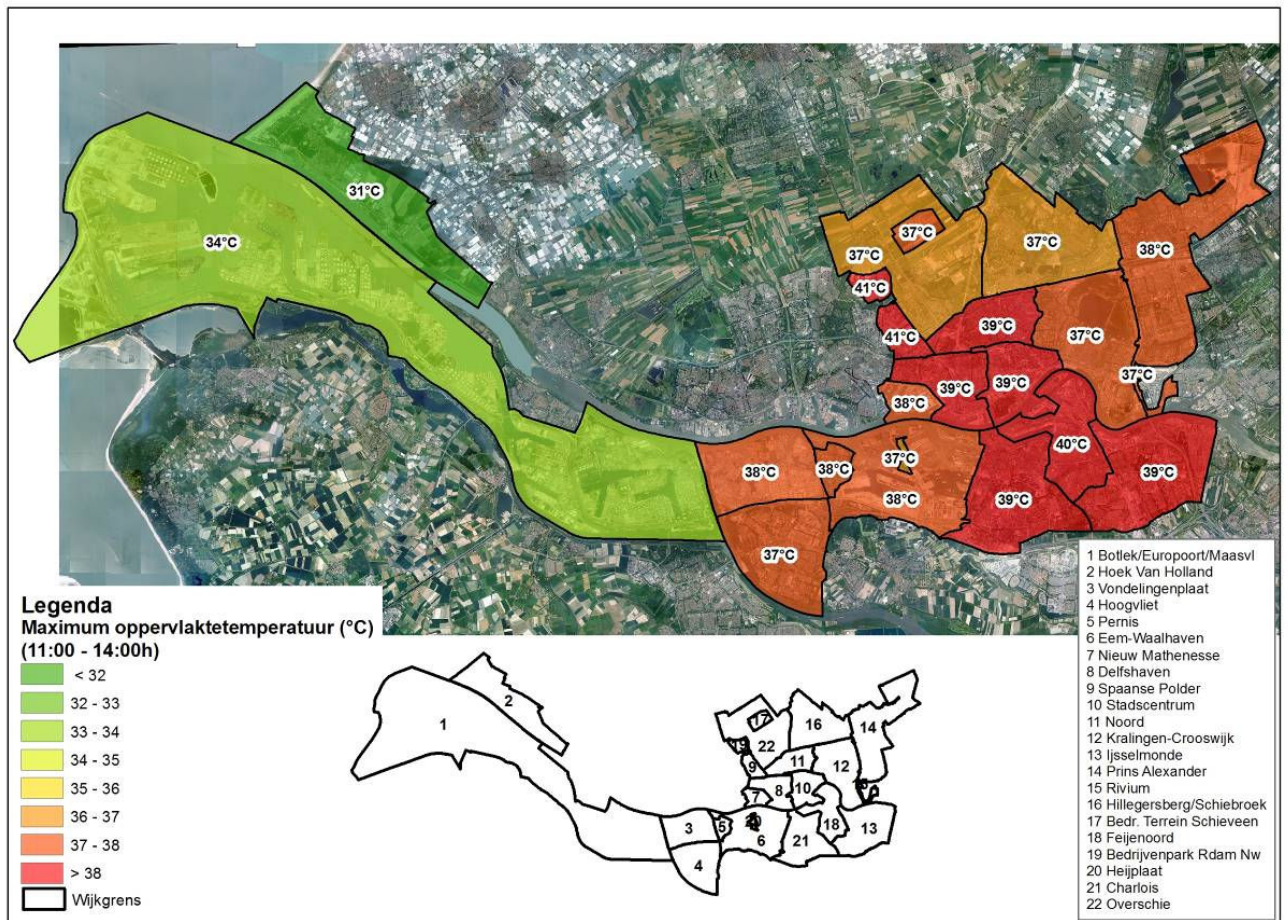
Uit de verschillende temperatuurreksen van Figuur 4 is voor elke Rotterdamse wijk een gemiddelde minimum oppervlaktetemperatuur geldig voor 's nachts en een gemiddelde maximum oppervlaktetemperatuur geldig voor overdag bepaald. Het minimum is bepaald uit de waargenomen oppervlaktetemperaturen tussen 00:00 en 5:00 uur en het maximum uit de oppervlaktetemperaturen tussen 11:00 en 14:00 uur. De resultaten zijn getoond in de Figuren 5 en 6. Deze figuren geven een beeld van de hittegevoelige wijken van Rotterdam voor de nachtelijke situatie en de situatie overdag. De resultaten zijn ook weergegeven in Tabel 4.

Overdag vertonen Spaanse Polder, Bedrijvenpark Rotterdam NW, Feijenoord, IJsselmonde en Delfshaven de hoogste oppervlaktetemperaturen, met een gemiddeld verschil van meer dan 8 °C ten opzichte van Hoek van Holland. Dit zijn voornamelijk de oude stadswijken en bedrijventerreinen. De locaties van de warmste wijken op grond van de NOAA-AVHRR-beelden in Figuur 5 verschillen van de warmste wijken afgeleid uit de Landsatbeelden (Figuur 3). Dit komt omdat in de analyse met de NOAA-AVHRR-beelden wateroppervlakken bijdragen in de wijkgemiddelde oppervlaktetemperaturen. Het percentage water in de wijken is daarom ook vermeld in Tabel 4. De havengebieden Botlek/Europoort/Maasvlakte, Vondelingenplaat en Eem-Waalhaven die een hoog percentage water hebben zijn daardoor in Figuur 5 koeler dan de Landsatbeelden in Figuur 3 laten zien. Ook Nieuw Mathenesse met een percentage wateroppervlak van 38% is om die reden veel koeler weergegeven. Daarnaast speelt de lage resolutie van de NOAA-AVHRR-beelden (1 km) ten opzichte van de Landsatbeelden (60-120 m) een rol en is het mogelijk dat door andere weersomstandigheden tijdens de opnames van de Landsatbeelden en de NOAA-AVHRR-beelden het ruimtelijk patroon van de wijkgemiddelde oppervlaktetemperaturen kan verschillen. Zo valt op dat IJsselmonde en Charlois in Figuur 5 relatief warme wijken zijn, terwijl dit in Figuur 3 niet het geval is. Hiervoor is geen duidelijke verklaring te geven. Het lijkt erop dat IJsselmonde en Charlois tijdens de hittegolfperiode langzaam opwarmen en pas vanaf 18 juli relatief hoge oppervlaktetemperaturen vertonen (zie Figuur 4), waardoor het gemiddelde van alle dagen tussen 11:00 en 14:00 uur relatief warm is. Het resultaat van die geleidelijke opwarming is mogelijk niet zichtbaar in de Landsatbeelden omdat deze op een aantal afzonderlijke zomerse dagen zijn genomen (Figuur 3). Echter, nader onderzoek zou moeten uitwijzen wat de werkelijke oorzaak is.

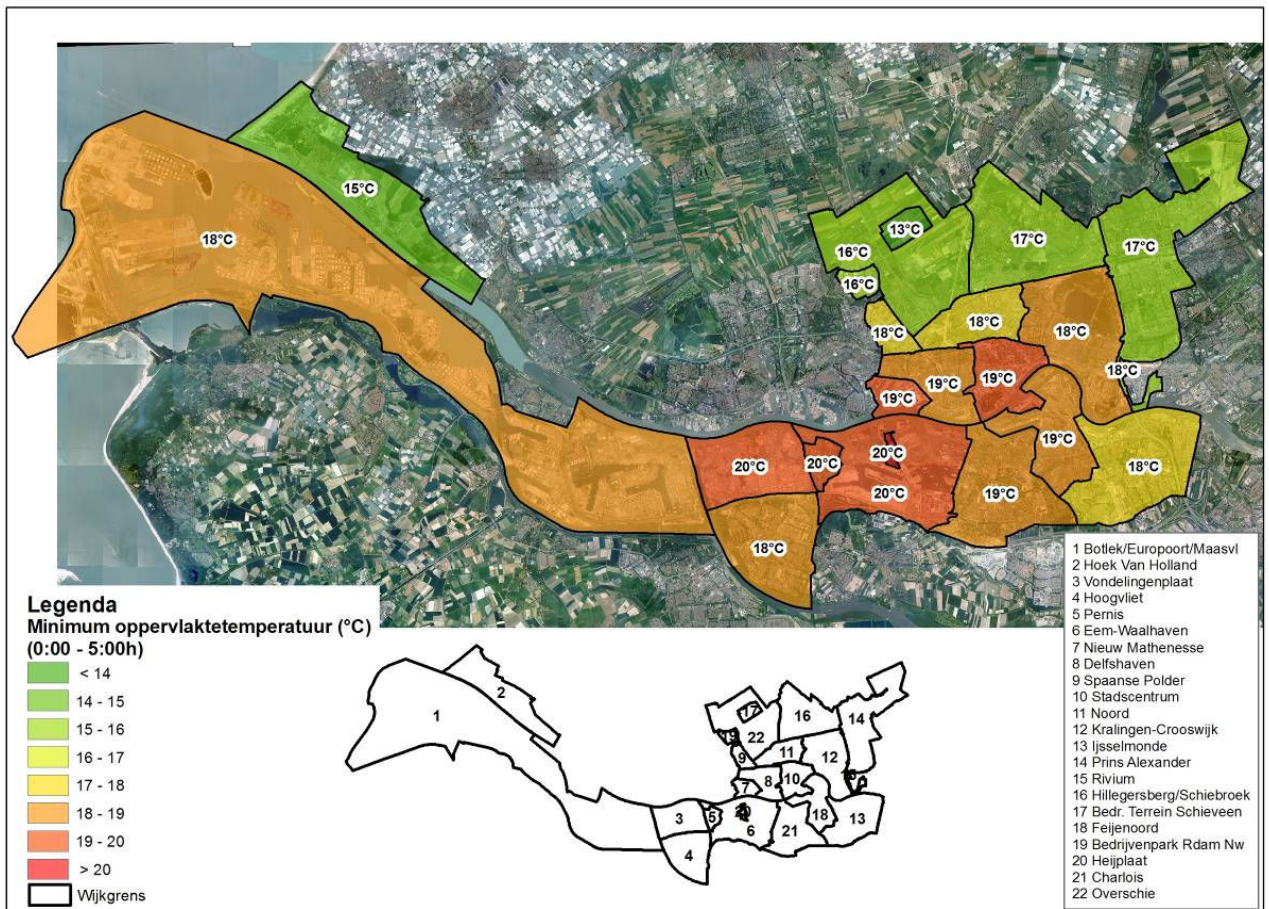
's Nachts zijn Heijplaat, Vondelingenplaat, Pernis, Eem-Waalhaven en Nieuw Mathenesse relatief warm, met een temperatuurverschil van meer dan 4 °C ten opzichte van Hoek van Holland (Figuur 6). Dit zijn vooral de havengebieden en industriegebieden. De relatief hoge oppervlaktetemperaturen van deze wijken hebben enerzijds te maken met het hoge percentage aan water. 's Nachts is het water warmer dan het land, waardoor de berekende gemiddelde oppervlaktetemperatuur van de wijk relatief hoog zijn. Anderzijds zouden antropogene warmtebronnen en met name de warmteafgifte van de industrie een oorzaak kunnen zijn voor de relatief hoge oppervlaktetemperaturen (zie ook Hoofdstuk 4).



Figuur 4 Gemiddelde oppervlaktetemperatuur gedurende de hittegolfperiode in 2006 voor de Rotterdamse wijken gebaseerd op NOAA-AVHRR-beelden (0). In deze analyse zijn de wijken Kralingen-Crooswijk en Rivium samen genomen.



Figuur 5 Gemiddelde oppervlaktetemperatuur overdag gedurende de hittegolfperiode in 2006 van de Rotterdamse wijken gebaseerd op de NOAA-AVHRR-beelden (0) die zijn opgenomen tussen 11.00 en 14.00 uur.



Figuur 6 Gemiddelde oppervlaktetemperatuur gedurende de nacht tijdens de hittegolfperiode in 2006 van de Rotterdamse wijken gebaseerd op de NOAA-AVHRR-beelden (0) die zijn opgenomen tussen 00.00 en 5.00 uur.



Tabel 4 Verskil in de gemiddelde oppervlaktetemperatuur overdag (tussen 11.00 en 14.00 uur) en gedurende de nacht (00.00 en 5.00 uur) tijdens de hittegolfperiode in 2006 voor de Rotterdamse wijken gebaseerd NOAA-AVHRR-beelden (0) gesorteerd op het percentage wateroppervlak in de betreffende wijken (laatste kolom). Het temperatuurverschil is bepaald ten opzichte van de gemiddelde oppervlaktetemperatuur van Hoek van Holland. Tussen haakjes is het rankingnummer weergegeven (1=warmst, 21=koelst). De vijf warmste (koelste) wijken zijn rood (blauw) weergegeven.

<i>Wijknaam</i>	<i>Temperatuurverschil overdag (°C) en ranknummer</i>	<i>Temperatuurverschil 's nachts (°C) en ranknummer</i>	<i>Percentage wateroppervlak (%)</i>
Botlek/Europoort/Maasvlakte	2,5 (20)	3,5 (10)	40
Eem-Waalhaven	6,6 (11)	4,8 (3)	40
Nieuw Mathenesse	6,7 (10)	4,5 (5)	38
Vondelingenplaat	6,6 (12)	4,8 (2)	25
Stadscentrum	7,4 (8)	4,4 (6)	22
Hoek van Holland	0,0 (21)	0,0 (20)	21
Feijenoord	8,3 (3)	4,1 (7)	20
Kralingen-Crooswijk/Rivium	6,0 (15)	3,2 (12)	18
Prins Alexander	6,2 (13)	2,0 (16)	15
Hillegersberg/Schiebroek	5,6 (19)	2,0 (17)	15
Delfshaven	8,1 (5)	4,0 (8)	14
Hoogvliet	6,0 (14)	3,3 (11)	12
IJsselmonde	8,2 (4)	2,7 (15)	12
Spaanse Polder	10,0 (1)	2,8 (14)	10
Charlois	7,8 (6)	3,6 (9)	9
Overschie	5,7 (17)	1,4 (19)	8
Bedrijvenpark Rotterdam NW	9,7 (2)	1,5 (18)	7
Noord	7,7 (7)	3,1 (13)	6
Pernis	6,8 (9)	4,6 (4)	4
Bedrijventerrein Schieveen	5,9 (16)	-1,8 (21)	2
Heijplaat	5,6 (18)	5,2 (1)	0

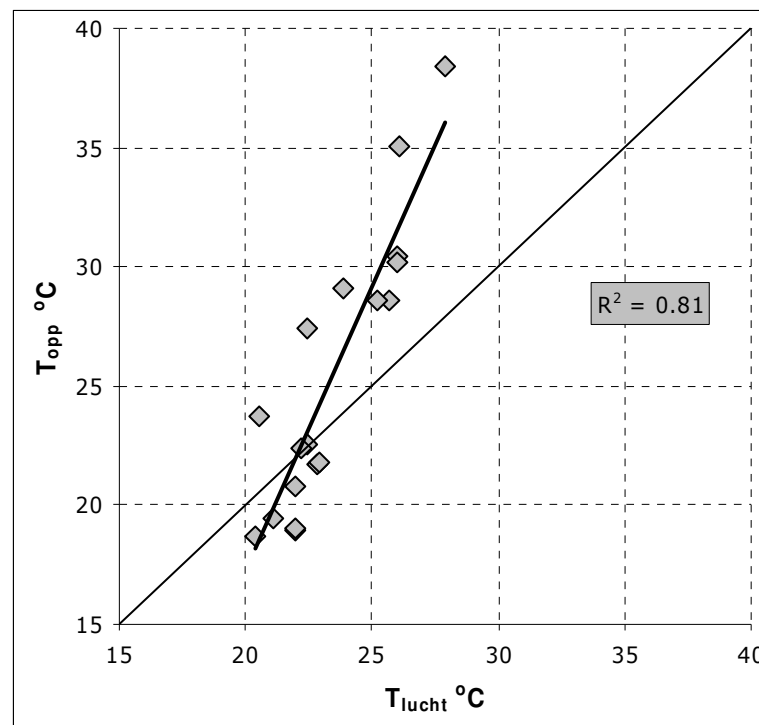
### 2.3.3 Oppervlakte- versus luchttemperatuur

In §2.1 werd al aangegeven dat de oppervlaktetemperatuur verschilt van de luchttemperatuur. De beide temperaturen zijn wel gekoppeld door de verschillende processen die deel uitmaken van de energiebalans: onder andere uitwisseling van langgolvlige straling en de voelbare warmteflux. Echter, er bestaat geen eenvoudige relatie die de luchttemperatuur afleidt uit de oppervlaktetemperatuur. Hiervoor zijn extra gegevens of metingen van stralings-, verdampings- en warmtefluxen nodig. In deze paragraaf laten we daarom alleen een vergelijking zien tussen de oppervlaktetemperaturen afgeleid uit de Landsatbeelden en een aantal gemeten luchttemperaturen op het moment dat het Landsatbeeld is opgenomen.

Figuur 7 toont de resultaten van deze vergelijking. De luchttemperaturen zijn afkomstig van vliegveld Zestienhoven en acht andere weerstations van weeramateurs in de stad en omgeving van Rotterdam (*wunderground.com*). Voor deze vergelijking zijn de vier

recentste Landsatbeelden gebruikt. Het valt op dat de oppervlaktetemperatuur sterk gecorreleerd is met de gemeten luchttemperatuur. Hoge oppervlaktetemperaturen gaan samen met hoge luchttemperaturen. Zoals verwacht is de ruimtelijke variatie in de oppervlaktetemperatuur groter dan in de luchttemperatuur. Dit betekent dat de intensiteit van het hitte-eiland afgeleid uit oppervlaktetemperaturen, de SHI, vermoedelijk groter is dan het werkelijke hitte-eiland effect, de UHI, welke bepaald wordt door het verschil in de luchttemperatuur. De intensiteit van het stedelijk hitte-eiland (UHI) van Rotterdam is dus vermoedelijke enkele graden lager dan in Tabel 3 staat vermeld. Omdat de Landsatbeelden rond het middaguur zijn genomen, geldt deze uitkomst in ieder geval voor overdag. Echter, er is geen reden om aan te nemen dat de relatie tussen de oppervlaktetemperatuur en luchttemperatuur 's nachts anders is, omdat de energiebalansprocessen hetzelfde blijven. Dus ook 's nachts zal de variatie in de oppervlaktetemperatuur groter zijn dan in de luchttemperatuur.

Overigens bepaalt de oppervlaktetemperatuur mede het thermisch comfort van de mens. Het thermisch comfort is de warmte of koude die ervaren wordt als gevolg de luchttemperatuur, windsnelheid, luchtvochtigheid en ontvangen straling van de zon, de omgeving, en het oppervlak. Straling van het oppervlak wordt bepaald door de temperatuur en de emissiviteit van het oppervlak en op die manier beïnvloedt de oppervlaktetemperatuur mede het thermisch comfort.



Figuur 7 Relatie tussen de oppervlaktetemperatuur van de vier recentste Landsatbeelden en metingen van de luchttemperatuur van weeramateurs en vliegveld Zestienhoven op het moment dat het Landsatbeeld werd gemaakt (12:30 u.).

## 2.4 Conclusies

Op grond van verschillende thermisch infraroodbeelden kan worden vastgesteld dat het oppervlakte hitte-eiland van Rotterdam kan oplopen tot 10 °C overdag. Wijken die overdag het warmst zijn verschillen van de wijken die 's nachts het warmst zijn. In meer detail zijn de conclusies:

- Het verschil in de oppervlaktetemperatuur overdag tussen de Rotterdamse wijken en de omgeving van Rotterdam kan overdag oplopen tot 10 °C. Dit is afgeleid uit 15 Landsat thermisch infraroodbeelden van zomerse dagen. Deze beelden hebben een ruimtelijke resolutie variërend van 60 tot 120 m, waardoor de afgeleide oppervlaktetemperaturen representatief zijn voor het schaalniveau van straat tot wijk.
- Overdag geldt dat de Rotterdamse wijken Nieuw Mathenesse, Spaanse Polder en Vondelingenplaat de hoogste oppervlaktetemperaturen vertonen die meer dan 8 °C verschillen van het omliggende platteland. Kralingen-Crooswijk, Hoek van Holland, Hillegersberg/Schiebroek, Overschie en Bedrijventerrein Schieveen zijn het koelst met oppervlaktetemperaturen die minder dan 2 °C afwijken van het omliggende platteland. Het centrum van Rotterdam heeft een oppervlaktetemperatuurverschil van 6 °C met het omliggende platteland.
- NOAA-AVHRR thermisch infraroodbeelden met een lagere ruimtelijke resolutie van 1 km, laten zien dat tijdens de hittegolfperiode van 2006 wijken die overdag de hoogste oppervlaktetemperaturen vertonen, verschillen van wijken die 's nachts de hoogste oppervlaktetemperaturen vertonen. Op grond van deze resultaten kan geconcludeerd worden dat hittemaatregelen zich op verschillende wijken zouden moeten toespitsen als bekend zou zijn dat hittestress voornamelijk gerelateerd is aan hitte overdag of 's nachts.
- De NOAA-AVHRR-beelden laten zien dat overdag Spaanse Polder, Bedrijvenpark Rotterdam NW, Feijenoord, IJsselmonde en Delfshaven de hoogste oppervlaktetemperaturen hebben, met een gemiddeld verschil van meer dan 8 °C ten opzichte van Hoek van Holland. 's Nachts zijn Heijplaat, Vondelingenplaat, Pernis, Eem-Waalhaven en Nieuw Mathenesse relatief warm, met een temperatuurverschil van meer dan 4 °C ten opzichte van Hoek van Holland. De patronen in de gemiddelde oppervlaktetemperatuur tussen de wijken en de temperatuurwaarden verschillen op een aantal plekken van de uitkomsten uit de Landsatbeelden. Dit heeft enerzijds te maken met de hoge ruimtelijke resolutie van de Landsatbeelden en de lage ruimtelijke resolutie van de NOAA-beelden waardoor soms ook wateroppervlakken zijn meegenomen in de temperatuurgemiddelden, en anderzijds met de weersomstandigheden waaronder de beelden zijn gemaakt. De Landsatbeelden zijn opgenomen tijdens zomerse dagen, en de NOAA-beelden tijdens de hittegolfperiode van 2006.
- Een vergelijking tussen de Landsat oppervlaktetemperaturen en gemeten luchttemperaturen overdag laat zien dat de variatie in de oppervlaktetemperatuur groter is dan de variatie in de luchttemperatuur. Hierdoor is de intensiteit van het stedelijk hitte-effect (UHI), uitgedrukt als het verschil in de luchttemperatuur tussen stad en platteland vermoedelijk enkele graden lager dan bovenstaande waarden voor het oppervlakte hitte-eiland van Rotterdam (SHI).





## 3 Statische oorzaken: gebiedskenmerken

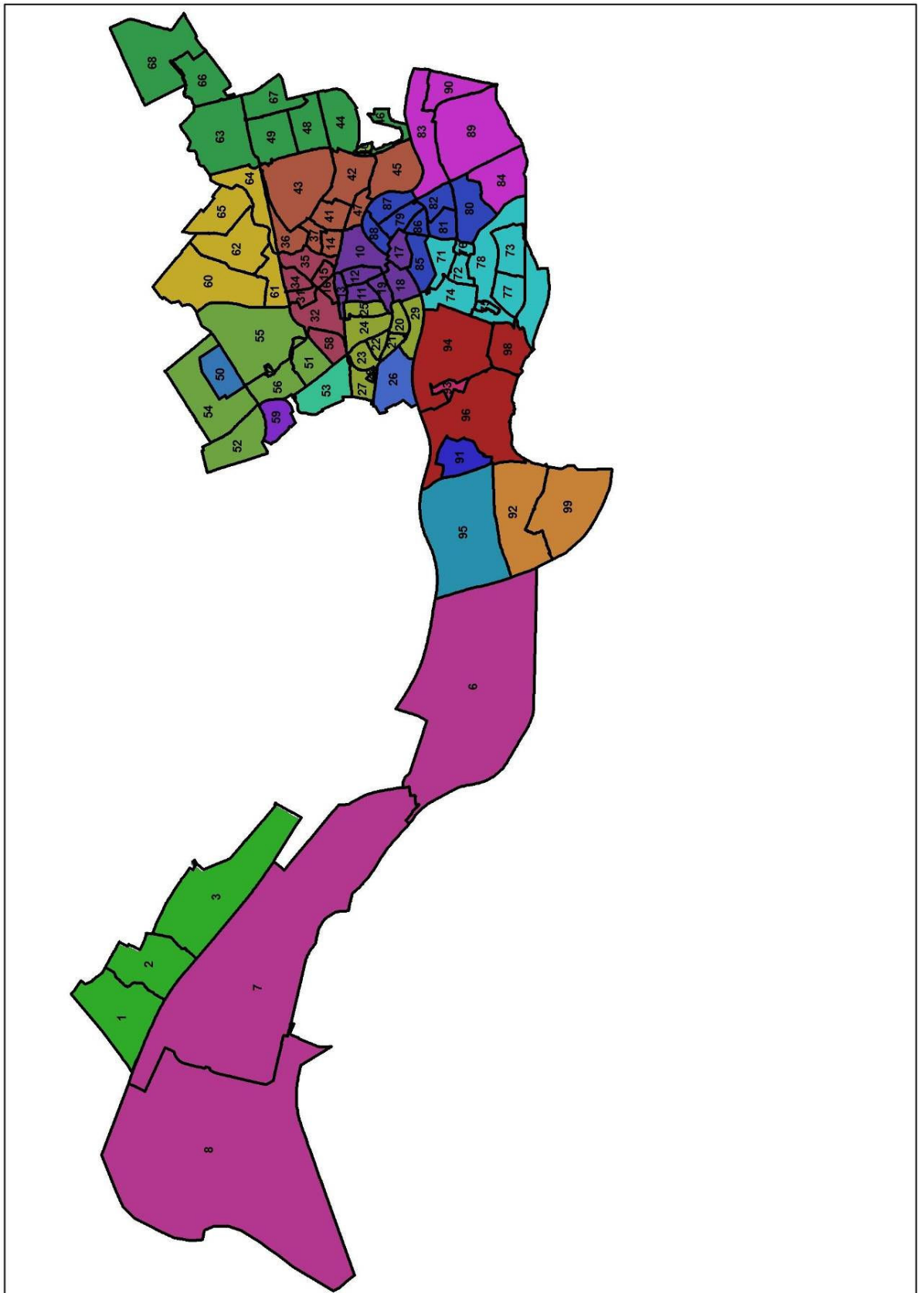
### 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de ruimtelijke verdeling in de gemiddelde oppervlaktetemperatuur van Rotterdam gerelateerd aan geografische kenmerken die het stedelijk gebied typeren zoals vegetatie, water, en bebouwing. Dit zijn de zogenoemde statische hittefactoren die de ruimtelijke variatie in de oppervlaktetemperatuur kunnen verklaren. Op basis van deze analyse kan een schatting gemaakt worden van het effect van de betreffende hittefactoren op de oppervlaktetemperatuur en het hitte-eiland effect. Vanwege de hoge resolutie en de bijbehorende nauwkeurigheid zijn voor dit onderzoek de gemiddelde oppervlaktetemperaturen afgeleid uit de 15 Landsatbeelden gebruikt. Deze zijn rond het middaguur genomen Dit betekent dat de gevonden statische oorzaken gelden voor de situatie en het stedelijk hitte-effect overdag.

In dit hoofdstuk wordt ook aandacht besteed aan stedelijke gebiedstypen in relatie tot het stedelijke hitte-eiland. Voor de verschillende gebiedstypen in Rotterdam is op grond van de Landsat temperatuurkaart een gemiddelde oppervlaktetemperatuur berekend.

### 3.2 Data en methode

Voor de statistische analyse is allereerst op grond van de 15 Landsatbeelden (Tabel 1) een gemiddelde oppervlaktetemperatuur voor elke buurt in Rotterdam bepaald. Figuur 8 geeft de locaties van de buurten weer. Deze buurtindeling is gebruikt, omdat verwacht wordt dat de hittefactoren binnen de buurten relatief homogeen zijn, in tegenstelling tot de wijken zoals gebruikt in Hoofdstuk 2.



Figuur 8 Locaties van de 89 buurten in Rotterdam. De nummering komt overeen met de nummers van de buurtnamen in Tabel 5. De kleuren tonen de verschillende wijken van Rotterdam zoals in Figuur 1.

De volgende gebiedskenmerken zijn onderzocht:

1. Albedo: gemiddelde albedo afgeleid uit de 15 Landsatbeelden. Het albedo is een maat voor het reflecterend vermogen van een materiaal voor zonlicht.
2. Emissiviteit: gemiddelde emissiviteit afgeleid uit de 15 Landsatbeelden. De emissiviteit is het vermogen van een oppervlak om warmte uit te stralen.
3. Skyviewfactor: fractie zicht vanaf de grond op de hemelkoepel. Deze neemt af bij veel hoogbouw. De skyviewfactor is bepaald voor een grid van 10 bij 10 meter op grond van een digitale kaart van gebouwhoogtes van de Gemeente Rotterdam.
4. Bebouwd: percentage bebouwd oppervlak op basis van een gebouwhoogtekaart van de Gemeente Rotterdam.
5. Totaalverhard: percentage verhard oppervlak op basis van een TOP10 GIS bestand van Rotterdam (<http://www.kadaster.nl/top10nl/>); Het verharde oppervlak is bepaald uit een aantal landgebruiksklassen uit dit bestand: achtergrond, bebouwd terrein, bebouwing, hoofdweg, industriële bebouwing, industrieterrein, kassen, snelweg, steenglooing. Totaalverhard bevat dus zowel het bebouwde oppervlak als de overige verharding zoals snelwegen en parkeerterreinen. Woonstraten en ontsluitingswegen zijn in het TOP 10 GIS bestand niet geclassificeerd, en worden daarom niet in het totaal verharde oppervlak meegenomen. Daarnaast worden tuinen binnen het TOP 10 GIS bestand tot de klasse bebouwd oppervlak gerekend. Dit is niet geheel terecht, omdat de meeste tuinen niet volledig bestraat zijn.
6. Openbaar groen: percentage groenoppervlak dat beheerd wordt door de Gemeente Rotterdam. Deze gegevens zijn aangeleverd door de Gemeente Rotterdam.
7. Totaalgroen: percentage groenoppervlak op basis van het TOP10 GIS bestand van Rotterdam; Het groenoppervlak is bepaald uit een aantal landgebruiksklassen: begraafplaats, braak, cultuurgrond, duinen, groen, park, sportterrein, (nat) strand, vliegveld en volkstuinen. De landgebruiksklassen bevatten verschillende vegetatiesoorten zoals bomen, gras en struikgewas. Hierin is dus geen onderscheid gemaakt.
8. Water: percentage wateroppervlak op basis van het TOP10 GIS bestand van Rotterdam.
9. Gebouwhoogte: het gewogen gemiddelde van de gebouwhoogte met het gebouwoppervlak op basis van een gebouwhoogtekaart van de Gemeente Rotterdam.
10. Inwonerdichtheid: het aantal inwoners per hectare verkregen van het Centrum voor Onderzoek en Statistiek van de Gemeente Rotterdam (<http://www.cos.rotterdam.nl/>).
11. NDVI: maat voor de "groenheid" van het oppervlak, zie ook § 2.2; De NDVI is bepaald op grond van de 15 Landsatbeelden (Tabel 1). Kale oppervlakken hebben een waarde rond 0,10, terwijl zeer vegetatierijke oppervlakken een waarde van 0,90 kunnen hebben. Wateroppervlakken hebben een negatieve waarde.

Al deze hittefactoren spelen direct of indirect een rol in de stedelijke energiebalans en zijn hierdoor medebepalend voor de oppervlaktetemperatuur. De albedo, emissiviteit en skyviewfactor zijn direct gerelateerd aan de energiebalans: De emissiviteit bepaalt de hoeveelheid uitgezonden langgolvlige straling van het oppervlak en daarmee de

oppervlaktetemperatuur. Oppervlakken met een hogere emissiviteit kunnen beter warmte afstaan. Het albedo bepaalt de hoeveelheid gereflecteerd zonlicht. Lichte oppervlakken weerkaatsen meer zonlicht, waardoor minder zonlicht (en dus warmte) geabsorbeerd wordt door het oppervlak. De skyviewfactor is de fractie van de hemelkoepel die zichtbaar is vanaf de grond. In een straat met veel hoogbouw is de skyviewfactor laag waardoor de warmte die gebouwoppervlakken uitstralen moeilijk aan de vrije atmosfeer kan worden afgestaan. Hierdoor zal vooral 's nachts de uitgestraalde warmte blijven "hangen" en geabsorbeerd worden door andere gebouwen. Omgekeerd bepaalt de skyviewfactor ook de hoeveelheid schaduw en daarmee de inkomende zonnestraling overdag. Hierdoor is het in nauwe straatjes met een hoge skyviewfactor overdag vaak koeler.

De factoren bebouwd, totaalverhard, openbaargroen, totaalgroen en water bepalen de energiebalans vooral indirect doordat zij van invloed zijn op het albedo en de emissiviteit, maar ook gerelateerd zijn aan het aanwezige (bodem)vocht beschikbaar voor verdamping. Deze hittefactoren zijn interessant voor beleid, omdat ze tot de verbeelding spreken en mogelijkheden bieden waarop gestuurd kan worden. In zeker zin geldt dit ook voor gebouwhoogte dat verband houdt met de skyviewfactor. Gebieden met een gemiddeld hoge gebouwhoogte hebben over het algemeen een lagere skyviewfactor. De hittefactor inwonerdichtheid kan gezien worden als een maat voor de antropogene warmteafgifte. Op de stedelijke schaal bestaat er een relatie tussen het aantal inwoners en het stedelijk hitte-effect (Oke, 1987). Voor Rotterdam zal in dit onderzoek bekeken worden of er ook een relatie is tussen inwonerdichtheid en het stedelijk hitte-effect op buurtschaal.

De NDVI is een aparte index die sterk samenhangt met de emissiviteit en ook afgeleid is uit de Landsatbeelden. In veel literatuuronderzoek wordt melding gemaakt van de relatie tussen de NDVI en de oppervlaktetemperatuur, en daarom is deze opgenomen in de statistische analyse.

Voor elke buurt is een gemiddelde waarde voor bovenstaande hittefactoren bepaald geldig voor het buurtoppervlak waarin water niet is meegenomen. Echter, het percentage wateroppervlak is wel bepaald ten opzichte van het totale buurtoppervlak. Daarna is een regressieanalyse met de oppervlaktetemperatuur uitgevoerd.

### **3.3 Resultaten**

#### *3.3.1 Statistische analyse*

Tabel 5 geeft voor alle buurten in Rotterdam de gemiddelde waarde van de geanalyseerde hittefactoren en de oppervlaktetemperatuur. Wanneer deze tabel nauwkeurig wordt bestudeerd, is te zien dat het percentage openbaar groen voor sommige buurten hoger is dan het percentage totaal groen. Dit komt omdat deze waarden uit verschillende geografische bestanden zijn bepaald die niet op elkaar zijn afgestemd. Daarnaast is door verschillende oorzaken de som van de percentages wateroppervlak, totaal groen en totaal verhard in de meeste gevallen niet gelijk aan 100%. Het percentage wateroppervlak is namelijk bepaald ten opzichte van het totale buurtoppervlak en het totaal groen en het totaal verharde percentage ten opzichte van

het buurtoppervlak exclusief water. Daarnaast is het TOP10 GIS bestand van Rotterdam niet gebiedsdekkend waardoor sommige oppervlakken niet geclassificeerd zijn.

De oppervlaktetemperatuur is in scatterplots in Figuur 9 uitgezet tegen de verschillende hittefactoren. Uit deze figuren, de spreiding van de punten en de helling van de regressielijn is af te leiden dat sommige factoren de variatie in de oppervlaktetemperatuur beter verklaren dan andere. Tabel 6 presenteert de Pearson-correlatie en de regressiecoëfficiënten voor de regressieanalyses.

De beste voorspeller van de oppervlaktetemperatuur blijkt de emissiviteit te zijn. Dit is niet verrassend aangezien de emissiviteit gebruikt is om de oppervlaktetemperatuur af te leiden en dus geen onafhankelijke verklarende variabele is. Verder blijkt dat alle drie de directe hittefactoren (albedo, emissiviteit, skyviewfactor) negatief gecorreleerd zijn met de oppervlaktetemperatuur. Hoge waarden van deze factoren leiden dus tot lagere oppervlaktetemperaturen. Een kleine verandering in het albedo of de emissiviteit van het oppervlak lijkt een grote verandering in de oppervlaktetemperatuur te kunnen bewerkstelligen. Een verhoging van de albedo of emissiviteit met 0,01 door het gebruik van andere oppervlaktematerialen heeft gemiddeld een verlagend effect op de oppervlaktetemperatuur van respectievelijk 0,8 en 1,7 °C.

De hittefactoren totaalgroen en openbaargroen zijn omgekeerd evenredig met totaalverhard en bebouwd. Een stijging in het groenpercentage gaat in veel gevallen ten koste van het verharde of bebouwde oppervlak. Uit de regressiecoëfficiënten valt af te leiden dat de verandering in de gemiddelde oppervlaktetemperatuur in de orde grootte van 1 °C ligt wanneer 10% van het verharde en bebouwde oppervlak plaats maakt voor onverhard oppervlak. Het verkoelende effect van deze maatregel zal op kleinere schaal (straatniveau) overigens hoger kunnen zijn. Deze analyse zegt alleen iets over de buurtgemiddelde oppervlaktetemperatuur. Omdat bij totaalgroen en openbaargroen verschillende soorten vegetatie zijn samengenomen, kan er geen onderscheid worden gemaakt in het verschillende effect van gras of bomen op de buurtgemiddelde oppervlaktetemperatuur. Dit zou in een vervolgonderzoek verder kunnen worden onderzocht. Hierin zou dan ook gekeken kunnen worden naar het effect van privétuinen op de oppervlaktetemperatuur.

Opvallend is dat het percentage water geen significante relatie vertoont met de oppervlaktetemperatuur. Dat wil zeggen dat het verkoelende effect van water niet terug te vinden is in een lagere buurtgemiddelde oppervlaktetemperatuur en betekent niet dat water geen verkoelend effect heeft op de luchttemperatuur. Van de indirecte hittefactoren bebouwd, totaalverhard, openbaargroen en totaalgroen is totaalgroen de beste voorspeller. Uit de regressiecoëfficiënt blijkt dat bij een toename in het percentage totaalgroen van 10% de buurtgemiddelde oppervlaktetemperatuur gemiddeld met 1,3 °C afneemt.

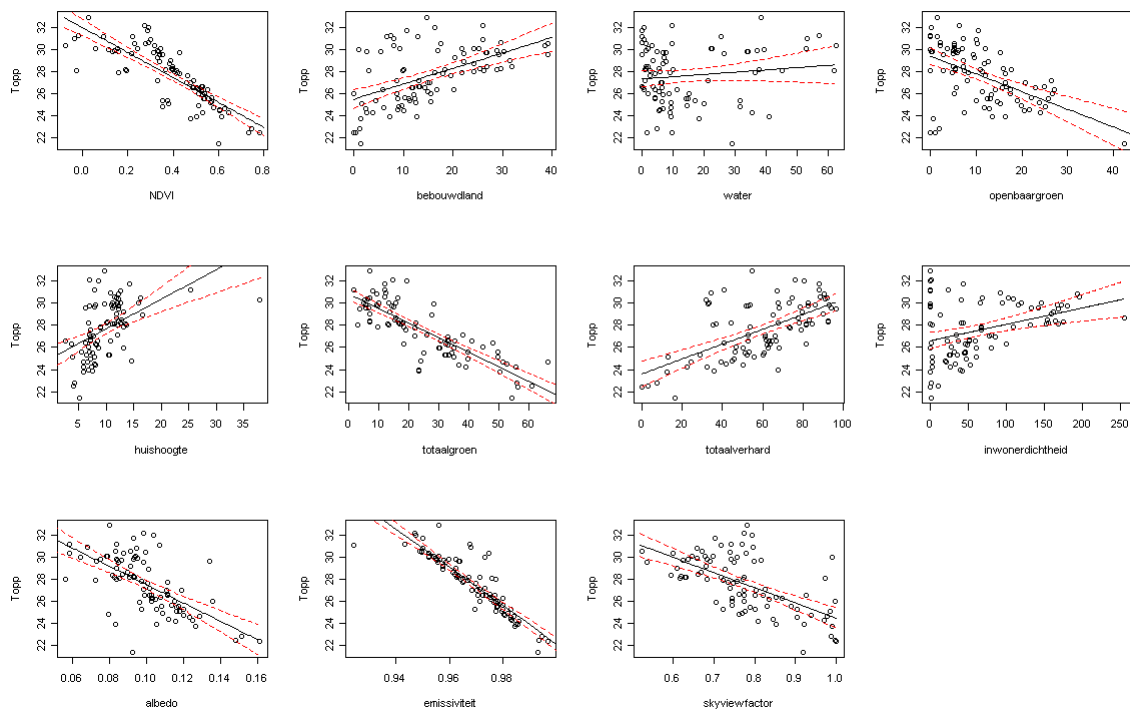
Inwonerdichtheid vertoont een geringe correlatie met de oppervlaktetemperatuur, en kan niet gezien worden als goede indicator voor variatie in de gemiddelde oppervlaktetemperatuur op buurtniveau.

Tabel 5 Gemiddelde oppervlaktetemperatuur overdag afgeleid uit de 15 Landsatbeelden en gemiddelde waarden van de hittefactoren voor de afzonderlijke buurten in Rotterdam. De wijken waarin de buurten zijn gelegen, staan in de eerste kolom vermeld.

Wijknaam	Nr	Buurtnaam												
			NDVI	Bebouwd (%)	Water (%)	Openbaar groen (%)	Gebouwhoogte (m)	Totaal groen (%)	Totaal verhard (%)	Inwonerdichtheid (ha <sup>-1</sup> )	Albedo	Emissiviteit	Skyviewfactor	T <sub>opp</sub> (°C)
Bedrijvenpark R'dam NW	59	Bedrijvenpark R'dam NW	0,43	27	7	15	8	15	79	0	0,13	0,96	0,80	29,7
Bedrijventerrein Schieveen	50	Bedrijventerrein Schieveen	0,78	0	2	0	0	56	0	0	0,16	1,00	1,00	22,4
Botlek/Europoort/Maasvlakte	6	Botlek	0,16	5	34	0	11	14	53	0	0,09	0,96	0,68	29,8
Botlek/Europoort/Maasvlakte	7	Europoort	0,19	3	45	0	11	17	37	0	0,09	0,98	0,97	28,1
Botlek/Europoort/Maasvlakte	8	Maasvlakte	0,12	1	39	0	10	28	33	0	0,09	0,95	0,99	30,0
Charlois	72	Carnisse	0,39	30	1	5	10	7	92	175	0,09	0,96	0,62	28,3
Charlois	74	Oud-Charlois	0,37	18	10	18	10	22	68	43	0,09	0,97	0,72	28,2
Charlois	77	Pendrecht	0,53	17	4	17	8	32	64	100	0,10	0,98	0,75	26,3
Charlois	71	Tarwewijk	0,21	22	26	5	11	6	68	134	0,07	0,96	0,69	29,6
Charlois	75	Wielewaal	0,55	20	0	27	4	18	81	45	0,10	0,98	0,87	26,3
Charlois	78	Zuiderpark	0,64	4	9	24	6	56	33	3	0,12	0,99	0,81	24,2
Charlois	76	Zuidplein	0,29	11	0	10	14	12	88	43	0,09	0,95	0,70	31,7
Charlois	73	Zuidwijk	0,54	15	2	17	9	30	68	81	0,10	0,98	0,75	26,0
Delfshaven	21	Bospolder	0,29	30	0	2	11	12	88	197	0,09	0,95	0,67	30,6
Delfshaven	20	Delfshaven	0,24	25	23	5	13	10	67	146	0,08	0,95	0,70	30,1
Delfshaven	25	Middelland	0,40	32	1	5	12	7	92	165	0,08	0,96	0,59	28,4
Delfshaven	24	Nieuwe Westen	0,40	27	2	7	13	15	83	154	0,09	0,96	0,66	28,5
Delfshaven	27	Oud-Mathenesse	0,49	13	1	26	12	38	61	80	0,10	0,97	0,74	27,2
Delfshaven	29	Schiemonnd	-0,03	8	53	7	11	12	35	92	0,07	0,97	0,80	30,9
Delfshaven	23	Spangen	0,33	20	7	10	13	13	79	162	0,09	0,96	0,68	29,2
Delfshaven	22	Tussendijken	0,31	27	8	6	12	10	83	180	0,08	0,96	0,62	29,7
Delfshaven	28	Witte Dorp	0,35	29	0	9	6	6	94	142	0,10	0,96	0,75	29,5
Eem-Waalhaven	96	Eemhaven	0,13	3	34	0	7	14	52	0	0,09	0,96	0,82	29,7
Eem-Waalhaven	94	Waalhaven	-0,02	7	57	0	8	2	41	0	0,06	0,97	0,77	31,2
Eem-Waalhaven	98	Waalhaven-Zuid	0,29	16	0	0	9	19	80	0	0,10	0,95	0,79	32,0
Feijenoord	86	Afrikaanderwijk	0,30	26	1	10	12	9	90	194	0,09	0,95	0,66	30,8
Feijenoord	81	Bloemhof	0,33	29	1	5	8	6	93	172	0,10	0,95	0,66	29,9
Feijenoord	87	Feijenoord	0,14	17	37	6	12	9	54	116	0,08	0,96	0,74	29,8
Feijenoord	82	Hillesluis	0,35	22	2	12	11	16	83	120	0,09	0,96	0,68	30,1
Feijenoord	85	Katendrecht	0,06	9	53	7	12	13	34	66	0,06	0,97	0,76	30,0
Feijenoord	79	Kop van Zuid-Entrepot	0,23	18	10	10	12	16	74	103	0,10	0,95	0,74	30,5
Feijenoord	88	Noordereiland	-0,03	10	62	3	14	3	35	3	0,06	0,98	0,77	28,0
Feijenoord	80	Vreewijk	0,46	20	2	12	7	19	79	68	0,10	0,97	0,75	27,6
Heijplaat	93	Heijplaat	0,50	14	0	16	7	35	65	37	0,10	0,97	0,82	26,5
Hillegersberg-Schiebroek	62	Hillegersberg-Noord	0,50	7	41	14	8	23	36	41	0,08	0,98	0,92	23,9
Hillegersberg-Schiebroek	61	Hillegersberg-Zuid	0,42	22	9	5	9	18	73	67	0,10	0,97	0,76	27,9
Hillegersberg-Schiebroek	65	Molenlaankwartier	0,62	13	9	16	7	23	67	39	0,11	0,99	0,85	23,9
Hillegersberg-Schiebroek	60	Schiebroek	0,61	9	6	22	8	53	42	33	0,12	0,98	0,90	24,5
Hillegersberg-Schiebroek	64	Terbregge	0,58	6	9	12	7	51	39	20	0,12	0,98	0,94	24,7

Wijknaam	Nr	Buurtnaam												
			NDVI	Bebouwd (%)	Water (%)	Openbaar groen (%)	Gebouwhoogte (m)	Totaal groen (%)	Totaal verhard (%)	Inwonerdichtheid (ha <sup>-1</sup> )	Albedo	Emissiviteit	Skyviewfactor	T <sub>opp</sub> (°C)
Hoek van Holland	2	Dorp	0,35	11	17	10	6	32	52	27	0,12	0,97	0,90	25,3
Hoek van Holland	3	Rijnpoort	0,48	1	18	1	6	50	12	0	0,13	0,98	0,99	23,7
Hoek van Holland	1	Strand en Duin	0,38	2	20	15	4	49	13	2	0,12	0,98	0,98	25,1
Hoogvliet	92	Hoogvliet-Noord	0,51	9	9	27	7	45	47	27	0,12	0,98	0,77	26,0
Hoogvliet	99	Hoogvliet-Zuid	0,51	10	15	20	7	40	46	47	0,11	0,98	0,77	24,9
IJsselmonde	90	Beverwaard	0,48	15	6	21	7	33	61	86	0,11	0,97	0,77	27,0
IJsselmonde	89	Groot IJsselmonde	0,57	10	4	22	7	40	53	47	0,11	0,98	0,74	25,6
IJsselmonde	84	Lombardijen	0,52	13	4	17	7	33	62	51	0,11	0,98	0,76	26,6
IJsselmonde	83	Oud IJsselmonde	0,19	10	38	5	7	18	44	41	0,08	0,97	0,77	28,2
Kralingen-Crooswijk	45	De Esch	0,37	4	32	19	11	32	29	24	0,10	0,98	0,80	25,3
Kralingen-Crooswijk	42	Kralingen-Oost	0,57	16	7	15	10	33	60	35	0,11	0,98	0,72	25,3
Kralingen-Crooswijk	41	Kralingen-West	0,40	29	1	11	11	17	82	153	0,09	0,96	0,63	28,2
Kralingen-Crooswijk	43	Kralingse Bos	0,60	1	29	42	5	54	17	0	0,09	0,99	0,92	21,4
Kralingen-Crooswijk	36	Nieuw Crooswijk	0,49	12	6	6	11	41	53	22	0,10	0,97	0,80	26,6
Kralingen-Crooswijk	37	Oud Crooswijk	0,38	24	7	12	12	16	77	256	0,09	0,96	0,67	28,7
Kralingen-Crooswijk	14	Rubroek	0,40	25	6	16	13	17	78	155	0,09	0,96	0,63	28,2
Kralingen-Crooswijk	47	Struisenburg	0,16	16	37	8	13	10	54	110	0,07	0,97	0,72	27,9
Nieuw Mathenesse	26	Nieuw Mathenesse	0,03	15	38	2	10	7	55	0	0,08	0,96	0,78	32,9
Noord	15	Agniesebuurt	0,32	39	3	5	12	6	91	110	0,09	0,95	0,60	30,4
Noord	31	Bergpolder	0,41	26	3	7	14	13	85	169	0,09	0,96	0,62	28,1
Noord	32	Blijdorp	0,53	12	7	13	13	30	63	60	0,10	0,98	0,71	25,9
Noord	58	Blijdorpsepolder	0,51	6	11	14	6	48	41	1	0,11	0,98	0,85	26,4
Noord	34	Liskwartier	0,41	24	6	11	12	13	81	132	0,08	0,96	0,68	28,0
Noord	35	Oude Noorden	0,33	30	5	5	11	9	86	167	0,08	0,96	0,64	29,8
Noord	16	Provenierswijk	0,39	31	3	7	12	7	90	159	0,08	0,96	0,61	29,0
Overschie	51	Kleinpolder	0,49	12	7	23	8	31	63	60	0,10	0,97	0,77	26,5
Overschie	57	Landzicht	0,53	13	0	25	3	33	67	52	0,11	0,98	0,93	26,6
Overschie	52	Noord Kethel	0,73	0	10	1	4	61	3	10	0,15	0,99	1,00	22,5
Overschie	56	Overschie	0,54	12	15	13	8	34	51	46	0,11	0,98	0,89	25,5
Overschie	54	Schieveen	0,75	1	5	2	4	56	8	1	0,15	0,99	0,99	22,8
Overschie	55	Zestienhoven	0,63	2	7	13	6	66	24	2	0,13	0,98	0,98	24,7
Pernis	91	Pernis	0,56	9	4	26	5	50	46	31	0,12	0,98	0,83	25,6
Prins Alexander	49	Het Lage Land	0,53	15	5	11	8	33	62	48	0,10	0,98	0,84	26,2
Prins Alexander	46	Kralingseveer	0,33	9	21	8	7	26	53	34	0,10	0,97	0,83	27,1
Prins Alexander	68	Nesselande	0,53	3	35	7	7	39	23	26	0,13	0,98	0,97	24,2
Prins Alexander	63	Ommoord	0,60	10	5	20	8	37	50	52	0,11	0,98	0,85	24,4
Prins Alexander	67	Oosterflank	0,43	18	4	16	9	22	74	67	0,11	0,97	0,74	27,8
Prins Alexander	48	Prinsenland	0,56	12	9	24	8	35	56	61	0,12	0,98	0,78	25,1
Prins Alexander	44	's-Gravenland	0,53	11	14	12	7	25	61	45	0,12	0,98	0,79	25,5
Prins Alexander	66	Zevenkamp	0,46	15	6	16	8	22	66	78	0,12	0,97	0,80	27,0
Rivium	40	Rivium (Werknaam)	0,51	0	15	5		35	50	0	0,14	0,97	1,00	26,0
Spaanse Polder	53	Spaanse Polder	0,27	26	10	6	7	14	76	1	0,10	0,95	0,77	32,1
Stadscentrum	12	Cool	0,28	39	1	5	16	7	92	69	0,08	0,95	0,52	30,5

Wijknaam	Nr	Buurtnaam	NDVI	Bebouwd (%)	Water (%)	Openbaar groen (%)	Gebouwhoogte (m)	Totaal groen (%)	Totaal verhard (%)	Inwonerdichtheid (ha <sup>-1</sup> )	Albedo	Emissiviteit	Skyviewfactor	T <sub>opp</sub> (°C)
Stadscentrum	13	Cs-Kwartier	0,22	13	0	2	25	12	88	24	0,08	0,94	0,74	31,2
Stadscentrum	19	Dijkzicht	0,34	22	8	13	17	27	65	13	0,10	0,96	0,73	28,9
Stadscentrum	17	Kop van Zuid	-0,07	8	63	2	38	5	32	40	0,06	0,97	0,78	30,3
Stadscentrum	18	Nieuwe Werk	0,35	9	32	25	15	24	45	19	0,08	0,98	0,76	24,8
Stadscentrum	11	Oude Westen	0,34	39	0	3	12	4	96	168	0,08	0,96	0,54	29,5
Stadscentrum	10	Stadsdriehoek	0,16	24	22	4	16	5	73	95	0,08	0,95	0,65	30,0
Vondelingenplaat	95	Vondelingenplaat	0,09	7	25	0	13	8	67	0	0,11	0,92	0,72	31,1



Figuur 9 Scatterplots met op de x-as de verschillende hittefactoren en op de y-as de gemiddelde oppervlaktetemperatuur van de 89 buurten in Rotterdam afgeleid uit de 15 Landsatbeelden overdag, zoals gegeven in 0. De regressielijn en het 95% betrouwbaarheidsinterval zijn ook weergegeven.



Tabel 6 Gemiddelde waarde en range van waarden van hittefactoren voor de buurten van Rotterdam. Daarbij de Pearson correlatie en regressiecoëfficiënt tussen de betreffende hittefactoren en de gemiddelde oppervlaktetemperatuur overdag afgeleid uit de 15 Landsatbeelden. Alle trends zijn significant op basis van het 95%-betrouwbaarheidsinterval, behalve water. In de tabel staan eerst de directe hittefactoren genoemd, vervolgens de indirecte.

	<i>Hittefactor</i>	<i>Range van waarden</i>	<i>Gemiddelde waarde</i>	<i>Pearson correlatie - r</i>	<i>Regressiecoëfficiënt (en standaard deviatie)</i>
directe factoren	Albedo	0,06 – 0,16	0,10	-0,64	-82,91 (10,76)
	Emissiviteit	0,92 – 1,00	0,97	-0,90	-173,30 (9,18)
	skyviewfactor	0,52 – 1,00	0,77	-0,61	-13,74 (1,90)
indirecte factoren	Bebouwd (%)	0 – 39	15	0,54	0,14 (0,02)
	Totaalverhard (%)	0 – 96	60	0,62	0,07 (0,01)
	Openbaargroen (%)	0 – 42	11	-0,52	-0,16 (0,03)
	Totaalgroen (%)	2 – 66	24	-0,83	-0,13 (0,01)
	Gebouwhoogte (m)	3 – 38	10	0,52	0,27 (0,05)
	Water (%)	0 – 63	14	0,13	0,02 (0,02)
	Inwonerdichtheid (ha <sup>-1</sup> )	0 – 256	67	0,36	0,01 (0,00)
	NDVI	-0,07 – 0,78	0,39	-0,81	-11,27 (0,88)

### 3.3.2 *Hittefactoren als verklaring van de buurtgemiddelde oppervlaktetemperaturen*

Uit de vorige paragraaf bleek dat vooral de percentages verhard en bebouwd oppervlak en het percentage groenoppervlak een duidelijk verband hebben met de gemiddelde oppervlaktetemperatuur. Tabel 5 laat zien dat dit tevens de mogelijke oorzaken zijn van de relatief hoge oppervlaktetemperaturen van de wijken Nieuw Mathenesse, Spaanse Polder en Vondelingenplaat, zoals in Hoofdstuk 2 werd gevonden uit de Landsatbeelden. Nieuw Mathenesse en Vondelingenplaat behoren met een waarde van respectievelijk 7 en 8 % voor totaalgroen tot de minst groene wijken. Ook Spaanse Polder heeft relatief weinig groen (14% voor totaalgroen), en valt op door het hoge percentage aan bebouwd (26%) en totaal verhard (76%) gebied.

Voor de wijken Kralingen-Crooswijk, Hoek van Holland, Hillegersberg/Schiebroek, Overschie en Bedrijventerrein Schieveen werden relatief lage oppervlaktetemperaturen gevonden in Hoofdstuk 2. Tabel 5 laat zien dat de buurten in deze wijken gemiddeld een laag percentage aan bebouwd oppervlak hebben (ongeveer 8%) en een hoog percentage aan totaal groen in de wijk (ongeveer 43%).

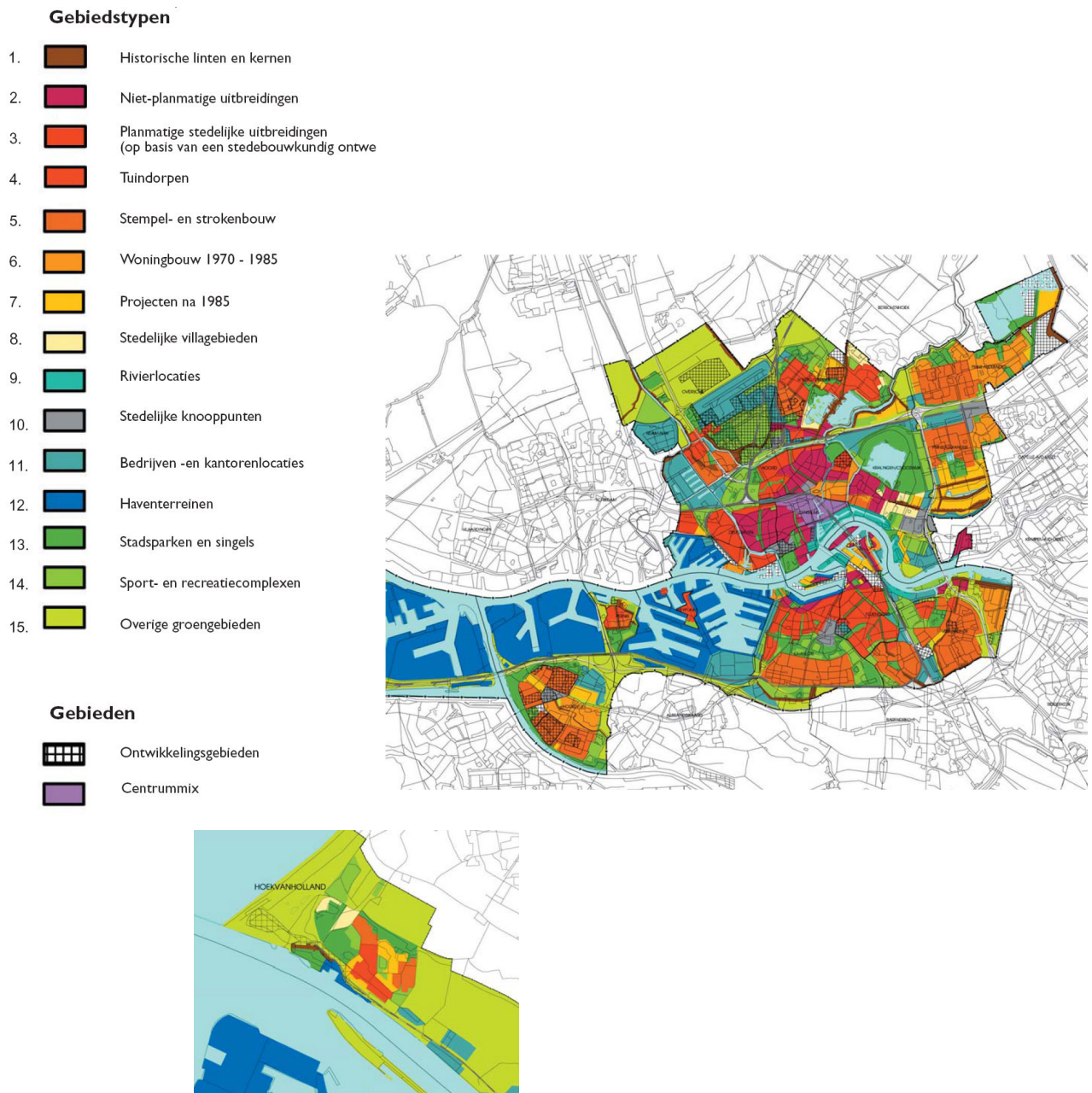
### 3.3.3 *Stedelijke typologieën en hitte*

Rotterdam is ingedeeld in een aantal gebieden op grond van een typologie die specifiek gericht is op gebiedsgerichte welstand. Deze gebiedstypologie komt uit de Koepelnota Welstand Rotterdam, 2004 ([http://www.rotterdam.nl/tekst:koepelnota\\_welstand\\_rotterdam](http://www.rotterdam.nl/tekst:koepelnota_welstand_rotterdam)) en onderscheidt gebieden op grond van ontstaansgeschiedenis, stedenbouwkundige samenhang, architectuur, openbare ruimte, functionaliteit, en grootte. In deze typologie zijn onder andere historische linten en kernen, stedelijke villagebieden en tuindorpen opgenomen. Figuur 10 geeft de gebiedstypen van Rotterdam weer.

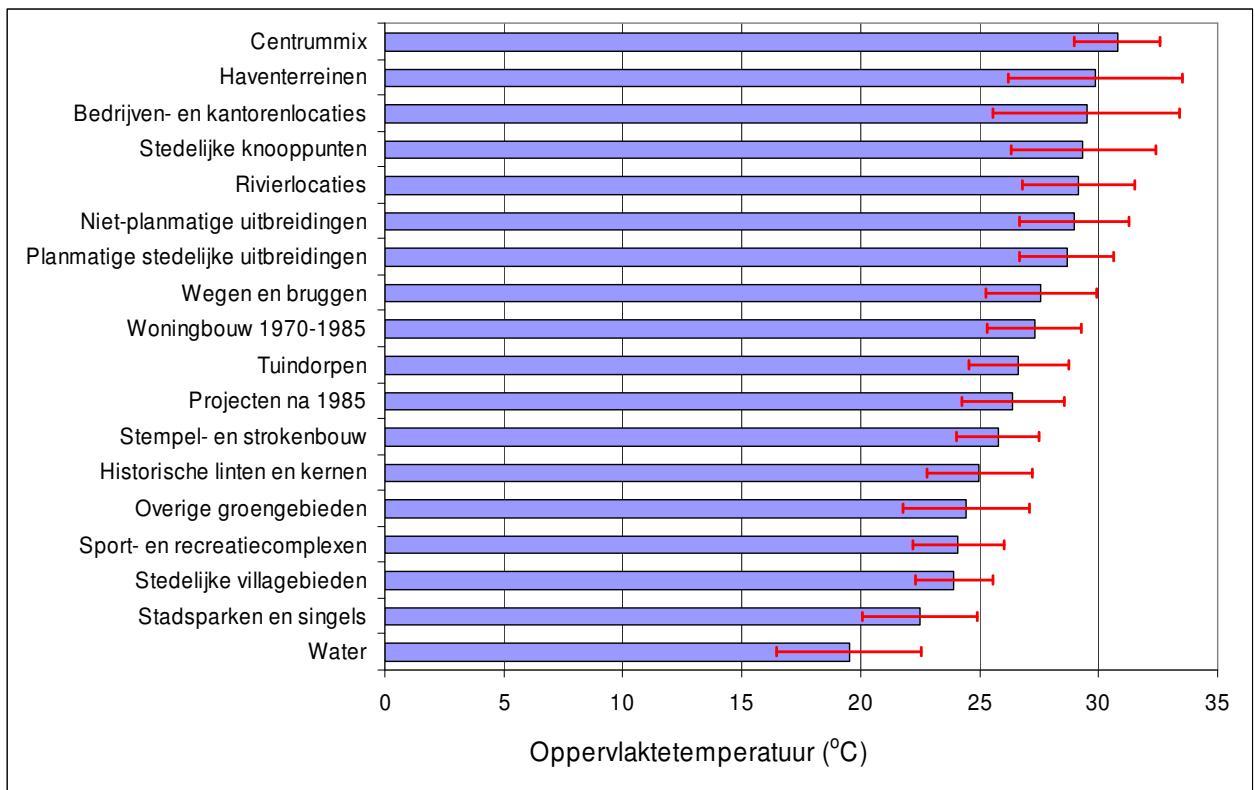
Voor elk gebiedstype is een gemiddelde oppervlaktetemperatuur bepaald op basis van de 15 Landsatbeelden (Tabel 1). Hieruit is af te leiden welke typologieën het gevoeligst zijn voor hitte. Figuur 11 laat zien dat er significante temperatuurverschillen optreden tussen een aantal gebiedstypen. De vijf warmste gebiedstypen zijn: Centrummix, Haventerreinen, Bedrijven- en kantorenlocaties, Stedelijke knooppunten en Rivierlocaties. De eerste vier uit dit rijtje zijn niet verrassend gezien deze gebiedstypen waarschijnlijk hoge percentages verhard oppervlak kennen, hoge gebouwen en weinig groen. Echter, het gebiedstype Rivierlocaties zou vanwege de locatie dicht aan de rivieren minder warm ingeschat worden. Dat Rivierlocaties toch relatief warme oppervlaktetemperaturen kent, houdt mogelijk verband met wat in § 3.3.1 al is opgemerkt, namelijk dat het percentage water in een gebied geen significante relatie vertoont met de oppervlaktetemperatuur.

Opvallend is dat Wegen en bruggen niet tot de heetste gebiedstypes behoort. Dit zou je verwachten vanwege het asfalt en de verharding. Waarschijnlijk spelen de lagere oppervlaktetemperaturen van bermgroen hierin een rol. Daarnaast is de resolutie van de satellietbeelden (60 tot 120 m) mogelijk te grof om de oppervlaktetemperatuur van deze smalle lange oppervlaktes nauwkeurig te bepalen. Veel satellietpixels zullen daarom een gemixt signaal zijn van wegen en bruggen met het aangrenzend gebied zoals bermgroen en water.

De vijf gebiedstypen met de laagste oppervlaktetemperaturen zijn: Water, Stadsparken en singels, Sport- en recreatiecomplexen, Overige groengebieden en Stedelijke villagebieden. Dit ligt in de lijn der verwachtingen gezien deze gebieden de typisch groene gebiedstypen zijn met relatief weinig verhard oppervlak en weinig bebouwing.



Figuur 10 Gebiedstypen van Rotterdam (Bron: [http://www.rotterdam.nl/tekst:koepelnota\\_welstand\\_rotterdam](http://www.rotterdam.nl/tekst:koepelnota_welstand_rotterdam))



Figuur 11 Gemiddelde oppervlaktetemperatuur op grond van 15 Landsatbeelden gemiddeld over voor de verschillende gebiedstypen in Rotterdam (zie Figuur 10), gerangschikt van hoog naar laag. De standaard afwijking in het gemiddelde is met een rode foutenbalken aangegeven.

### 3.4 Conclusies

Geografische kenmerken die de ruimtelijke variatie in de oppervlaktetemperatuur verklaren zijn voornamelijk gerelateerd aan groen, verharding, bebouwing, gebouwhoogte, en eigenschappen zoals de albedo en emissiviteit. Een statistische analyse tussen de buurtgemiddelde oppervlaktetemperaturen van Rotterdam en deze kenmerken toont significante relaties aan. Deze kunnen worden gebruikt om op het schaalniveau van buurten een afchatting te doen van het effect hittemaatregelen. De conclusies zijn:

- Factoren die een significante relatie vertonen met de buurtgemiddelde oppervlaktetemperaturen van Rotterdam overdag zijn als eerste de directe hittefactoren: albedo, emissiviteit en de skyviewfactor. Daarnaast vertonen vooral de indirecte hittefactoren percentage bebouwd land en onverhard oppervlak, percentage openbaar en totaal groen, en gemiddelde gebouwhoogte een significante correlatie.
- Het percentage water in de buurt vertoont geen significante relatie met de oppervlaktetemperatuur overdag. Dat wil zeggen dat het verkoelende effect van water zich niet vertaalt in meetbaar lagere oppervlaktetemperaturen.
- Vermindering van het verharde oppervlak en het uitbreiden van het totale of openbare groengebied verlaagt de buurtgemiddelde oppervlaktetemperatuur. Het effect ligt in de orde van 1°C wanneer het percentage verharde of groenoppervlak verandert met 10%. In deze analyse is geen onderscheid gemaakt tussen verschillende soorten vegetatie zoals bomen, gras, lage struiken, parken,

straatbeplanting of privétuinen en het effect daarvan op de gemiddelde oppervlaktetemperatuur. Dit zou onderzocht moeten worden in een vervolgonderzoek.

- Een verhoging van de buurtgemiddelde albedo of emissiviteit met 0,01 door het gebruik van andere oppervlaktematerialen heeft een verlagend effect op de oppervlaktetemperatuur overdag van respectievelijk 0,8 en 1,7 °C.
- De relatief warme oppervlaktetemperaturen van de wijken Nieuw Mathenesse, Spaanse Polder en Vondelingenplaat beschreven in Hoofdstuk 2 worden verklaard door relatief weinig groen in deze gebieden en een hoog percentage aan bebouwd en verhard oppervlak. De relatief lage oppervlaktetemperaturen van de wijken Kralingen-Crooswijk, Hoek van Holland, Hillegersberg/Schiebroek, Overschie en Bedrijventerrein Schieveen in Hoofdstuk 2 worden verklaard door relatief weinig bebouwd oppervlak en veel groen in deze wijken.
- Een analyse van de oppervlaktetemperaturen op grond van de verschillende gebiedstypen van Rotterdam laat zien dat overdag Centrummix, Haventerreinen, Bedrijven- en kantorenlocaties, Stedelijke knooppunten en Rivierlocaties de warmste locaties zijn. De gebiedstypen Water, Stadsparken en singels, Sport- en recreatiecomplexen, Overige groengebieden en Stedelijke villagegebieden vertonen relatief lage oppervlaktetemperaturen overdag.
- De gevonden relaties tussen de verschillende hittefactoren en de gemiddelde oppervlaktetemperatuur kunnen gebruikt worden om het effect te bepalen van hittemaatregelen op buurtniveau ten aanzien van groen, verhard oppervlak en gebouwhoogtes. In hoeverre deze relaties ook bruikbaar zijn voor gebieden buiten Rotterdam zou in een vervolgonderzoek onderzocht moeten worden.



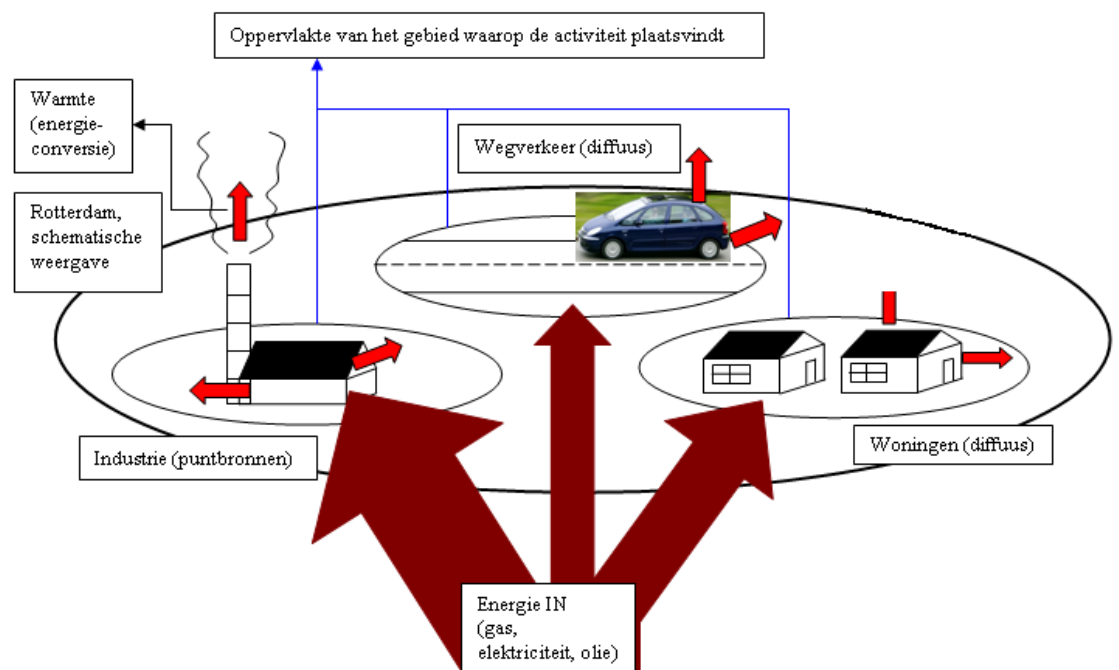
## 4 Dynamische oorzaken: antropogene warmtebronnen

### 4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het onderzoek naar de antropogene warmte in Rotterdam gerapporteerd. Hieronder verstaan we de antropogene warmte die vrijkomt bij energieconversie voor menselijke activiteiten (industrie, huishoudens, verkeer, ruimteverwarming, etc.). Om een nauwkeurige kwantificering te kunnen doen is een inventarisatie gemaakt van de verschillende bronnen van antropogene warmte. In het kader van dit onderzoek worden als bronnen onderscheiden industrie (§ 4.3), warmteproductie van het verkeer in Rotterdam (§ 4.4) en woningen (§ 4.5). In deze paragrafen worden de resultaten op kaarten van Rotterdam weergegeven. Het eindresultaat van het onderzoek is een tabel van Rotterdam met daarop de totale warmteproductie (§ 4.6).

### 4.2 Bronnen van antropogene warmte en aanpak

Het kwantificeren van alle warmtefluxen uit de energiebalans om het stedelijk hitte-effect van Rotterdam te bepalen is een zeer uitgebreid werk. Dit hoofdstuk richt zich alleen op de antropogene warmtebronnen ( $Q_F$ ) die zijn onderverdeeld in verkeer, industrie en consumenten (gealloceerd aan woningen). Deze bronnen staan door energieconversie voelbare warmte af. Echter, bij industrie speelt ook latente warmteafgifte een rol vanwege het koelen met water (§ 4.3.1). Voelbare warmte is warmte die direct invloed heeft op de luchttemperatuur, latente warmte is warmte die door water wordt opgenomen en zorgt voor een faseverandering, in dit geval van vloeibaar water naar waterdamp, waarbij geen temperatuursverandering optreedt. In Figuur 12 wordt de thematiek van het onderzoek nader belicht.



Figuur 12 Schema van warmtestromen en de in dit onderzoek onderzochte antropogene bronnen

Ingaande energie bij de antropogene bronnen bestaat uit fossiele brandstoffen of elektriciteit die voor alle doeleinden worden ingezet (autorijden, industriële processen en tv kijken of ruimtekoeling/-verwarming bij consumenten). Deze energie wordt geconverteerd waarna ze als warmte vrijkomt waarbij we aannemen dat *alle* energieconversie als warmte vrijkomt. Deze vrijkomende warmte wordt in dit rapport nader onderzocht. Voor elk van de drie bronnen (industrie/puntbronnen, wegverkeer en consumenten/woningen) is de warmteproductie bepaald, evenals de oppervlakte waarop de warmteproducerende activiteit plaatsvindt. In Figuur 12 wordt dit gerepresenteerd door de ovaal waarin de bron is afgebeeld. Met deze berekeningsmethode wordt een specificatie aangebracht in de allocatie van de warmte, namelijk van  $W/m^2$  *gemeente-oppervlak* naar  $W/m^2$  *gebruiksoppervlak*. Het oppervlak wordt in dit onderzoek gedefinieerd als de oppervlakte waarop een activiteit plaatsvindt zoals gezien vanuit een bovenaanzicht, in meer concrete termen: de oppervlakte van het dak van een gebouw of de oppervlakte van een weg waarop voertuigen zich voortbewegen. De aannames die hierbij zijn gemaakt, zijn in dit rapport nader uitgediept.

Door Van Harmelen *et al.* (2008) is voor industrie, verkeer en huishoudens van Rotterdam al eerder een benadering gemaakt van de warmteproductie gemiddeld over de gemeente Rotterdam (Tabel 7). Deze gegevens dienen als vertrekpunt voor dit onderzoek, en per categorie zullen de nieuwe waarden in dit rapport worden vergeleken met de waarden van Van Harmelen *et al.* (2008). Tabel 1 laat zien dat de grote puntbronnen (industrie) 90% van de totale antropogene warmte veroorzaken. Vervoer veroorzaakt 6% en de rest van de warmte wordt veroorzaakt door consumenten.

Tabel 7 Warmtebronnen uit Van Harmelen et al. (2008)

Warmtebron	Vaststellingsmethode	$W/m^2$ gemeente oppervlakte
Grote puntbronnen	CO <sub>2</sub> uitstoot (individuele emissieregistratie)	48,0
Kleine / middelgrote bedrijven	Diffuse CO <sub>2</sub> emissie	0,3
Vervoer	Diffuse CO <sub>2</sub> emissie	3,2
Lichaamswarmte	Bottom-up ( $W/m^2$ lichaamsopp/lichaamsopp/persoon )	0,2
Ruimteverwarming	Aangenomen als 0 op zomerdag	0,0
Koken	Gasverbruik per woning	0,5
Elektriciteitsgebruik apparaten	Bottom-up (elektriciteitsgebruik per woning)	0,5
Elektriciteitsgebruik verlichting	Bottom-up (elektriciteitsgebruik per woning, 6 h/d)	0,4
<b>Totaal antropogene warmtebronnen</b>		<b>53,2</b>
Ruimtekoeling (1 airco per huishouden)	Bottom-up (elektriciteitsgebruik per woning per dag)	0,8
<b>Totaal</b>		<b>54,0</b>

In de volgende paragrafen wordt nader uitgelegd wat de gebruikte methode is om de warmte te berekenen. Voor vrijwel alle warmtebronnen – met uitzondering van lichaamswarmte – is het gebruiken van energiestatistieken de gekozen methode omdat dit de volledigste en nauwkeurigste manier is om een warmtebalans op te stellen.

De bijdrage van dit rapport aan het inzicht in het stedelijke hitte-eiland is:

- verbeteren van de vaststellingsmethode voor antropogene warmte (waar mogelijk),
- onderscheid maken naar de vorm waarin deze warmte vrijkomt (met name industrie),



- vaststellen van de geografische locatie van warmteproductie,
- onderscheid maken van warmteproductie naar tijdstippen op dagen waar mogelijk,
- bepalen van een eerste orde benadering van de antropogene warmteafgifte op de luchttemperatuur.

### 4.3 Industriële warmteproductie

Van alle bronnen van antropogene warmte (verkeer, huishoudens, bedrijven, consumenten) is de industrie de grootste. De berekening van Van Harmelen *et al.* (2008) resulteerde in een productie van  $48 \text{ W/m}^2$  gemeente-oppervlak voor grote puntbronnen en een warmteproductie van  $0,3 \text{ W/m}^2$  gemeente-oppervlak voor kleine en middelgrote bedrijven (Tabel 7). Daarmee nemen puntbronnen ruim 90% in van de totale warmteproductie in Rotterdam. De auteurs hebben gebruik gemaakt van publiekelijk toegankelijke CO<sub>2</sub>-uitstoot data per bedrijf.

Een belangrijk vraagstuk is niet alleen hoeveel warmte de industrie in Rotterdam en omstreken produceert, maar ook wáár deze warmte vrijkomt en, nog belangrijker, of het bijdraagt aan de temperatuurverandering op leefniveau. Omdat recentelijk door TNO in opdracht van het PBL (PlanBureau voor de Leefomgeving) voor elk geregistreerd bedrijf de coördinaten, hoogte, brandstofverbruik en warmte-inhoud van de uitstoot uit de schoorsteen zo nauwkeurig mogelijk zijn bepaald, zijn deze gegevens gebruikt om de industriële warmteproductie in meer detail te bepalen. De resultaten van deze berekening worden in deze paragraaf beschreven. Allereerst worden in §4.3.1 de energiestromen die binnen de industriële activiteiten plaatsvinden beschreven.

#### 4.3.1 Omschrijving van warmte-emissie door de industrie

In een industriële omgeving vinden veel soorten van warmteproductie plaats. In deze paragraaf worden de belangrijkste vormen behandeld en wordt geschat en verklaard wat de verhouding is van voelbare en latente warmte geëmitteerd door industriële puntbronnen.

Als in het productieproces van een bedrijf warmte nodig is, wordt hierin meestal voorzien door een gasgestookte boiler, waarmee in een gesloten systeem stoom dan wel heet water gemaakt wordt. Bij ruimteverwarming op basis van een watertemperatuur van ca. 70°C is het energetisch rendement ca. 90% en verlaat ca. 10% van de warmte de schoorsteen van de verbrandingsinstallatie. Die 90% komt in de vorm van ruimteventilatie en warmteafgifte van het gebouw vrij in de omgeving.

Als in het proces warmte nodig is van hoge temperatuur wordt met de boiler meestal stoom geproduceerd of een combinatie van warmte en kracht (warmtekrachtkoppeling). In dat geval zijn de energieverliezen via de schoorsteen 20 tot 30% van de primaire energie. Afhankelijk van de verhouding tussen de benodigde kracht en warmte zijn er verschillende systemen beschikbaar. De in het bedrijf gebruikte energie (kracht en warmte) komt uiteindelijk vrij via afvoer van warm water dan wel warme lucht, tenzij de energie terecht komt in het product in een andere vorm (bijv. fysisch en/of chemisch). Hoe de warmte geloosd wordt hangt sterk af van het type bedrijf en de ligging aan oppervlaktewater. Voor lozing op het oppervlaktewater zijn beperkingen gesteld. Het oppervlaktewater mag niet warmer worden dan 28 °C en de opwarming van het watersysteem mag niet meer bedragen dan 3 °C. Om de productie in warme

perioden niet stil te leggen wordt de warmte in dergelijke omstandigheden meestal aan de buitenlucht afgestaan via koeltorens dan wel luchtkoelers. Volgens de BREF (BAT Reference Documents) Industrial Cooling Systems is voor kustlocaties doorstroomkoeling de best beschikbare techniek voor het afvoeren van restwarmte. In het Rijnmondgebied zal dan ook veel warmte via inname en lozing van koelwater plaatsvinden. Dit geldt vooral voor de energiecentrales en de petrochemische industrie waar grote hoeveelheden warmte afgevoerd worden. In hoeverre er ook warmte via koeling met lucht plaatsvindt, kan voor een individueel bedrijf mogelijk aan de vergunning dan wel aan het milieujaarverslag ontleend worden. Het valt echter buiten het onderzoekskader om dit voor iedere puntbron uit te zoeken. Bij toepassing van luchtkoelers komt de warme lucht meestal op dakniveau vrij in de vorm van voelbare warmte (gesloten koelsysteem) en/of latente warmte (verdampingskoeler). Een ander deel van de warmte komt vrij via gebouwventilatie.

Voor de afvoer van proceswarmte wordt in de industrie meestal een gesloten koelsysteem toegepast als het te koelen proceswater een temperatuur heeft van meer dan 80 °C. De proceswarmte wordt door middel van een vloeistof (meestal water) naar de buiten opgestelde luchtkoeler geleid. In de luchtkoeler wordt de vloeistof afgekoeld door buitenlucht, die via een ventilator door de koeler geblazen wordt. Alle warmte komt vrij in de vorm van voelbare warmte. In de industrie zijn deze vaak op het dak opgesteld, waarbij de warmte meestal niet via een schoorsteen geëmitteerd wordt. Als processen in de industrie bij temperaturen lager dan de omgevingstemperatuur moeten plaatsvinden (bijv. invriezen), worden meestal compressiekoelsystemen toegepast, waarbij de onttrokken warmte samen met de hiervoor benodigde krachtenergie (meestal elektriciteit) vrijkomt in de in de buitenlucht opgestelde condensatiekoeler.

Bij energiecentrales is vaak een koeltoren aanwezig om de bij het opwekken van elektriciteit vrijgekomen warmte af te voeren als deze tijdens warme perioden niet geloosd mag worden op het oppervlaktewater. Bij dergelijke koeltorens wordt het water meestal gerecycled waarbij een deel in de koeltoren verdampt en dus weer aangevuld moet worden (open recirculatie koelsysteem). Verdamping van water wordt toegepast omdat op die manier een lage retourtemperatuur van het koelwater te bereiken is. In de koeltoren koelt het water af door intensief contact met de omgevingslucht, waarbij de koeling vooral een gevolg is van verdamping van water (ca. 80%). De warmte komt dus vrij in de vorm van latente warmte (tot 80%) en voelbare warmte (20%).

De huidige EON kolencentrales op de Maasvlakte (2 x 520 MW<sub>el</sub>) worden gekoeld met zeewater en hebben dan ook geen koeltorens. Doordat zeewater over het algemeen kouder is dan oppervlaktewater is het rendement van de centrale ca. 45% t.o.v. 35 tot 40% bij koeling met oppervlaktewater. Er komt dus iets meer warmte vrij dan er aan elektriciteit wordt opgewekt (ook de te bouwen nieuwe kolencentrale op de Maasvlakte (MPP3) wordt gekoeld met zeewater en wordt dan ook niet voorzien van koeltorens).

Het specifieke energiegebruik van olieraffinaderijen ligt volgens de BREF tussen de 1 en meer dan 4 GJ per ton productdoorzet (hoe complexer de raffinaderij hoe meer energie gebruikt wordt). Om in de benodigde energie te voorzien wordt in Europa tussen de 3% (eenvoudige raffinaderij) en 10% (complexe raffinaderij) van de doorzet verbrand in allerlei typen verbrandingsinstallaties (boilers, WKK's, naverbranders, fakkels). Bij 5 % verbranding van de olie doorzet en een verbrandingswarmte van 42 MJ/kg komt per ton doorzet ca. 2000 MJ/ton doorzet aan warmte vrij. Waarschijnlijk komt dus slechts 5 % van de verbrandingswarmte vrij via de schoorstenen van de

verbrandingsinstallaties. Circa 95 % komt dus op een andere wijze vrij. De olieraffinaderijen voeren het grootste deel van de overige warmte af via koelwater dat geloosd wordt op het oppervlaktewater. Een klein deel van de warmte zal op dakniveau van de productie-installaties vrijkomen en dan vooral als voelbare warmte.

#### 4.3.2 Gebruikte methode

Warmteproductie door de industrie in Rotterdam is berekend via een simpele 'warmtebalans'-methode:

$$\text{Warmteproductie} = \text{Warmte}_{\text{schoorsteen}} + \text{Warmte}_{\text{koelwater}} + \text{Warmte}_{\text{leefniveau}}$$

De totale warmte wordt dus opgedeeld in 3 categorieën waarin het vrijkomt, namelijk de schoorsteen, het koelwater en warmte op leefniveau. Tabel 8 laat zien hoe de warmte die vrijkomt bij een aantal typen van industriële activiteiten verdeeld wordt over de categorieën.

Tabel 8 Overzicht globale kentallen voor warmte-emissies tijdens hitteperioden in Rotterdam

Warmtebron	Capaciteit	Energieafgifte (% van capaciteit)	Emissiewijze	Voelbaar/latent in de lucht
Energiecentrales	Verbrandingswarmte primaire energie	20%	Schoorsteen	10% voelbaar 90% latent
		40%	Oppervlaktewater	Verdwijnt uit budget
		40%	Elektriciteit	Verdwijnt uit budget
Olieraffinaderijen	Verbrandingswarmte brandstoffen	10 %	Schoorsteen (incl fakkels)	25% voelbaar 75% latent
		90%	Dakniveau (ca. 10%)	90% voelbaar 10% latent
			Oppervlaktewater (ca. 90%)	Verdwijnt uit budget
Proceswarmte industrie (warmte/kracht)	Vermogen verbrandings-installatie	25%	Schoorsteen	25% voelbaar 75% latent
		75%	Dakniveau (ca. 50%)	50% voelbaar (aanne)me 50% latent (aanne)me
			Oppervlaktewater (ca. 50%)	Verdwijnt uit budget
Droog/meng/reactie- processen	Verwarmings- vermogen	~50%	schoorsteen	25% voelbaar 75% latent
		~50%	Dakniveau	100% voelbaar (aanne)me

Wat Tabel 8 laat zien is hoeveel warmte er uiteindelijk via de beschikbare kanalen wordt afgevoerd en hoeveel er dus overblijft op leefniveau (dakniveau). Voelbare warmte is warmte die direct invloed heeft op de luchttemperatuur, latente warmte is warmte die door water wordt opgenomen en zorgt voor een faseverandering, in dit geval van vloeibaar naar damp, waarbij geen temperatuursverandering optreedt.

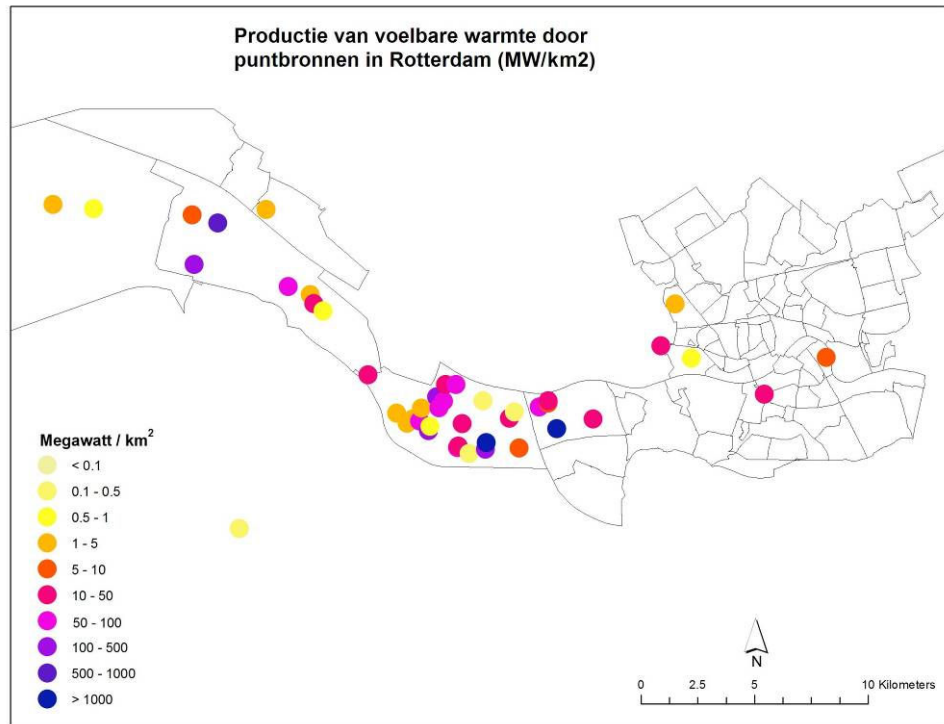
Bij energiecentrales wordt ongeveer 40% van de geproduceerde warmte omgezet in elektrische energie. Deze warmte 'verdwijnt' dus eigenlijk uit de balans van de centrale, maar komt in huishoudens als warmte vrij. Warmte die wordt opgevangen in oppervlaktewater, zoals bij een aantal centrales in het Rotterdamse industriegebied gebeurt, wordt elders geloosd waar de warmte geen invloed heeft op de warmtebalans. Ook deze warmte verdwijnt als het ware uit het systeem. Hierbij is dus aangenomen dat de antropogene opwarming van het oppervlaktewater (of zeewater) door het lozen van koelwater een verwaarloosbare invloed heeft op het klimaat, vandaar dat overall bij oppervlaktewater 'verdwijnt uit budget' is ingevuld.

De industrie in Rotterdam wordt in dit onderzoek een aantal simpele basisactiviteiten toebedeeld: (1) energiecentrales, (2) raffinaderijen, (3) verbrandingsprocessen en (4) droog/meng en reactieprocessen. Aangenomen wordt dat de tijd waarin de industrieën in bedrijf zijn ofwel (1) continu of (2) gedurende een bedrijfstijd van 2000 uur/jaar (8 uur per dag, 5 dagen per week en 50 weken per jaar) bedragen. Van raffinaderijen, energiecentrales en afvalverwerkingcentrales wordt aangenomen dat ze continu draaien. De oppervlakte van de bedrijventerreinen is in onderhavig onderzoek niet bepaald, daarom is hier een standaardwaarde van 1 km<sup>2</sup> per bedrijventerrein aangenomen.

#### 4.3.3 *Resultaten*

De geaggregeerde warmteproductie van de puntbronnen in Rotterdam kan nog niet worden weergegeven omdat er nog geen toestemming is verleend vanuit de betreffende instanties. De voelbare warmte is wel geplot, zie Figuur 13. Over de totale warmteproductie kan worden opgemerkt dat de resultaten van de berekeningen variëren van minder dan 5 MW/km<sup>2</sup> tot hoger dan 20000 MW (20 GW)/km<sup>2</sup>. Het hangt voornamelijk van de productiegrootte af hoeveel warmte er wordt geproduceerd en in mindere mate van de efficiëntie. Zie hierover ook §4.3.1 over de BREF.

Allereerst dient opgemerkt te worden dat de eenheid van warmteproductie in Figuur 13, MW/km<sup>2</sup>, overeenkomt met de meer gangbare eenheid van W/m<sup>2</sup>.



Figuur 13 Productie van voelbare warmte door puntbronnen in Rotterdam

Omdat het de voelbare warmte is die bijdraagt aan het stedelijk hitte-effect, is deze geplot in Figuur 13. Feitelijk laat deze figuur een vereenvoudiging van Tabel 8 zien: het is het percentage voelbare warmte van de totaal geproduceerde warmte die vrijkomt. Afhankelijk van het soort proces dat zich afspeelt is de hoeveelheid voelbare warmte een resultante van de totale warmte vermenigvuldigd met de percentages energieafgifte, emissiewijze en warmtebalans. Een vereenvoudiging van Tabel 8 wordt in Tabel 9 weergegeven.

Tabel 9 Netto percentage voelbare warmte geproduceerd door puntbronnen

Warmtebron	Emissiewijze	Netto percentage	Geëmitteerde voelbare warmte (W/m <sup>2</sup> ) (geaggregeerd over gehele industrie in Rotterdam)
Droog/meng/reactie-processen	Schoorsteen	13	300
Droog/meng/reactie-processen	Dakniveau	50	1300
Energiecentrales	Schoorsteen	2	550
Olieraffinaderijen	Schoorsteen	3	1500
Olieraffinaderijen	Dakniveau	8	4800
Proceswarmte industrie (w/k)	Schoorsteen	6	350
Proceswarmte industrie (w/k)	Dakniveau	19	1000

In Figuur 13 is te zien dat de grootste bronnen (>20 GW) uiteindelijk tussen de 500 en > 1000 MW/km<sup>2</sup> aan voelbare warmte produceren. De bronnen in en nabij het centrum produceren tussen de 0,5 en 50 MW/km<sup>2</sup> en zijn dus in sterkte ondergeschikt aan de

warmteproductie van de inwoners in woningen (zie §4.5). Het is dus waarschijnlijk dat het hitte-eiland niet significant versterkt zal worden door deze puntbronnen.

#### 4.3.4 *Belangrijkste conclusies over de warmteproductie van de industrie*

- De absolute warmteproductie varieert van minder dan 5 W/m<sup>2</sup> tot meer dan 20 kW/m<sup>2</sup>. De grootste warmteproducenten (energiecentrales en raffinaderijen) bevinden zich in het industriegebied van Rotterdam waar geen bevolking woont.
- De puntbronnen in het centrum, voornamelijk met warmteproducties tussen de 30 en 1000 W/m<sup>2</sup> kunnen invloed hebben op het stedelijk hitte-effect op lokale schaal.
- De voelbare warmte geproduceerd door de industriële puntbronnen in Rotterdam in het bewoonde gebied (rondom het centrum) bedraagt voornamelijk tot 50 W/m<sup>2</sup>.

### 4.4 **Warmteproductie door het wegverkeer in Rotterdam**

Door Van Harmelen *et al.* (2008) is een schatting gemaakt van de warmteproductie door het vervoer in Rotterdam. De gehanteerde werkwijze hierbij was om de stedelijke CO<sub>2</sub>-uitstoot van het verkeer (in kg/jaar) te delen door de emissiefactor, 72 GJ per uitgestoten kg CO<sub>2</sub> (dit is een gemiddelde van diesel en benzine). Het resulterende energieverbruik is vervolgens gedeeld door de oppervlakte van Rotterdam. De berekening van de auteurs leverde een warmteproductie door het verkeer van 3,2 W/m<sup>2</sup> gemeente-oppervlak (Tabel 7).

In onderhavig onderzoek is met een grote verkeersdatabase en gegevens over het verbruik van het wegverkeer een warmteproductie van het verkeer berekend in W/m<sup>2</sup> wegdekoppervlak. Vervolgens is deze warmteproductie in een kaart van Rotterdam geploteerd, om te kunnen visualiseren waar de 'hotspots' zich bevinden.

#### 4.4.1 *Gebruikte data en werkwijze*

##### *Intensiteiten en verbruik van personenauto's en vrachtauto's*

Op grond van verkeersintensiteiten van het jaar 2007 voor alle wegen in het Rijnmondgebied is de warmteafgifte bepaald. De verkeersintensiteiten bestaan uit etmaalgemiddelde aantallen vracht- en personenauto's en snelheden voor wegsegmenten van 10 meter lengteverschil. In Tabel 10 wordt een voorbeeld gegeven van deze informatie.

Tabel 10 Voorbeeldsfragment van de verkeersintensiteitendatabase. De warmteafgifte (laatste kolom) is door TNO bepaald.

x-coördinaat	y-coördinaat	Wegtype	Autotype	Snelheid (km/h)	Warmteafgifte (W/m <sup>2</sup> )
98200	452925	Stadsweg	Personenauto	30	0,009
98200	452925	Stadsweg	Vrachtauto	30	0,003
94775	145160	Snelweg	Personenauto	80	0,05
94775	145160	Snelweg	Vrachtauto	80	0,1
...	...	...	...	...	...

De brandstofverbruiksgegevens zijn afkomstig van het CBS (2009). Het CBS produceert jaarlijks de verkeersstatistieken van Nederland waaronder de vervoersprestaties (kilometrages), het verbruik per voertuigcategorie en de emissies van veel luchtverontreinigende componenten. De vervoersprestaties worden weergegeven per voertuigcategorie, per brandstofsoort (benzine, diesel en LPG) en per wegtype (bebouwde kom, landelijke wegen en snelwegen). De verkeersintensiteitendatabase onderscheidt twee voertuigcategorieën, namelijk personenauto's en vrachtauto's. Andere voertuigen die ook tot deze categorieën behoren – te weten bestelauto's en trekkers – worden niet onderscheiden. Het verbruik is berekend door het gewogen gemiddelde van deze voertuigen te nemen, met als gewicht de vervoersprestatie van deze voertuigen. In Tabel 11 is weergegeven welke CBS voertuigcategorieën zijn gebruikt om de voertuigcategorie behorende bij de verkeersintensiteitendatabase te representeren. Tevens is het berekende verbruik weergegeven.

Tabel 11 Vergelijking van voertuigcategorieën volgens de verkeersintensiteitendatabase en het CBS en het berekende brandstofverbruik van de voertuigen.

Wegtype	verkeersintensiteiten categorie	CBS categorieën	Verbruik (MJ/km)
Stadsweg	Personenauto's	Personenauto's en bestelauto's	3,6
Stadsweg	Vrachtauto's	Vrachtauto's en trekkers	17,9
Snelweg	Personenauto's	Personenauto's en bestelauto's	2,6
Snelweg	Vrachtauto's	Vrachtauto's en trekkers	10,9

Het verbruik in MJ/km horende bij deze categorieën is voor de brandstoffen diesel en benzine omgerekend naar MJ/s door te delen met de snelheid in km/s.

#### *Bepaling van de oppervlakte en de warmte-afgifte*

Zoals in §4.2 al is aangegeven zijn er aannames gedaan voor de bepaling van de oppervlakte. Het oppervlak waarover een voertuig zich effectief beweegt in 1 seconde wordt bepaald door de snelheid vermenigvuldigd met de breedte van de rijstrook (plus eventuele vluchtstrook, die bij de rijstrook wordt gerekend). In het verkeersintensiteitenbestand is helaas geen informatie bijgevoegd over de rijstrookbreedte noch is hierover vanuit andere bronnen informatie beschikbaar. Daarom is aangenomen dat de breedte van een rijstrook 4 meter bedraagt voor iedere weg in de database.

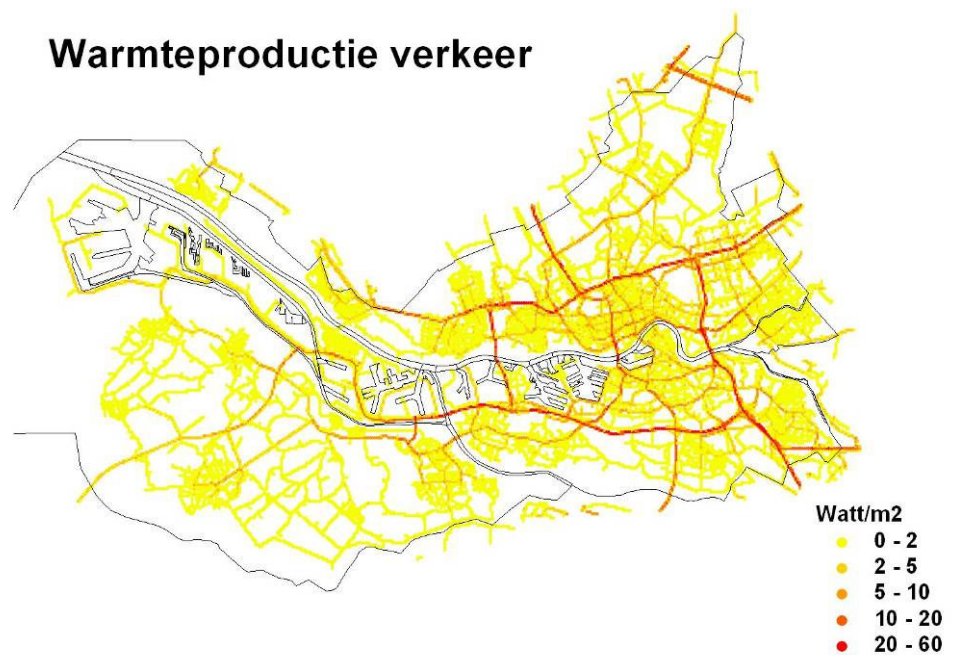
De warmteafgifte in  $\text{W/m}^2$  is in onderhavig onderzoek bepaald op de volgende manier:

$$\text{Warmte}_{\text{afgifte}} = \frac{n}{60 \times 60 \times 24} \times \frac{\text{Verbruik}}{b \times v} \times 1 \cdot 10^6$$

Met  $n$ : aantal getelde voertuigen gedurende 24 uur,  $\text{Verbruik}$ : het brandstofverbruik per voertuig in MJ/s,  $b$ : de breedte van de rijstrook (in dit onderzoek is aangenomen dat iedere rijstrook 4 meter breed is) en  $v$ : snelheid van het voertuig in m/s.

#### 4.4.2 Resultaten

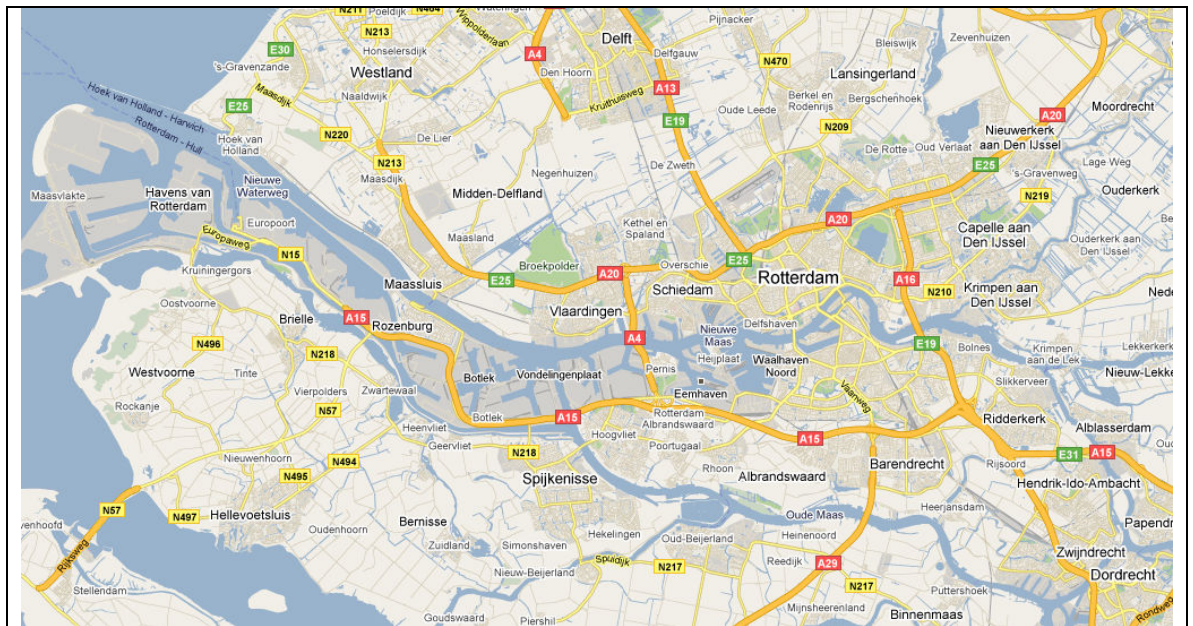
De etmaalgemiddelde warmteproducties als gevolg van verkeer in Rotterdam zijn berekend en presenteren een gemiddelde warmteproductie over de gehele dag. Figuur 14 toont het resultaat van deze berekening.



Figuur 14 Warmteproductie op wegen in en nabij Rotterdam

Warmteproducties variëren van 0 tot  $2 \text{ W/m}^2$  op rustige wegen in stads- en buitenwijken tot en met  $60 \text{ W/m}^2$  op grote snelwegen. De gemiddelde waarde voor het wegennet in Rotterdam is  $13 \text{ W/m}^2$ . In onderstaande figuur wordt een schematische weergave getoond van het wegennet rondom Rotterdam, zodat de wegen waarop veel warmteproductie plaatsvindt geïdentificeerd kunnen worden.

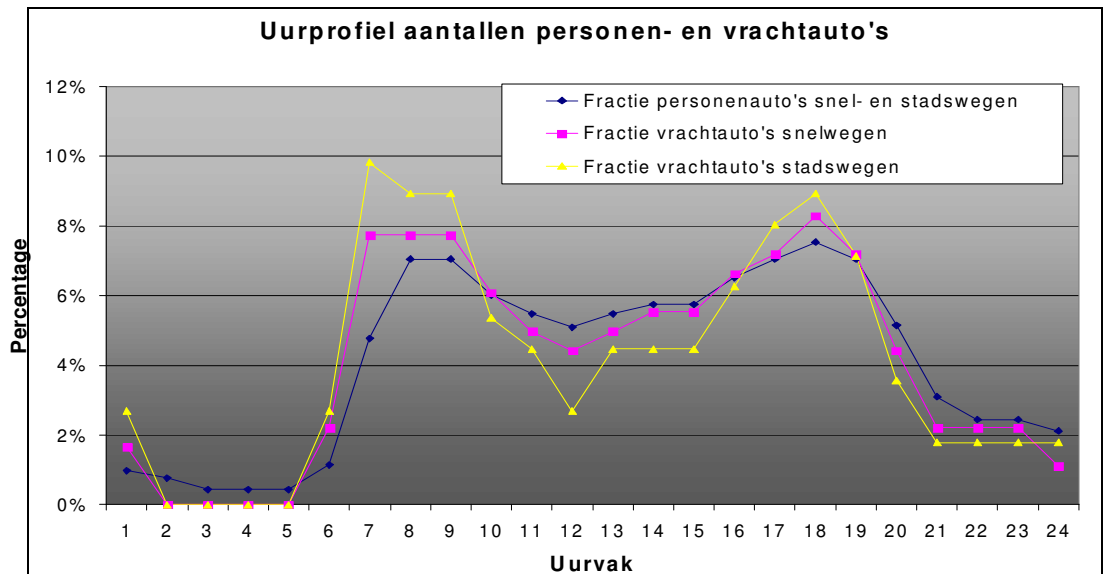




Figuur 15 Wegennet in en rondom Rotterdam. Bron: <http://maps.google.nl> (opgehaald op dinsdag 02-03-2010).

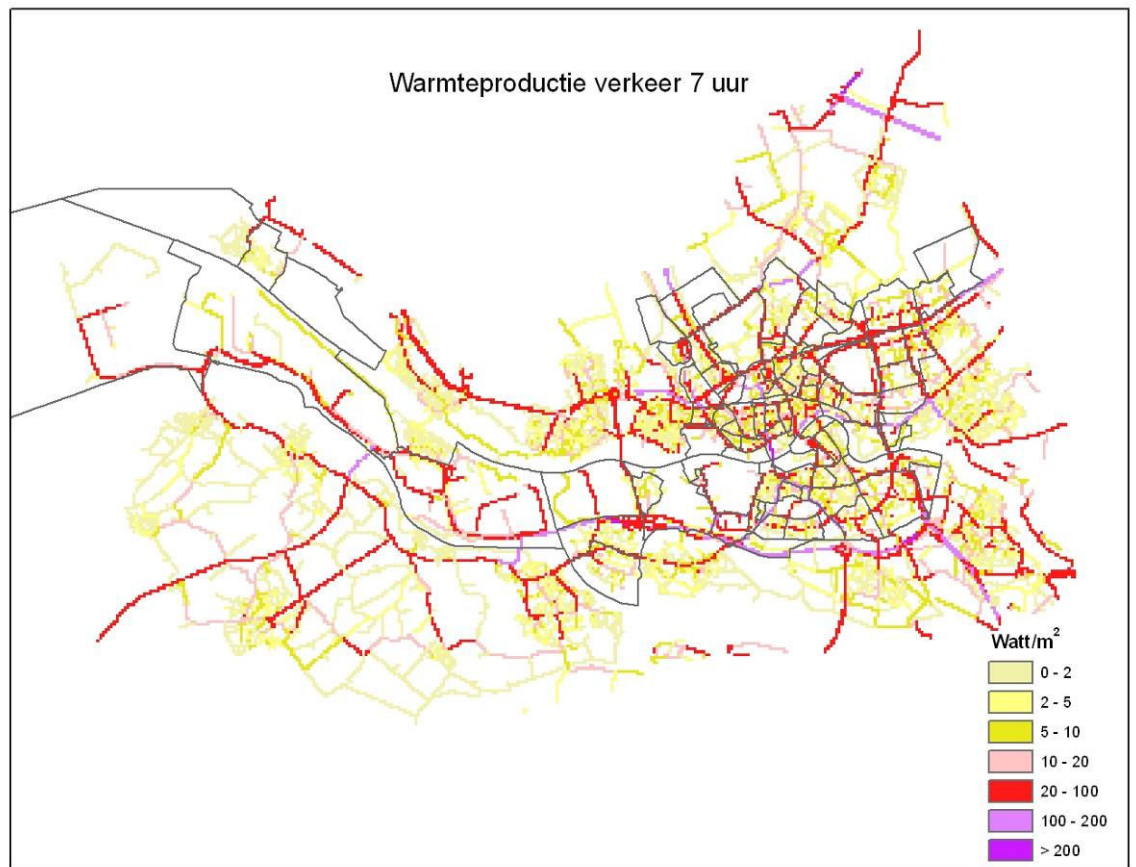
Duidelijk te zien is dat verkeer op de snelwegen A16, A20, A13, A15, A29 en A4 een hoge warmteproductie heeft in de orde van 20 tot 60  $W/m^2$ . Dit is te verklaren vanuit de bezettingsgraad. De snelwegen vormen de belangrijkste aan- en afvoerroutes van verkeer. Het bekende fileprobleem in het westen van Nederland zal in dit geval ook significant bijdragen aan de warmteproductie (zie §4.3 voor nadere uitleg hierover). De grotere wegen in Rotterdam centrum – tussen de A4, A20, A16 en A15 – vallen in de orde van 5 tot 20  $W/m^2$ , hoger dan de rest van de binnenwegen. Dit is een gevolg van de wegdichtheid en bezettingsgraad die in het centrum hoger zijn dan in perifeer gelegen gebieden.

De resultaten worden verder gespecificeerd naar uurgemiddelden. Vanuit VROM (2007) is een uurprofiel voor snel- en stadswegen beschikbaar. Deze verkeersintensiteit is een landelijk gemiddelde, maar in het onderzoek voor Rotterdam is aangenomen dat de landelijke verkeersintensiteit niet significant afwijkt van die in Rotterdam. In Figuur 16 wordt de wekdaggemiddelde verkeersintensiteit getoond voor personenauto's en vrachtauto's op snel- en stadswegen.



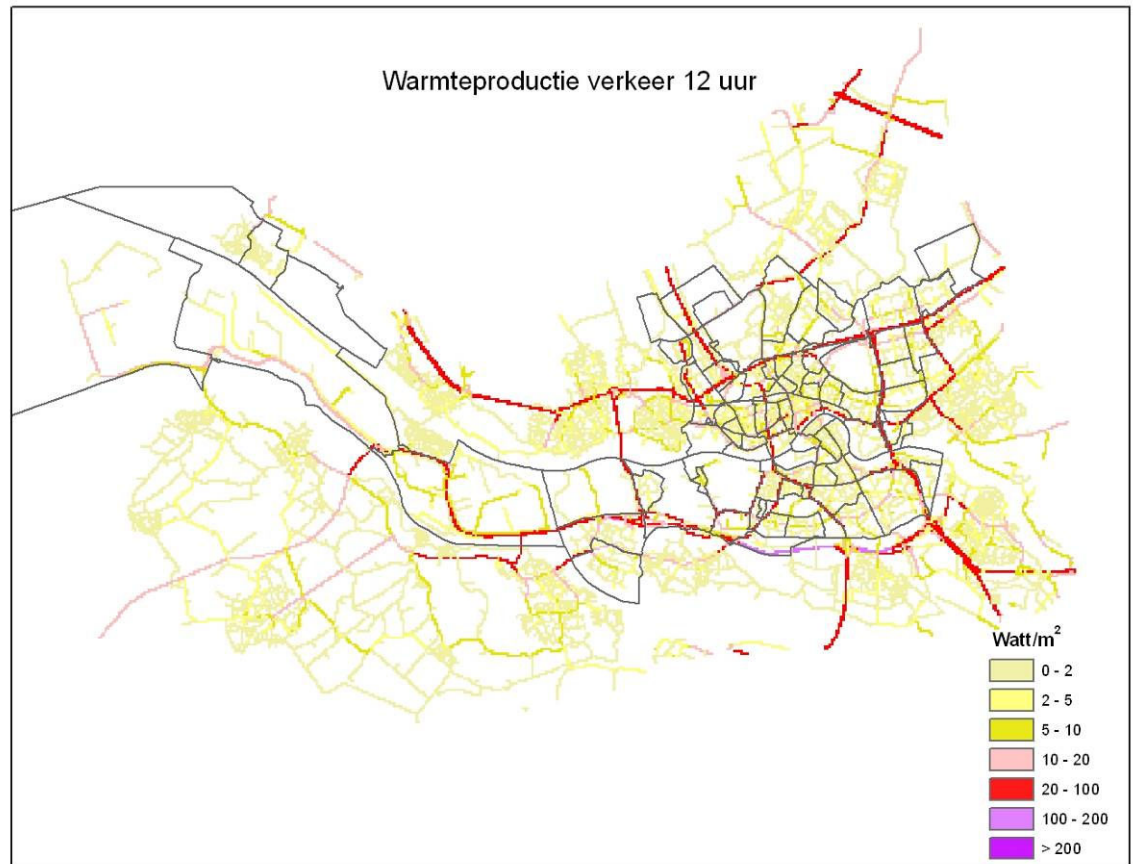
Figuur 16 Verkeersintensiteit (uurprofiel) van een gemiddelde weekdag

De fractie personenauto's op snelwegen heeft verwaarloosbaar kleine verschillen met stadswegen. In dit onderzoek zijn deze fracties daarom aan elkaar gelijk gesteld. De warmteproductie voor ieder uur op de dag wordt in dit rapport niet weergegeven. Er is gekozen om voor een aantal belangrijke ijkpunten gedurende dag de verkeerswarmteproductie te plotten, namelijk om 07:00 's ochtends, 12:00 's middags en 18:00 's avonds. Deze uurvakken zijn gekozen omdat ze de ochtendspits, het midden van de dag en de avondspits representeren: tijdstippen waarop veel mensen onderweg en buiten zijn en dus potentieel ook veel hinder ondervinden van antropogene warmte. De figuren behorende bij deze tijdstippen staan hieronder weergegeven.



Figuur 17 Warmteproductie van het verkeer om 07:00 uur

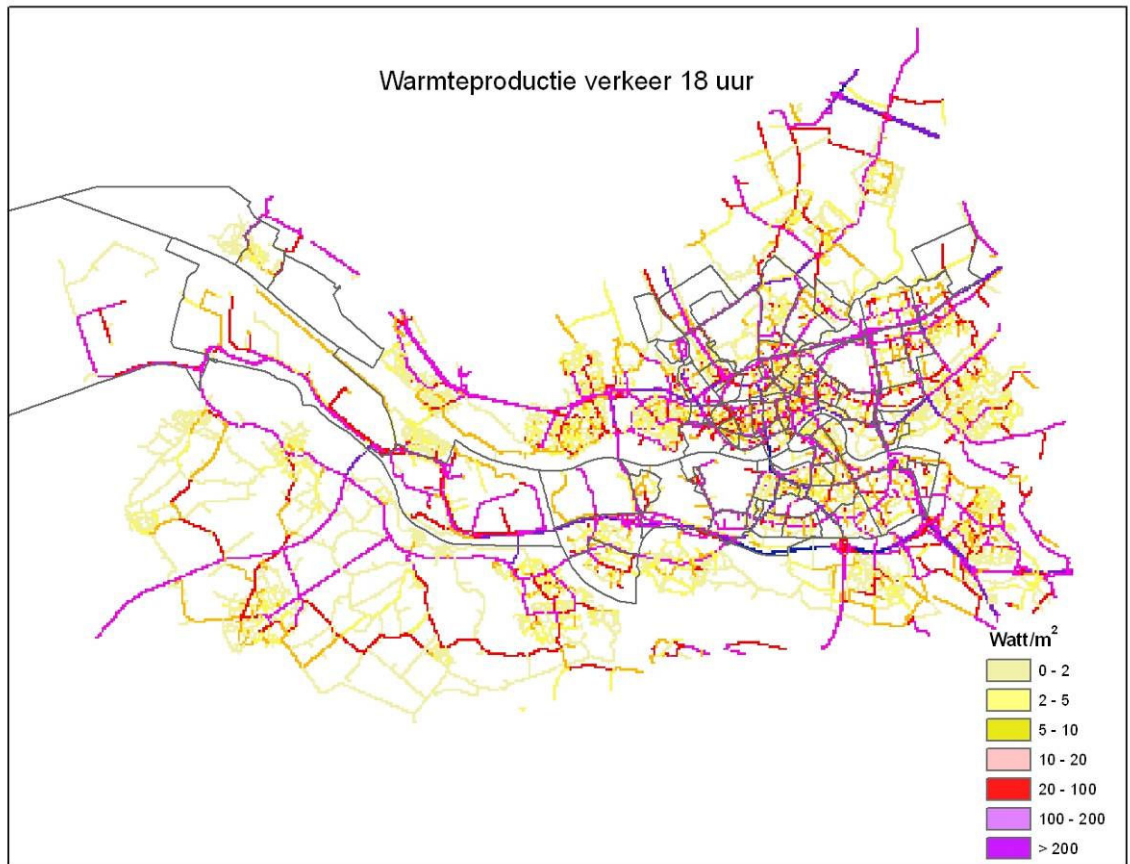
Gemiddeld over de dag komt de warmteproductie niet boven de  $50 \text{ W/m}^2$  uit. In de ochtendspits zijn de waarden een stuk hoger; de grote snelwegen komen in de orde van  $20$  tot  $100 \text{ W/m}^2$  uit. Op sommige stukken nadert de warmteproductie zelfs de  $200 \text{ W/m}^2$ .



Figuur 18 Warmteproductie van het verkeer om 12:00 uur.

Rond het middaguur is het een stuk rustiger op het Rotterdamse wegennet, getuige Figuur 18. Op slechts enkele stukken is er nog een warmteproductie van 200 W/m<sup>2</sup> te vinden. Enkel de snelwegen bevinden zich nog in de categorie 20 tot 100 W/m<sup>2</sup>. De stads- en buitenwegen hebben nu een veel minder warmteproductie. In Figuur 17 (07:00 uur) bevonden veel van dit soort wegen zich ook in de klasse tot 100 W/m<sup>2</sup>, om 12:00 uur is dit een stuk minder.

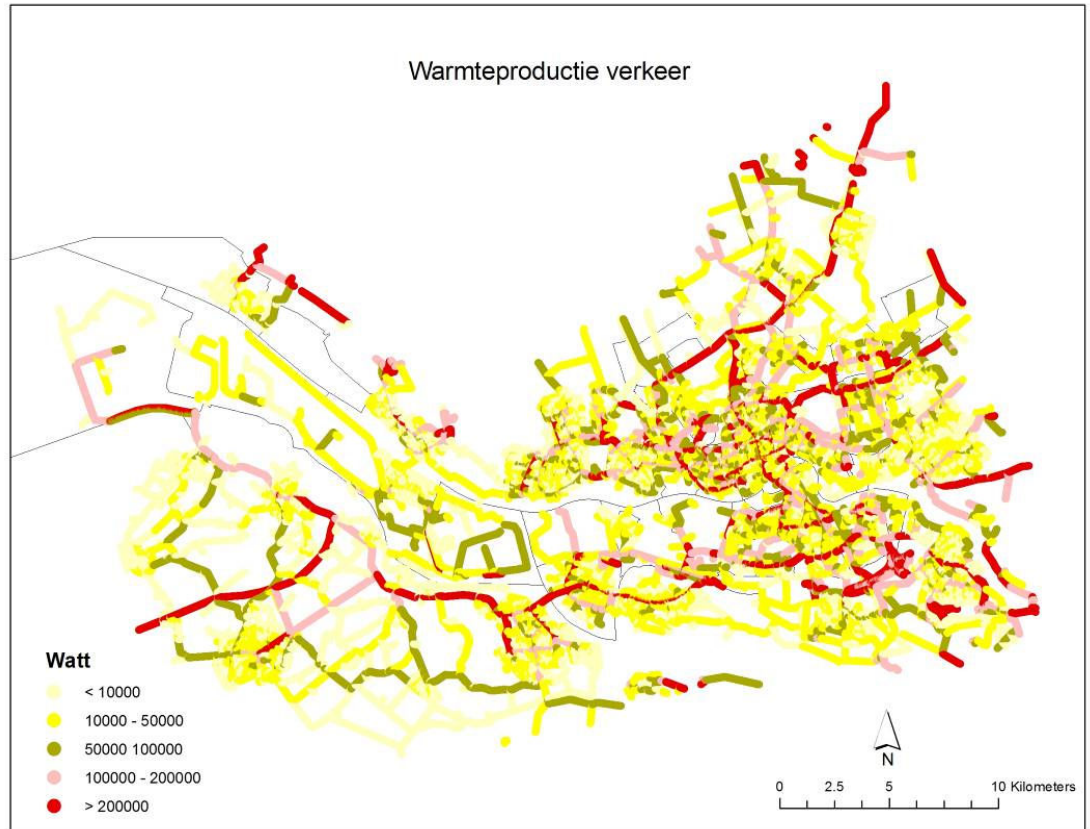




Figuur 19 Warmteproductie van het verkeer om 18:00 uur.

De avondspits (Figuur 19) is een stuk drukker dan de ochtendspits (Figuur 17). Vrijwel alle snelwegen hebben een warmteproductie van meer dan  $200 \text{ W/m}^2$  en veel wegen in het centrum hebben ook een verhoogde warmteproductie. De bezettingsgraad van de wegen is omstreeks dit tijdstip zo hoog dat alle wegen volstromen en als gevolg hiervan de warmteproductie flink stijgt.

In Figuur 20 wordt de bronsterkte van het verkeer weergegeven. De bronsterkte houdt de absolute warmteproductie in op een wegsegment onafhankelijk van de breedte van de rijstrook.



Figuur 20 Warmteproductie van het wegverkeer

In feite laat Figuur 20 geen afwijkende verhoudingen zien ten opzichte van Figuur 14 op de snelwegen in en rondom Rotterdam wordt de meeste warmte geproduceerd met waarden van meer dan 200 kW. De hoogste waarde is 4,5 MW, maar deze data wordt vanwege de aggregatie van de legenda niet getoond.

#### Verklaring van piekwaarden van warmteproductie door het Rotterdamse verkeer

Op een drukke weg komen volgens de verkeersintensiteitendatabase gemiddeld 65000 voertuigen per etmaal voorbij. Omgerekend is dit 0,7 voertuig per seconde. Aangenomen dat dit een personenauto is, bedraagt het energiegebruik 3,6 MJ/km (3600 J/m), ofwel 100 kW per voertuig bij een snelheid van 100 km/h (27,8 m/s). In dit gebied wordt dus 70 kW aan warmte geproduceerd. Op belangrijke aanvoersnelwegen zijn er waarschijnlijk minimaal 4 rijstroken (twee rijrichtingen) naast elkaar dus levert dit al 210 kW op per coördinatenset. De warmteproductie wordt natuurlijk hoger met 70 kW per rijstrook op punten als afslagen of knooppunten kan de warmte nog hoger zijn, en als verondersteld wordt dat een kwart van de voertuigen een vrachtwagen is met een verbruik van 18 MJ/km (18000 J/m; 400 kW bij 80 km/h) dan wordt de warmteproductie  $3 \times 70 \text{ kW} + 400 \text{ kW}$  is 610 kW. Wanneer er – hypothetisch – 10 rijstroken zijn, bijvoorbeeld 3 rijbanen en twee in-/uitvoegstroken waar een viaduct overheen loopt met ook nog 6 rijstroken, is de warmteproductie op dat punt 1,6 MW (geproduceerd door vrachtwagens) plus 840 kW (geproduceerd door personenauto's) = 2,4 MW. De 4,5 MW die wordt genoemd in de tekst hierboven, wordt geproduceerd op grote wegen met meer vrachtwagens, die relatief langzaam rijden. Hoe lager de snelheid namelijk, hoe langer een voertuig op het stukje weg verblijft, hoe hoger de warmteproductie.

#### 4.4.3 *Kanttekeningen en opmerkingen bij de gebruikte methode*

In de gebruikte data waarmee de warmteproductie van het verkeer is berekend, zijn – uiteraard – een aantal aannames verwerkt die mogelijk onnauwkeurigheden in de resultaten tot gevolg hebben. Deze aannames worden hier besproken.

Ten eerste is er geen informatie over de dynamiek van het verkeer bekend, terwijl opstoppingen e.d. waarschijnlijk voor een grotere warmteproductie zorgen. Dit kan een oorzaak zijn van verhoogde warmteproductie op drukke snelwegen, zoals in Figuur 14 te zien is.

Omdat er ten tijde van onderhavig onderzoek geen officiële informatie beschikbaar was over de breedte van de snelwegen, provinciale wegen en stadswegen in Rotterdam is er vanuit gegaan dat iedere rijstrook een breedte heeft van 4 meter. Uiteraard is dit een grove onderschatting voor een knooppunt van snelwegen waar wel tot 4 rijbanen naast elkaar kunnen liggen en een onderschatting voor een weg op een woonerf.

Vervolgens zijn er alleen etmaalgemiddelde verkeersintensiteiten bekend. Om een waarde voor de warmteafgifte per seconde te verkrijgen wordt veel data gemiddeld. Dit effect verdwijnt wel grotendeels wanneer de uurprofielen worden toegepast.

De derde kanttekening bestaat uit het aangenomen landelijk gemiddelde voor de verdeling in voertuigtypen en brandstoftypen. Dit wijkt mogelijk af van de situatie in Rotterdam waar mogelijk relatief veel zwaar vrachtverkeer rijdt in verband met het havengebied.

Tot slot is de vierde kanttekening bij de resultaten te vinden in termen van de warmtebalans. Voor de industrie is in grove lijnen bekend hoeveel voelbare en latente warmte vrijkomt maar bij het wegverkeer zijn hiervoor wegens gebrek aan gegevens geen expliciete uitspraken over gedaan. In plaats daarvan is aangenomen dat alle geproduceerde warmte is vrijgekomen als voelbare warmte.

#### 4.4.4 *Belangrijkste conclusies van de warmteproductie van het wegverkeer*

De belangrijkste bevindingen van de warmteproductie van het verkeer zijn:

- ➔ De meeste hitte wordt gegenereerd op de grotere wegen waar – logischerwijze – meer verkeer is. De bezettingsgraad bepaalt grotendeels de warmteproductie.
- ➔ Waarden variëren van 0,04 W/m<sup>2</sup> in woonwijken, 10 W/m<sup>2</sup> op buitenwegen tot >60 W/m<sup>2</sup> op snelwegen. Gemiddeld over het hele wegennet en de hele dag is de warmteproductie 13 W/m<sup>2</sup>. Bronsterkten zijn veel hoger: tot wel enkele MW op sommige wegvakken.
- ➔

#### 4.5 **Warmteproductie door inwoners in gebouwen**

Antropogene warmteproductie is gezien de topografische verdeling en het energiegebruik de meest diffuse bron van warmte en daarom moeilijk om precies per tijdstip en locatie te berekenen. Het is daarentegen wel mogelijk om een totaalplaatje weer te geven voor een gemiddelde zomerse dag. In deze paragraaf worden de berekeningsmethoden en de resultaten daarvan gepresenteerd.

#### 4.5.1 *Lichaamswarmte*

Het aantal inwoners van Rotterdam bedraagt ongeveer 590.000. De gemiddelde warmteproductie van een persoon tijdens lichte arbeid bedraagt 150 tot 200 W. De totale Rotterdamse bevolking produceert dus ca. 90 MW aan warmte en deze warmte komt vrij op leefniveau. De gemeente heeft een landoppervlak van ca. 300 km<sup>2</sup>. De menselijke warmteproductie bedraagt dus gemiddeld ca. 0,3 W/m<sup>2</sup> in Rotterdam. Uitgedrukt in warmte per gebouw met gemiddeld 5,1 personen per gebouw wordt dit 765 W/gebouw. Ter vergelijking (zie §4.5.2): de warmteproductie door elektriciteits- en gasgebruik bedraagt 1,2 kW per inwoner.

#### 4.5.2 *Elektriciteits- en gasgebruik*

Consumenten gebruiken elektrische energie en energie uit de verbranding van gas voor een groot spectrum aan activiteiten. Deze zijn ingedeeld in een aantal categorieën. Gegevens over het energiegebruik van consumenten en bedrijven specifiek in Rotterdam waren niet beschikbaar in dit project, vanwege de privatisering van de energiemarkten. In plaats daarvan is gebruik gemaakt van landelijke CBS-data over elektriciteit en gas (Statline, <http://statline.cbs.nl>). Het gebruik van gas en elektriciteit is in Tabel 12 weergegeven. Het is aannemelijk dat 100% van de warmteproductie door gas en elektriciteit bestaat uit voelbare warmte.

Tabel 12 Berekening van het elektriciteits- en gasgebruik per inwoner

Post	Eenheid	Periode	Waarde
<i>Ruwe data (bron: CBS Statline)</i>			
Elektriciteitsverbruik via openbaar net per maand	10 <sup>6</sup> kWh/maand	Juni 2009	7738
Elektriciteitsverbruik via openbaar net per maand	10 <sup>6</sup> kWh/maand	Juli 2009	7646
Elektriciteitsverbruik via openbaar net per maand	10 <sup>6</sup> kWh/maand	Augustus 2009	7607
Gasverbruik via regionale netten per maand	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /maand	Juni 2009	1248
Gasverbruik via regionale netten per maand	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /maand	Juli 2009	1100
Gasverbruik via regionale netten per maand	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /maand	Augustus 2009	1054
<i>Bevolkingsaantal</i>			
Bevolkingsaantal	n	Juni 2009	16154257
Bevolkingsaantal	n	Juli 2009	16521505
Bevolkingsaantal	n	Augustus 2009	16528699
<i>Omgerekend naar Watt per inwoner</i>			
Elektriciteitsverbruik via openbaar net per maand	W/inw	Juni 2009	665
Elektriciteitsverbruik via openbaar net per maand	W/inw	Juli 2009	622
Elektriciteitsverbruik via openbaar net per maand	W/inw	Augustus 2009	619
Gasverbruik via regionale netten per maand	W/inw	Juni 2009	700
Gasverbruik via regionale netten per maand	W/inw	Juli 2009	550
Gasverbruik via regionale netten per maand	W/inw	Augustus 2009	522
<i>Gemiddeld verbruik op een zomerse dag</i>			
Elektriciteitsverbruik	W/inw.	Zomer gemiddeld	635
Gasverbruik	W/inw.	Zomer gemiddeld	603

Tabel 12 geeft gemiddelde waarden voor een inwoner in Nederland. In dit project wordt aangenomen dat het energiegebruik in Rotterdam niet significant afwijkt van het Nederlandse gemiddelde. Tevens wordt aangenomen dat gas- en elektriciteitsgebruik het gros van alle warmteproductie veroorzaakt. Met andere woorden energievragende activiteiten zoals het stoken van houtkachels of andere verbrandingsprocessen zoals het verbranden van kaarsen zijn niet meegenomen in het energiegebruik.



Het energiegebruik als gevolg van activiteiten is opgesplitst in een aantal categorieën zoals in Tabel 13 is vermeld:

- Klimaat (regeling van de omgevingstemperatuur)
- Warm tapwater
- Koken (Bereiden van maaltijden)
- Koelen (het koelen van dranken en bederfelijke etenswaar)
- Reinigen (reinigen van objecten, zoals stofzuigen, wassen etc.)
- Verlichting
- Audio/video
- Koken overig (activiteiten die niet direct in verband staan met bereiding van maaltijden, zoals citruspersen, blikopenen, mixen etc.)
- Persoonlijke verzorging
- Hobby
- Overig

Voor elektriciteits- en gasgebruik zijn profielen opgesteld waarbij het totale gebruik wordt opgedeeld in deze categorieën. Hiervoor is als bron ECN (1995) geraadpleegd. Alhoewel die een verouderde bron is was het de beste keuze in de beschikbare tijd. Dit resulteert in onderstaande profielen.

Tabel 13 Aandelen van verschillende categorieën binnen gas- en elektriciteitsgebruik

Categorie	Gebruik op een gemiddelde zomerdag		Gebruik op een gemiddelde zomerdag	
	Profielwaarde	Profielwaarde	Profielwaarde	Profielwaarde
	%	W/inw	%	W/inw
	<i>Elektriciteit</i>		<i>Gas</i>	
Klimaat	12	79		
Warm tapwater	9	56	97	573
Koken	7	43	3	17
Koelen	18	113		
Reinigen	19	122		
Verlichting	16	104		
Audio/video	12	77		
Koken overig	4	28		
Persoonlijke verzorging	1	6		
Hobby	1	9		
Overig				
Totaal	100	635	100	591

In het elektriciteitsprofiel nemen koelen, reinigen en verlichting ongeveer een gelijk deel en tevens het hoogste aandeel in van het totale gebruik. Waarschijnlijk heeft koelen in de winterperiode een lager aandeel dan in de zomer en verlichting een hoger aandeel. Het is aannemelijk dat – zoals in de tabel is te zien – koken (overig), persoonlijke verzorging en hobby een lager aandeel hebben in het gebruik, omdat deze categorieën bestaan uit korte, niet intensieve activiteiten. Koken is ten opzichte van deze categorieën hoger, wat te verklaren is door het feit dat een aantal mensen gebruik maakt van elektrische kookplaten. De categorie klimaat bestaat uit airconditioning (mechanische ventilatie). Dit zijn apparaten die relatief veel energie nodig hebben. Bij het gasgebruik valt op dat het verwarmen van water vrijwel de volledige bijdrage levert

aan het totale gebruik,. Dat is logisch te verklaren, omdat gas voornamelijk gebruikt wordt voor ruimteverwarming en het verwarmen van water. Ruimteverwarming is als '0' aangenomen in dit onderzoek omdat er in de zomermaanden vrijwel geen centrale verwarming wordt toegepast. Dan blijft het verwarmen van water dus over. Om stromend water continu te verwarmen is veel energie nodig. Dit verklaart het hoge aandeel van warm tapwater in het profiel. Omdat in de loop der tijd meer gebruik wordt gemaakt van elektrische apparaten (met name personal computers) zal ten tijde van het schrijven van dit rapport de profielwaarde van de categorie audio/video achterhaald zijn, maar bij gebrek aan recentere data wordt het profiel in Tabel 13 gehandhaafd.

Bovengenoemde warmteproducties zijn bepaald met energiestatistieken die zijn gemeten aan de hand van het brandstofverbruik. Er wordt alleen gas verbrand en elektriciteit gebruikt in woningen (en kantoren, maar hierover is vooralsnog geen informatie beschikbaar), dus alle gebruik van energie door inwoners vindt plaats in een woning. Om de warmteproductie van inwoners als gevolg van energievragende activiteiten te berekenen in  $W/m^2$  moet het aantal Watts gedeeld worden door de oppervlakte van de woning.

Vanuit de Gemeente Rotterdam is een GIS bestand beschikbaar gesteld met de locatie van gebouwen, de oppervlakte en de hoogte ervan (gebouwhoogtebestand). Dit is in dit onderzoek gecombineerd met een adressenbestand (ACN) en een inwonerbestand (inwoneraantal per postcodegebied). Om de inwoners te kunnen alloceren aan de gebouwen is voor elk postcodegebied een uniforme benadering gehanteerd. Dit is in dit onderzoek als volgt aangepakt.

1) Het filteren van woningen. Het gebouwhoogtebestand omvat gebouwen met alle functies, dus ook fabriekshallen, industriële gebouwen etc., maar voor dit onderzoek is er alleen interesse in woningen. Om een onderscheid te maken tussen woningen en andere gebouwen zijn de gebouwen met een oppervlakte  $<25 m^2$  en  $>250 m^2$  niet meegenomen in de berekeningen. In het geselecteerde gebied kunnen uiteraard nog utiliteitsgebouwen voorkomen, maar deze onnauwkeurigheid kan niet worden uitgesloten omdat er ten tijde van dit schrijven geen data met extra detail beschikbaar waren.

2) Het bepalen van de verdelingsleutel. In de database zijn drie variabelen die als sleutel tot verdeling van de inwoners over de woningen kunnen dienen, namelijk:

- het aantal woningen in een postcodegebied,
- de totale oppervlakte van woningen in een postcodegebied en
- het totaal aantal verdiepingen van woningen in een postcodegebied.

De keuze is uiteindelijk gevallen op het aantal verdiepingen per postcodegebied, waarbij het aantal verdiepingen is berekend door de hoogte van het gebouw te delen door 3,5 m (zie Tabel A2 in de bijlage).

De benadering waarbij inwoners worden verdeeld over het aantal verdiepingen geeft een plausibele uitkomst. Behalve 1 uitschieter (postcodegebied 15) komen er verder geen extreem hoge of lage waarden voor. Gemiddeld 3 personen per verdieping is de meest plausibele waarde; dit is vrijwel gelijk aan het gemiddeld aantal personen per huishouden in Nederland (2,4; CBS). Vanwege het ontbreken van de gebouwentyping is er van uitgegaan dat een woning met 3 verdiepingen als autonoom woonhuis kan worden beschouwd – immers, de meeste huizen hebben minimaal 2 verdiepingen en

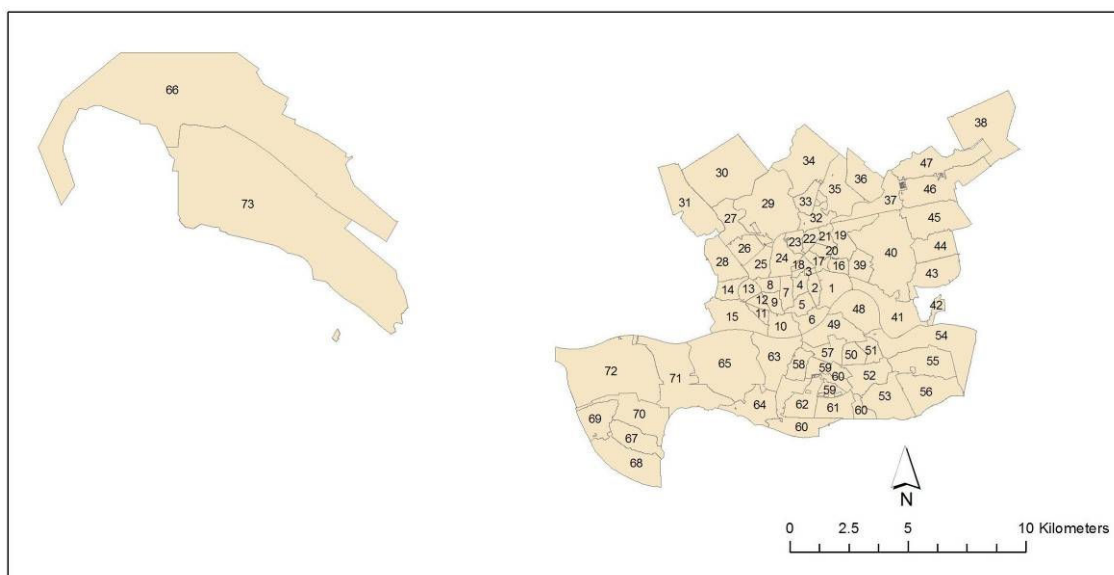
vaak zelfs 3. In zulke woningen wordt niet op iedere verdieping een apart huishouden gehuisvest, daarom worden woningen met 3 of minder verdiepingen als 1 verdieping beschouwd. Woningen met 4 of meer verdiepingen worden in dit onderzoek beschouwd als hoogbouw zoals flats of appartementencomplexen, waarbij wel iedere verdieping als huisvesting voor een huishouden dient.

3) Het bepalen van de warmteproductie per gebouw en per m<sup>2</sup>: aantal verdiepingen/gebouw \* aantal inwoners/verdieping \* warmteproductie per inwoner (zie Tabel 12). De laatste rekenstap bestond uit het uitsmeren van de warmteproductie over 1 m<sup>2</sup> oppervlak. Omdat in het gebouwenbestand ook de oppervlakte van alle woningen bekend is, is het energieverbruik per gebouw gedeeld door de oppervlakte van het gebouw.

#### 4.5.3 Resultaten

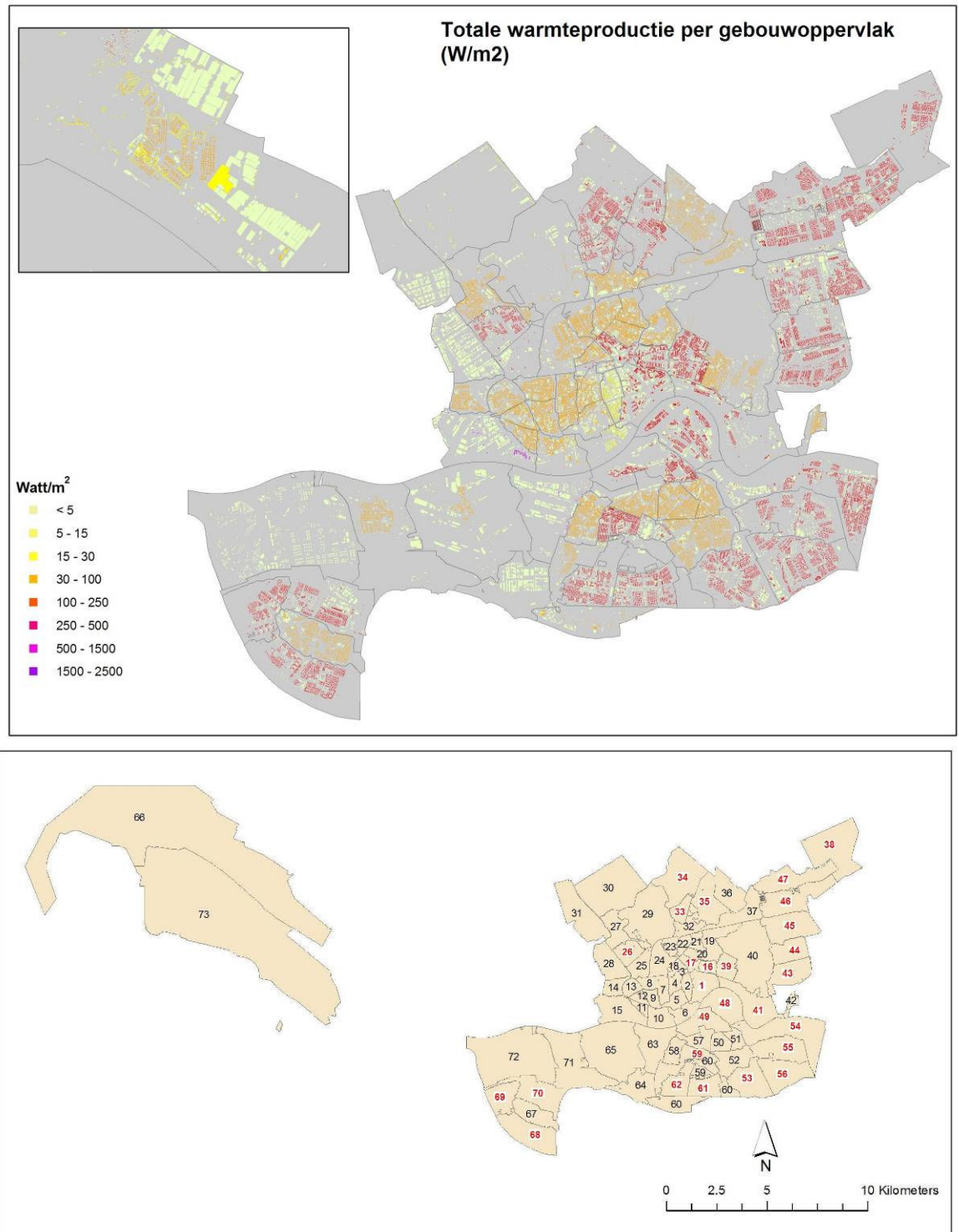
De in voorgaande paragraaf besproken aanpak heeft geleid tot een aantal plaatjes waarin zichtbaar wordt wat de warmteproductie in Rotterdam is als gevolg van gas- en elektriciteitsgebruik. In deze paragraaf worden de plaatjes met de totale warmteproductie (dus als gevolg van gas- en elektriciteitsgebruik samen) in  $W$  en in  $W/m^2$  gepresenteerd. Gespecificeerde resultaten van de warmteproductie opgesplitst in de in §5.2 genoemde profielen worden in Bijlage B gepresenteerd.

Om de resultaten te kunnen toelichten wordt in Figuur 21 een verdeling van Rotterdam in postcodegebieden weergegeven. Gekoppeld aan Figuur 21 is Tabel A2 in Bijlage A waarin de berekende parameters per postcodegebied worden gepresenteerd. Met deze parameters is uiteindelijk de warmteproductie berekend. Tabel A1 in Bijlage A toont de geaggregeerde parameters (de werkelijke database bevat ruim 128000 records).



Figuur 21 Indeling van Rotterdam in postcodegebieden (data beschikbaar gesteld door Gemeentewerken Rotterdam).

Uiteindelijk zijn de gegevens uit de database gecombineerd met de locaties van alle gebouwen in Rotterdam waarmee onderstaande Figuur 22 is verkregen. Ter verduidelijking worden de postcodegebieden tevens in Figuur 22 weergegeven, zodat de warme gebieden geïdentificeerd kunnen worden.



Figuur 22 Berekende warmteproductie per oppervlak in W/m<sup>2</sup>. Warme gebieden zijn in rood aangegeven.

Omdat de gebouwstructuren niet kunstmatig vergroot kunnen worden is het contrast tussen de warmtecategorieën niet erg helder. De inzet linksboven is het bewoonde gedeelte van Hoek van Holland, de weggelaten gebieden hebben volgens de gegevens geen inwoners en dus is hier geen warmteproductie aan toegekend. De groen gekleurde,

rechthoekige gebouwen in de inzet zijn zeer waarschijnlijk kassencomplexen. Wat opvalt in het energiegebruik in Rotterdam is dat:

1) De meest voorkomende waarde (modus) is  $47 \text{ W/m}^2$ ; dat betekent dat de categorie 10 tot  $50 \text{ W/m}^2$  het meest voorkomt. De gemiddelde warmteproductie ( $\sim 60 \text{ W/m}^2$ ) is iets hoger dan de modus.

2) De gebieden met nummers 1, 16, 17, 39, 48 en 49 in het centrum kennen hoge warmteproducties van meer dan  $100 \text{ W/m}^2$ . In deze gebieden staan gebouwen met gemiddeld een hoog aantal bewoonde verdiepingen per gebouw ( $>2$ ) en veel personen per verdieping ( $>3$ , gemiddeld ca. 4) waardoor de warmteproductie aan de hoge kant is.

3) Buiten het centrum, rondom de bij 1) genoemde gebieden, hebben de gebieden voornamelijk warmteproducties variërend van 10 tot  $100 \text{ W/m}^2$ , lager dus dan in het centrum. Dit zijn de gebieden 2 t/m 5, 7 t/m 9, 11 t/m 13, 16 t/m 18, 20 t/m 24 en 39 die relatief weinig inwoners per verdiepingen hebben (gemiddeld 2,8; voor de overige postcodegebieden is dit 3,6). Dit verklaart dat de warmteproductie gering is in vergelijking met andere postcodegebieden. Opmerkelijk is wel dat het aantal verdiepingen per gebouw gemiddeld 3,1 bedraagt tegenover 1,5 voor de rest van de postcodegebieden. Dit zou dus betekenen dat net buiten het centrum voornamelijk hoogbouw staat, maar dit strookt niet met de verwachte warmteproductie. Dit wordt verderop in deze paragraaf verklaard.

4) Hoge waarden, 100 tot  $> 400 \text{ W/m}^2$  komen vooral voor in de gebieden 38, 44 t/m 47, 52 t/m 56, 59, 61 en 62 voor. Dit zijn gebieden aan de rand (oosten en noordoosten) van Rotterdam. Hogere waarden kunnen worden veroorzaakt door veel inwoners per verdieping (of gebouw) en meer verdiepingen per gebouw. Het aantal verdiepingen per gebouw is voor de genoemde gebieden gemiddeld 1,2 (2,1 voor alle andere gebieden) dus dat is relatief laag. Het aantal inwoners per verdieping echter is 4,7 tegen 2,9 voor alle andere gebieden (met uitzondering van gebied nummer 15 met 13,6 inw./verd.) waardoor de warmteproductie per gebouw hoog is. De oppervlakte van de gebouwen in de warme gebieden is gemiddeld  $70 \text{ m}^2$  tegenover  $91 \text{ m}^2$ . Dit draagt eveneens bij aan de warmteproductie maar (veel) minder dan het aantal inwoners per verdieping – immers, iedere toegevoegde inwoner laat de warmteproductie met ca. 1,2 kW stijgen. Blijkbaar wonen er grote gezinnen in die buurten.

5) De hoogste waarden worden in gebied nummer 15 gevonden. Dit gebied heeft een warmteproductie van gemiddeld  $123 \text{ W/m}^2$  per gebouw. Oorzaken hiervan zijn de 14 personen per verdieping die gemiddeld per gebouw voorkomen. Ook is het aantal woningen in dat gebied laag, slechts 168 tegen een gemiddelde van ca. 1600. In de figuur kan worden gezien dat het om een paar gebouwen gaat met een extreem hoge warmteproductie terwijl de rest van de gebouwen koel is. Dit wijst uit dat er zeer waarschijnlijk een scheve verhouding is tussen het aantal gebouwen en het aantal inwoners. Ook is het niet waarschijnlijk dat er 14 personen op 1 verdieping wonen, dus het gaat hier waarschijnlijk om een uitbijter met als grondslag een fout in het gebouwenbestand.

Aan de ene kant zijn er koele gebouwen rondom het centrum van Rotterdam met gebouwen die veel verdiepingen hebben (zie 3) en warme gebouwen in de periferie met kleine, hoog bezette laagbouw (zie 4). De karakteristieken van gebouwen rondom het centrum suggereren dat het om hoogbouw gaat en daarbij is de verwachting dat de

bijbehorende warmteproductie hoog is vanwege de vele inwoners op een klein oppervlak. Dit blijkt uit de resultaten echter niet zo te zijn. Vice versa geldt dat de gebouwen in de rand van Rotterdam naar verwachting een relatief lage warmteproductie zouden moeten vertonen, maar ook hier blijkt het tegendeel uit de resultaten. Het lijkt dus alsof er te weinig inwoners zijn gealloceerd aan de gebouwen in het centrum en teveel inwoners aan de gebouwen in de periferie. Wellicht is dit te wijten aan onnauwkeurigheden in het gebouwen- en/of inwonersbestand. Er kan ook een andere verklaring gelden. Utiliteitsbouw (bouw niet geschikt om in te wonen, zoals kantoorpanden) is geen rekening mee gehouden omdat dit in het bronbestand niet is onderscheiden. Het kan dus zijn dat er in het centrum veel utiliteitsgebouwen zijn, waardoor de inwoners worden verspreid over meer gebouwen dan waarin zij werkelijk woonachtig zijn. Hierdoor is er dus een lagere warmteproductie.

De scheve verdeling heeft overigens *geen* invloed op de gemiddelden per postcodegebied, want die blijven gelijk.

#### 4.5.4 *Scenario: ieder gebouw met airconditioning*

Er worden steeds meer airconditioners (airco's) gekocht door particulieren om één of meerdere kamers te koelen tijdens warme perioden. De beste airconditioners zijn de zogenaamde split units, waarbij het koelgedeelte in de woning is aangebracht en het warmteafgiftedeel (condensor) buiten de woning. Een airco verbruikt elektriciteit om warmte aan de woning te onttrekken. De onttrokken warmte wordt samen met de gebruikte elektrische energie aan de buitenlucht afgegeven in de vorm van voelbare warmte. Gemiddeld over een lange periode is de warmteafgifte vrijwel gelijk aan de verbruikte elektrische energie, omdat de uit de woning onttrokken warmte weer aangevuld wordt van buiten via ventilatie en warmtegeleiding door muren en ramen. De via ventilatie in de woning tredende warmte wordt aan de buitenlucht onttrokken en door de airco weer naar buiten afgevoerd. De warmte die een gevolg is van menselijke activiteiten in de woning (koken, warmteafgifte aanwezige personen) zou bij afwezigheid van koeling via extra ventilatie naar buiten zijn afgevoerd. Netto levert dit bij gebruik van een airco een opwarming van de buitenlucht op die overeenkomt met het betreffende deel van de verbruikte elektriciteit voor de airco. Voor de warmtetoevoer, die een gevolg is van zonne-instraling geldt dat een deel daarvan via warmtestraling zou zijn uitgestraald naar het heelal via buitenmuren en dak als er niet gekoeld zou zijn. De netto opwarming van de buitenlucht bij gebruik van airco ligt dus ergens tussen het minimum dat gelijk is aan het elektriciteitsgebruik en het maximum dat gelijk is aan het elektriciteitsgebruik plus de uit de woning afgevoerde warmte.

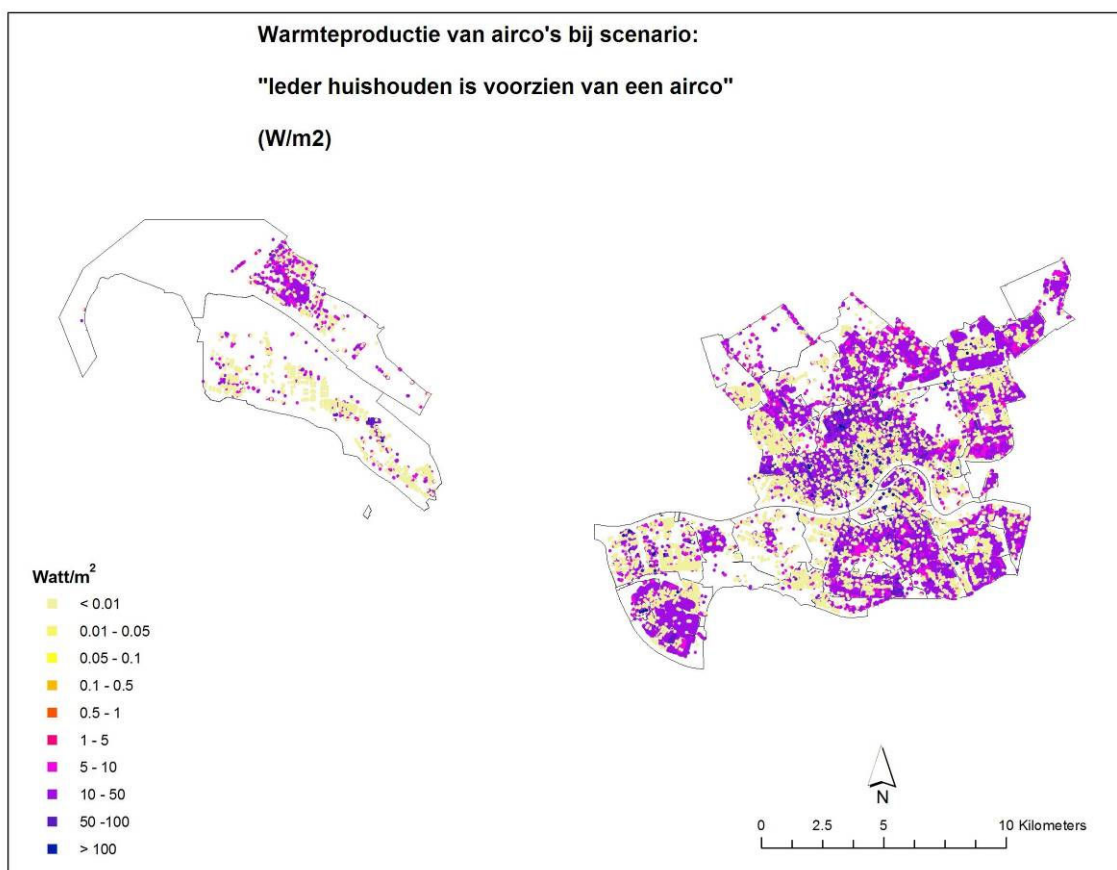
De specificaties van een split airco, die te koop is in bouwmarkten, zijn wat betreft de warmtebalans bij koeling van een ruimte van ca. 100 m<sup>3</sup> (470 m<sup>3</sup>/h luchtverplaatsing):

- 3,0 kW koelvermogen;
- 1,15 kW elektriciteitsgebruik;
- 4,15 kW warmte output.

Op het heetst van de dag wordt in de zomer dus bijna 4 maal zoveel warmte aan de omgeving afgegeven als er aan elektrisch vermogen wordt opgenomen (bij gesloten ramen en deuren). De netto bijdrage van de airco aan de opwarming van de omgeving ligt dus tussen 1 en 4 maal het elektriciteitsgebruik van de airco. Aangezien een groot deel van de uit de woning afgevoerde warmte ook zonder koeling aan de buitenlucht zou zijn afgegeven wordt voorgesteld uit te gaan van een netto bijdrage van 2 maal het elektriciteitsgebruik op het warmst van de dag.

Als er 1 airco per bewoonde verdieping is dan is het energiegebruik op een warme dag dus ca. 60 MW (240.000 inwoners x 1,15 kW).

De vraagstelling “hoeveel warmte zou er extra geproduceerd worden als iedere bewoonde verdieping in Rotterdam zou zijn voorzien van een airco?” is in dit onderzoek beantwoord door aan ieder gebouw en iedere bewoonde verdieping een airco te koppelen. De werkwijze van allocatie is identiek aan de werkwijze waarin de warmteproductie van consumenten aan gebouwen is gealloceerd. Daarbij zijn de inwoners in elk postcodegebied verdeeld over het aantal verdiepingen in dat postcodegebied, omdat dat de meest uniforme verdeling gaf. In het geval van airco's is aangenomen dat iedere bewoonde verdieping is voorzien van een airco, dat deze de gehele dag aanstaat en daarbij het maximale vermogen levert. De berekeningen tonen als resultaat een totale warmteproductie van 211 MW en een gemiddelde warmteproductie van 25 W/m<sup>2</sup> gebouwoppervlak. De absolute verdeling wordt in Figuur 23 getoond.



Figuur 23 Berekende warmteproductie van airconditioners in W/m<sup>2</sup> gebouwoppervlak

De gemiddelde waarde over heel Rotterdam is ~20 W/m<sup>2</sup>. Wat opvalt in vergelijking met Figuur 22 is dat de gebouwen die een hoge warmteproductie hebben als gevolg van inwoners (Figuur 22) dit ook hebben in het scenario “ieder huishouden een airco”. In het centrum (50 tot 100 W/m<sup>2</sup>) en in de rand van Rotterdam (10 tot 50 W/m<sup>2</sup>) dragen de airco's veel bij aan de warmteproductie. De klasse ~50 W/m<sup>2</sup> komt het meest voor in het centrum. Dat betekent dat bij ieder gebouw in het centrum ca. 50 W/m<sup>2</sup> opgeteld



kan worden als airco's massaal door de inwoners van Rotterdam worden geïnstalleerd. Voor de postcodegebieden met hoge warmteproductie is dit een extra warmte van 6% tot 12% van de huishoudelijk geproduceerde warmte. Omdat airco's voelbare warmte produceren zal dit in het centrum, op straatniveau tot een (gering) temperatuureffect leiden in het geval van continu draaiende airco's. In het binnenmilieu zorgen airco's juist voor verkoeling.

Bij het berekenen van de extra warmte die vrijkomt door het gebruik van airco's is aangenomen dat iedere airco 24 uur per dag aanstaat op het maximale vermogen, namelijk 1,15 kW. Het bepalen van de warmteproductie is eenvoudig gedaan met de volgende formule:

$$\text{Warmteproductie} = \frac{n \times 1150}{\text{Oppervlakte}}$$

Met de warmteproductie in  $\text{W/m}^2$ ,  $n$  het aantal bewoonde verdiepingen per gebouw en de oppervlakte van de woning (gebouw) in  $\text{m}^2$ . De enige redenen waarom gebouwen in het centrum dus een hoge warmteproductie hebben is als het aantal verdiepingen per gebouw groot is en de oppervlakte klein. Dit is in overeenstemming met de resultaten uit §4.5.3.

Het huidige elektriciteitsgebruik ten behoeve van koeling volgens het elektriciteitsprofiel is lager met (ongeveer) een factor 4 tot 5, wat zou betekenen dat per gebouw ongeveer een vijfde tot kwart van de airco's aanwezig is ten opzichte van bovengenoemd scenario.

#### 4.5.5 *Kanttekeningen bij de methode en de resultaten*

Zoals bij iedere berekening in dit onderzoek is ook de warmteproductie van de consumenten in gebouwen tot stand gekomen met een aantal aannamen en onnauwkeurigheden. Allereerst is het energiegebruik van de inwoners berekend uit landelijke gemiddelden in de maanden juni, juli en augustus van 2009. Het is niet mogelijk gebleken dit verder te differentiëren naar specifieke dagen, zodat het gebruik tijdens hittegolven inzichtelijk wordt. Naar verwachting zal het landelijke energiegebruik niet significant afwijken van het gebruik in Rotterdam, maar omdat de lokale data niet beschikbaar is kunnen hier geen harde beweringen over worden gedaan.

Verder is een uniforme verdeling aangenomen van het aantal inwoners per gebouw en dus ook van het aantal inwoners per verdieping en heeft iedere inwoner dezelfde warmteproductie toegewezen gekregen. Dit vlakt uiteraard mogelijke details uit en kan de resultaten vereenvoudigen.

Een andere onnauwkeurigheid is gelegen in het gebouwenbestand. De hoogte en oppervlakte van de gebouwen maken de berekening erg gedetailleerd, maar omdat niet bekend is om wat voor gebouwen het gaat kan het werkelijke energiegebruik per gebouw verschillen. Stel dat een kwart van de inwoners nu toebedeeld is aan kantoorbedrijven, dan heeft dit een effect op de gemiddelde warmteproductie. De specifieke verdeling van het energiegebruik thuis en tijdens het werk is namelijk niet bekend.

De lineaire toename van warmte per gebouw naarmate er inwoners bijkomen is niet reëel. Het is immers niet waarschijnlijk dat wanneer een willekeurig persoon in een woning woont de warmteproductie met 2 vermenigvuldigd moet worden wanneer er een bewoner bij komt, maar met – een grove schatting – een factor 1,5. Omdat er echter geen data beschikbaar is over het energiegebruik van huishoudens in Rotterdam, is de lineaire methode gehandhaafd.

#### 4.5.6 *De belangrijkste conclusies van warmteproductie door inwoners in gebouwen*

- ➔ Waarden variëren van minder dan 4 tot aan meer dan 400 W/m<sup>2</sup>. Gemiddeld over alle gebouwen is de warmteproductie ~60 W/m<sup>2</sup>.
- ➔ Het centrum kent vooral gebouwen waarin met hoge (>100 W/m<sup>2</sup>) warmteproductie. De rand om het centrum heeft gebouwen met warmteproductie van 10 tot 100 W/m<sup>2</sup>, relatief laag. Hoge warmteproductie vindt ook plaats in gebouwen in het zuiden, zuidoosten, oosten en noordoosten van Rotterdam met waarden vanaf 100 tot en met 400 W/m<sup>2</sup>.
- ➔ Het scenario “ieder huishouden een airco” resulteert in een gemiddelde waarde van ~20 W/m<sup>2</sup> over heel Rotterdam. Dit betekent dat bij ieder gebouw gemiddeld 20 W/m<sup>2</sup> opgeteld kan worden als airco’s massaal door de inwoners van Rotterdam worden geïnstalleerd. In het centrum produceert de airco 50 tot 100 W/m<sup>2</sup> gebouw. Aan de rand van Rotterdam is dit 10 tot 50 W/m<sup>2</sup>. Met betrekking tot de totale warmte-afgifte van consumenten is dit geen groot aandeel. Het huidige airco-gebruik is vanzelfsprekend een stuk lager met een profielwaarde van 12% van de gebruikte elektrische energie.

## 4.6 **Antropogene warmte en het effect op de temperatuur**

Na de belangrijkste bronnen van antropogene warmte afzonderlijk behandeld te hebben wordt in deze paragraaf een korte interpretatie gegeven van het effect op de temperatuur in de stad. Het is een zeer grove schatting voor een hypothetische situatie en het dient dan ook slechts om een eerste indruk te geven van het temperatuurseffect.

Puntbronnen produceren verreweg de meeste warmte, tussen de 10 en 500 MW/km<sup>2</sup> (of W/m<sup>2</sup>) voelbare warmte in het centrum van Rotterdam. Het gaat dan om enkele puntbronnen. Het gros van de puntbronnen is gesitueerd in het industriegebied. Omdat daar geen woningen staan is er geen temperatuursdruk voor de inwoners. In de directe nabijheid echter zal deze warmte voelbaar zijn; de puntbronnen liggen aan of nabij snelwegen met hoge warmteproductie (A16 en A20). Vanuit de puntbronnen wordt gemiddeld ca. 10 W/m<sup>2</sup> aan warmte geëmitteerd. Het verkeer rond die punten produceert gemiddeld ca. 30 W/m<sup>2</sup> aan warmte. De warmteproductie van inwoners in woningen en andere gebouwen is volgens Figuur 22 in de gebieden van de puntbronnen laag, gemiddeld tussen de 4 en 10 W/m<sup>2</sup>. Dit betekent dat de inwoners in de betreffende gebieden relatief weinig effect ervaren van de nabijgelegen puntbronnen en het verkeer kunnen verwachten, puur op de antropogene warmteproductie gebaseerd. Op specifieke tijden, bijvoorbeeld tijdens de middag en avondspits, zal er een piek ontstaan in de warmteproductie. De invang van zonnestraling, albedo en warmtecapaciteiten van de gebouwen zullen tevens veel van de temperatuursveranderingen bepalen.

Wanneer deze buiten beschouwing worden gelaten en de temperatuurstijging wordt berekend met de aanname dat warmte zich gedraagt als een uitgestoten verontreiniging, dan zal een ontvanger op 250 m afstand van een bron van voelbare warmte met warmte-inhoud van  $100 \text{ W/m}^2$  ca.  $0,01 \text{ K}$  temperatuurstijging merken. In dit geval wordt dan uitgegaan van een bedrijventerrein van  $2500 \text{ m}^2$  (dus  $250 \text{ kW}$  bronsterkte) dat  $8760$  uur per jaar actief is zonder dat er pluimstijging optreedt. Het verspreidingsmodel (met een verdunningsfactor afkomstig uit het model PluimPlus) dat hierbij als voorbeeld is genomen hanteert een concentratie van  $0,2 \mu\text{g/m}^3$  op  $250 \text{ m}$  van de bron die  $0,2 \text{ ton/jaar}$  uitstoot als gevolg van de verdunning; een verdunning met factor  $\text{ton}/\mu\text{g}$  ( $10^{12}$ ). Omdat  $250 \text{ kW}$  bij  $8760 \text{ h/jaar}$   $2,19 \cdot 10^9 \text{ Wh/jaar}$  oplevert, is dat op een afstand van  $250 \text{ m}$   $2,19 \cdot 10^{-3} \text{ Wh/m}^3$  wat overeenkomt met  $7,9 \text{ J/m}^3$ . Aangezien de warmtecapaciteit van lucht  $1 \text{ kJ/kg/K}$  bedraagt zal de temperatuurstijging circa  $0,01 \text{ K}$  zijn. Bij deze uitkomst dient wel in acht te worden genomen dat het een *zeer grove* benadering is waarbij veel variabelen zijn geschat en is aangenomen dat warmte zich als een fysieke verontreiniging (zoals  $\text{PM}_{10}$ ) gedraagt, wat uiteraard nog verder onderzocht dient te worden. Maar gecombineerd met de verdeling van puntbronnen in het bewoonde gebied en de verwachte temperatuurstijging zullen puntbronnen weinig bijdragen aan het hitte-eiland in het centrum van Rotterdam.

Het verkeer heeft piekwaarden van meer dan  $200 \text{ W/m}^2$ . Met de gebruikte dimensies komt dat neer op  $2000 \text{ W/m}$  voor een auto van  $1$  meter breed. Om nu een grove schatting van de temperatuursinvloed te geven wordt de volgende formule gehanteerd:

$$\Delta T(x) = \frac{\text{Intensiteit} \times \text{Verbruik} \times \theta(x) \times f_b \times \frac{5}{U}}{C_{p_{\text{lucht}}} \times \rho_{\text{lucht}}}$$

Hierin is de intensiteit het aantal auto's per seconde ( $20000/\text{etmaal} = 0,23/\text{s}$ ), het verbruik de gebruikte brandstof ( $\text{W/m}$ ),  $\theta$  de verdunningsfactor van de warmte (in dit geval  $0,22 \text{ s/m}^2$ ),  $f_b$  de bomenfactor ( $1$  in dit geval, geen bomen),  $U$  de windsnelheid in  $5 \text{ m/s}$ ,  $C_p$  de warmtecapaciteit van lucht ( $1006 \text{ J/kg/K}$ ) en  $\rho_{\text{lucht}}$  de dichtheid van lucht ( $1 \text{ kg/m}^3$ ). In het geval van  $2000 \text{ W/m}$  is de temperatuurstijging door het verkeer dus  $0,1 \text{ K}$  of  $^\circ\text{C}$ . Ook hier geldt dat het een zeer grove schatting is, maar het laat zien dat verkeer zo op het eerste zicht een factor  $1000$  meer bijdraagt aan temperatuurstijging dan puntbronnen. Voor gebieden omsloten door drukke wegen neemt de temperatuursdruk uiteraard toe.

De temperatuurstijging in de stad als gevolg van de warmteproductie van inwoners in gebouwen kan niet eenvoudig worden geschat, omdat de bron te diffuus is en er teveel variabelen zijn om rekening mee te houden. Qua bronsterkte zijn gebouwen hoog met circa  $1 \text{ kW}$  per inwoner. Het is dus aannemelijk te zeggen dat deze bron sterk zal bijdragen aan het hitte eiland effect, meer nog dan verkeer en puntbronnen. Er dient echter, in nader onderzoek, gerekend te worden aan de temperatuurstijging als gevolg van de antropogene warmteproductie.

#### 4.7 Conclusies antropogene warmte

In dit onderzoek is voor Rotterdam een inventarisatie gemaakt van de warmtebijdrage van antropogene warmtebronnen aan het stedelijk hitte-effect. Naast de statische veroorzakers zoals hittefactoren op het gebied van landgebruik en landbedekking, wordt warmteproductie als gevolg van menselijke activiteiten als een mogelijke dynamische oorzaak van het stedelijk hitte-eiland effect gezien. Deze antropogene bronnen bestaan uit allerlei vormen van energieconversie in industrie, huishoudens en verkeer.

De conclusies naar aanleiding van de gekwantificeerde antropogene warmtebronnen in Rotterdam betreffen warmtebelasting op drie schaalniveaus, te weten de stad, de straat en het gebouw. Strikt genomen betreft het hitte-eiland effect alleen het buitenklimaat ('outdoor'), dus de stad en de straat. Het gaat hier om de indirecte effecten van warmteophoping over een periode in de stad en de directe effecten van warmtestraling op straatniveau. Hittestress treedt echter ook op als gevolg van binnenklimaat in gebouwen ('indoor'), waar mensen het overgrote deel van de tijd verblijven. Daarom nemen we dit gebouwniveau nadrukkelijk mee in de analyse.

Een overzicht van de bijdragen van verschillende typen warmtebronnen aan het hitte-eilandeffect in Rotterdam wordt gegeven in Tabel 14.

De data in de tabel zijn met kleuren gecategoriseerd naar de drie schaalniveaus. Zo is de totale warmteproductie door alle bronnen vooral een indicator voor de bijdrage van antropogene warmtebronnen aan het hitte-eilandeffect op stadsniveau (oranje gearceerd). De gemiddelde warmteproductie per vierkante meter gemeenteoppervlak geeft een indicatie van de gemiddelde warmtebelasting op straatniveau (blauw gearceerd). De warmte-intensiteit van een bron, de warmteproductie per vierkante meter bronoppervlak (bedrijfsterrein, weg of gebouw) is indicatief voor de warmtebelasting dichtbij of in een bron, dus op straat of in de auto (blauw gearceerd) of in het gebouw (roze gearceerd). De warmteintensiteit geldt per bron en kan daarom niet worden opgeteld tot een intensiteit van Rotterdamse warmtebronnen.

Tabel 14: Schatting van bijdragen van warmtebronnen aan hitte in de stad op verschillende schaalniveaus in Rotterdam.

Sector	Warmtebron	Gemiddelde warmteproductie: W/m <sup>2</sup> gemeente oppervlakte	Intensiteit: W/m <sup>2</sup> bronoppervlak
		GEMIDDELD STRAATNIVEAU	STRAATNIVEAU
Industrie	Grote puntbronnen	31,2 totaal	1800 totaal
		→ 15 voelbaar op leefniveau → 5 voelbaar uit schoorsteen → 11 latent en naar koelwater	→ 820 voelbaar op leefniveau → 300 voelbaar uit schoorsteen → 675 latent en naar koelwater
		0,12 voelbaar op leefniveau (in centrum)	35 voelbaar op leefniveau (in centrum)
HDO	Kleine / middelgrote bedrijven	-	-
Verkeer	Vervoer	4,7	13
Inwoners	Lichaamswarmte	0,3	7,4
Gebouwen (consumenten)	Ruimteverwarming	-	-
	Koken	0,02	0,9
	Elektriciteitsgebruik apparaten	0,6	24
	Elektriciteitsgebruik verlichting	0,1	5
	Warm tapwater	0,8	29
<b>STADSNIVEAU Totale warmteproductie</b>		<b>38</b>	<b>n.v.t.</b>
<b>Wv voelbaar op leefniveau</b>		<b>22</b>	
Airco's	Scenario: 1 airco per woning	0,7	24

Geproduceerde warmte is uitgesplitst naar voelbare en latente warmte. De laatste betreft energie die in de vorm van vocht in de lucht zit en dus niet direct voelbaar is. Verder wordt onderscheid gemaakt naar warmte die geloosd wordt via de schoorsteen (voelbaar), via de schoorsteen (latent) en het koelwater of via ventilatie of uitstraling naar de lucht op leefniveau (voelbaar).

*Stadsniveau: De indirecte bijdrage van antropogene warmte aan het hitte-eilandeffect door ophoping van warmte in de stad verdient nader onderzoek*

De totale warmteproductie van de stad Rotterdam is gemiddeld over het gemeenteoppervlak 38 W/m<sup>2</sup>, waarvan 22 W/m<sup>2</sup> vrijkomt in de vorm van voelbare warmte op leefniveau. Deze warmte-emissies door puntbronnen en consumenten/gebouwen in de stad kunnen ophopen in de loop van een warme zomerperiode en op die manier mogelijk een significante bijdrage leveren aan temperatuurstijging in de stad.

Dit indirecte temperatureffect van grote antropogene warmtebronnen zal nader onderzocht worden met het mesoschaal meteorologisch model van de WUR en zal worden gerapporteerd in een ander deel van dit projectonderzoek.

*Straatniveau: Directe warmtestraling van antropogene bronnen draagt weinig bij aan het hitte-eiland effect in Rotterdam*

Gemeten naar de omvang van de warmteproductie, stoten de industriële puntbronnen verreweg de grootste volumes warmte uit. Op een zomerdag wordt gemiddeld over de oppervlakte van Rotterdam door de industriële puntbronnen  $31 \text{ W/m}^2$  uitgestoten. Hierbij dient weliswaar aangetekend te worden dat hiervan slechts de helft ( $15 \text{ W/m}^2$ ) in de vorm van voelbare warmte op leefniveau vrijkomt. De andere helft komt vrij uit de schoorsteen ( $5 \text{ W/m}^2$ ) en in de vorm van koelwater of latente warmte ( $11 \text{ W/m}^2$ ). Als we bovendien de locatie in acht nemen blijkt dat de puntbronnen in het bewoonde gedeelte van Rotterdam slechts  $0,1 \text{ W/m}^2$  aan voelbare warmte op leefniveau produceren.

Verkeer produceert  $5 \text{ W/m}^2$  gemiddeld over Rotterdam. Warmteproductie als gevolg van energiegebruik in woningen bedraagt minder dan  $2 \text{ W/m}^2$ . Zelfs als elke woning in Rotterdam een airco zou krijgen, zou de warmteproductie minder bedragen dan  $3 \text{ W/m}^2$ , een toename met 30%.

De warmteproductie op leefniveau in de woonomgeving is laag vergeleken bij andere wereldsteden die een sterk hitte-eilandeffect vertonen (Van Harmelen *et al.*, 2008) zoals Amerikaanse steden (meer dan  $60 \text{ W/m}^2$ ) en Tokyo (meer dan  $200 \text{ W/m}^2$ ), o.a. omdat Rotterdam relatief weinig hoogbouw heeft en er dus per  $\text{m}^2$  weinig warmtebronnen als het ware 'op elkaar gestapeld' zijn en hun warmte afgeven aan de buitenlucht. Daarom is de voorlopige conclusie dat de directe bijdrage van antropogene warmteproductie aan de stijging van de buitentemperatuur niet groot zal zijn in vergelijking met andere bronnen zoals zonne-instraling en reflectie en uitstraling van oppervlaktes en materialen (de netto instraling is door Van Harmelen et al (2008) geschat op in orde van  $140 \text{ W/m}^2$  en het verschil met het buitengebied in de orde van  $25 \text{ W/m}^2$ ).

Hiervoor genoemde cijfers zijn gemiddelden voor Rotterdam. Volgende vraag is of er locaties in de gemeente zijn met een hoge lokale warmtebelasting. Dit onderzoeken we door te kijken naar de intensiteit van de warmtebronnen, uitgedrukt in  $\text{W/m}^2$  per  $\text{m}^2$  *gebruiksoppervlak*. Dit geeft een ander beeld. De industriële warmteproductie is hoog,  $820 \text{ W/m}^2$  voelbare warmte op leefniveau en  $300 \text{ W/m}^2$  geëmitteerd uit schoorstenen. Dit is echter gemiddeld voor alle industriële puntbronnen in Rotterdam, waarbij opgemerkt wordt dat het gros van de industrie in een gebied is gelegen waar zeer weinig bevolking woont. Een aantal puntbronnen bevindt zich in het centrum van Rotterdam, en hiervan is de intensiteit  $35 \text{ W/m}^2$  voelbare warmte op leefniveau. Industriële puntbronnen in het centrum zullen dus relatief weinig bijdragen aan de temperatuurstijging. De hoge intensiteit van de puntbronnen op de bedrijventerreinen zouden wel belangrijk kunnen zijn voor de productiviteit van werknemers op de terreinen. Het vervoer produceert relatief weinig warmte wanneer het wordt berekend over het gebruiksoppervlak ( $13 \text{ W/m}^2$ ). Het exacte temperatuureffect van deze antropogene bronnen zou in een vervolgonderzoek met microschaal klimaatmodellering onderzocht moeten worden.

*Gebouwniveau: Antropogene bronnen, met name van huishoudens, vormen een belangrijke warmtebelasting voor mensen binnen gebouwen*

Door bewoners in gebouwen wordt (inclusief lichaamswarmte) ruim  $60 \text{ W/m}^2$  aan antropogene warmte geproduceerd. Hierbij dienen we ons te realiseren dat deze warmte niet gemakkelijk weg kan maar in de ruimte blijft hangen en zich over de dagen kan

ophopen. De hittebelasting van personen wat betreft antropogene warmte is over het algemeen dus groter in gebouwen dan buiten, helemaal als bedacht wordt dat de verblijftijd in gebouwen relatief groot is.

Zonder vooruit te willen lopen op nadere bepalingen van en de effectiviteit van maatregelen tegen het hitte-eilandeffect en hittestress in Rotterdam, is er vanuit het oogpunt van antropogene warmte geen bezwaar om binnenklimaatregeling in te zetten om hittestress te voorkomen, bij bijvoorbeeld kwetsbare of productiviteitgevoelige groepen. Airco's zijn hierbij zeker een optie, omdat de binnentemperatuur sterk gereduceerd wordt terwijl de totale antropogene warmteafgifte, de buitentemperatuur en het totale Rotterdamse energiegebruik en de broeikasgasemissies niet noemenswaardig worden verhoogd (extra antropogene warmte van minder dan  $1 \text{ W/m}^2$  en een toename van het energiegebruik en de  $\text{CO}_2$ -emissie in Rotterdam van ongeveer 2 procent).





## 5 Referenties

BREF, Reference document on the application of Best Available Techniques to Industrial Cooling Systems, December 2001. IPPC

CBS, Statline gegevens (<http://statline.cbs.nl>). Thema "Industrie en energie", tabellen "Energie", "Aardgas" en "Elektriciteit en warmte".

Chen, Y., Jiang, W. M., Zhang, N., He, X. F. en Zhou, R. W., 2009. Numerical simulation of the anthropogenic heat effect on urban boundary layer structure. *Theoretical and Applied Climatology* 97 (2009), 123 – 134.

Fan, H. en Sailor, D., 2004. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes. *Atmospheric Environment* 39 (2005), 73 – 84.

Gamma Nederland, Easy Quick Airconditioning. Productinformatie Gamma Nederland, februari 2009.

Ichinose, T., Shimodozono, K. en Hanaki, K., 1999. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment* 33 (1999), 3897 – 3909.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change); 2006 IPCC guidelines for national Greenhouse Gas Inventories, Volume 2 – Energy

Oke, T.R., *Boundary Layer Climates*, 1987. 2nd edition Co-published by Routledge, London and John Wiley & Sons, New York, 435 pages. ISBN 0 416 04432

Pigeon, G., Legain, D., Durand, P. en Masson, V., 2007. Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). *International Journal of Climatology* 27, 1969 – 1981.

Sailor, D., Fan, H., 2004. The importance of including anthropogenic heating in mesoscale modeling of the urban heat island.

Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Rem. Sens. Environ.* 8(2),127-150.

Van de Griend, A.A., Owe, M., 1992. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *Int. J. Rem. Sensing* 14 (6), 1119–1131.

Van Harmelen, T.v., Klok, L., Döpp, S., Dolevo, R. en Janssen, S., 2008B. Hitte-eilandeffect zet leefbaarheid in de stad verder onder druk. *Lucht*, 6, 25- 29.



## 6 Dankwoord

We are grateful to Elena Mauri for providing NOAA-AVHRR satellite data. Daarnaast bedanken we alle weeramateurs van Rotterdam en omliggende steden voor het aanleveren van hun meetgegevens op wunderground.com. Roeland van der Gugten, Aniek van den Broek, Janine Jansen en Lissy Nijhuis van de Gemeente Rotterdam worden bedankt voor het beschikbaar stellen van geografische gegevens. Henk Vos en Reinier Sterkenburg van TNO hebben meegewerkt aan de beschreven analyses in Hoofdstuk 3.



## 7 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Programmabureau Kennis voor Klimaat  
Ir. C.L. van Deelen  
Postbus 80115  
3508 TC Utrecht

Namen en functies van de projectmedewerkers:

Lisette Klok	projectleider TNO
Harm ten Broeke	wetenschappelijk medewerker TNO
Toon van Harmelen	wetenschappelijk medewerker TNO
Henk Verhagen	wetenschappelijk medewerker TNO
Herman Kok	wetenschappelijk medewerker TNO
Sander Zwart	wetenschappelijk medewerker Waterwatch

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

-

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

september 2009 – juli 2010

Naam en paraaf tweede lezer:

i.o.  


Jan Duyzer

Ondertekening:



Lisette Klok  
projectleider

Autorisatie vrijgave:



Jeroen Borst  
afdelingshoofd Urbane Leefomgeving



## A Karakteristieken van postcodegebieden in Rotterdam

Tabel A1 Karakteristieken van wijken in Rotterdam, berekend in dit project. Gesorteerd – aflopend – op gemiddelde warmteproductie (W/m<sup>2</sup>)

Gebied	Inwoner-aantal	Aantal wonin-gen	Σ opper-vlakte geb.	Verdie-pingen per gebouw	Aantal verdie-pingen*	Aantal inwoners per verdieping	Gemiddelde warmte-productie	Gemiddelde warmte-productie
n	n/pc-gebied	n/pc-gebied	m <sup>2</sup> /pc-gebied	n/gebouw	n/pc-gebied	n/verdie-ping	W	W/m <sup>2</sup>
15	3293	168	22964	1,4	242	13,6	16846	123
55	11362	2200	120482	1	2206	5,2	6376	116
38	8780	1425	111172	1	1446	6,1	7517	96
63	1854	173	20709	1,2	204	9,1	11251	94
44	10396	1918	132407	1,1	2023	5,1	6362	92
47	18934	3918	248767	1	4019	4,7	5832	92
62	11726	1595	125131	1,3	2094	5,6	6933	88
54	18038	4217	256001	1	4243	4,3	5263	87
45	19922	3379	247065	1,2	4010	5	6150	84
46	22043	5257	331622	1,1	5572	4	4898	78
33	5866	889	70068	1,3	1192	4,9	6092	77
41	8680	595	59430	2,4	1406	6,2	7643	77
56	15521	2976	204376	1,2	3659	4,2	5251	76
69	6300	1644	98968	1	1697	3,7	4596	76
70	6941	1862	116269	1	1908	3,6	4504	72
68	11731	2457	172650	1,2	2899	4	5010	71
59	12182	1401	150677	1,4	2023	6	7455	69
61	12144	2002	145911	1,5	2969	4,1	5064	69
53	13020	2378	177360	1,4	3293	4	4895	66
50	13479	3278	199849	1,3	4396	3,1	3796	62
67	9932	3423	203853	1	3426	2,9	3589	60
34	9240	2364	167211	1,2	2761	3,3	4143	59
26	7259	1044	90418	1,7	1798	4	4998	58
35	7481	1807	147513	1,1	1942	3,9	4769	58
43	8526	2291	184202	1	2305	3,7	4579	57
52	12696	5255	262670	1,1	5551	2,3	2831	57
42	1711	690	39184	1	690	2,5	3070	54
32	7369	2271	160296	1,1	2538	2,9	3594	51
48	18562	1580	166357	2,7	4286	4,3	5362	51
71	4815	2029	116176	1	2029	2,4	2938	51
27	7161	2437	167922	1	2553	2,8	3473	50
49	13319	1366	121256	2,7	3719	3,6	4434	50
37	3485	1324	88591	1	1324	2,6	3259	49
3	983	31	3968	6,5	200	4,9	6085	48
1	12786	849	102688	3,3	2792	4,6	5669	47
16	7885	587	70424	3	1735	4,5	5626	47
20	6454	1345	114396	1,5	2004	3,2	3987	47

Gebied	Inwoner- aantal	Aantal woning- gen	$\Sigma$ opper- vlakte geb.	Verdie- pingen per gebouw	Aantal verdie- pingen*	Aantal inwoners per verdieping	Gemiddelde warmte- productie	Gemiddelde warmte- productie
n	n/pc- gebied	n/pc- gebied	m <sup>2</sup> /pc- gebied	n/gebouw	n/pc-gebied	n/verdie- ping	W	W/m <sup>2</sup>
57	11219	1797	146417	2	3656	3,1	3799	47
58	10932	2217	172296	1,7	3711	2,9	3647	47
66	9435	3631	247639	1	3651	2,6	3199	47
17	6229	643	65414	2,6	1651	3,8	4671	46
36	7636	2641	204879	1	2651	2,9	3566	46
11	7103	1027	83790	2,3	2401	3	3662	45
39	15489	2250	209392	2,1	4678	3,3	4099	44
12	6705	794	67466	2,9	2285	2,9	3633	43
13	9801	885	80808	3,5	3095	3,2	3920	43
21	8316	1232	109143	2,2	2705	3,1	3806	43
51	10652	1766	141614	2,3	3978	2,7	3315	41
14	7094	1142	90128	2,4	2795	2,5	3142	40
10	7406	751	74268	3,2	2366	3,1	3875	39
29	1279	502	40153	1	502	2,5	3154	39
19	10327	1415	139323	2,4	3415	3	3744	38
25	111	27	3595	1	27	4,1	5090	38
60	2275	887	71894	1	920	2,5	3061	38
65	1522	778	48640	1	784	1,9	2403	38
4	7988	896	93996	3	2660	3	3718	35
22	7490	1248	102747	2,7	3323	2,3	2790	34
9	8998	1271	116271	2,9	3637	2,5	3063	33
18	4503	713	61320	2,7	1941	2,3	2872	33
7	11092	1948	173112	2,7	5356	2,1	2564	29
8	9722	1324	122749	3,6	4703	2,1	2559	28
23	7355	1246	98581	3,5	4350	1,7	2093	26
24	9323	1507	137180	3,6	5366	1,7	2151	24
40	6908	2091	198589	1,8	3686	1,9	2320	24
5	2230	351	41236	3,2	1136	2	2430	21
30	432	282	29074	1	282	1,5	1897	18
2	4145	742	82502	3,7	2731	1,5	1879	17
6	1289	294	37436	3,8	1119	1,2	1426	11
28	171	315	40743	1,1	352	0,5	601	5
31	89	323	39983	1,1	351	0,3	314	3
64	12	58	7998	1,2	69	0,2	215	2
72	0	815	91585	3,7	3007	0		0

\* Het gaat hier om het aantal gedifferentieerde verdiepingen, waarbij een gebouw met 3 verdiepingen als 1 verdieping is gekenmerkt.



Tabel A2 Uitkomsten van verdelingsmethoden van het aantal inwoners per wijk

Nummer postcodegebied	Totaal aantal inwoners	Verdeeld inwoneraantal		
		Per gebouw	Per m <sup>2</sup> oppervlak	Per verdieping
1	12786	15,1	8,0	4,6
2	4145	5,6	19,9	1,5
3	983	31,7	4,0	4,9
4	7988	8,9	11,8	3,0
5	2230	6,4	18,5	2,0
6	1289	4,4	29,0	1,2
7	11092	5,7	15,6	2,1
8	9722	7,3	12,6	2,1
9	8998	7,1	12,9	2,5
10	7406	9,9	10,0	3,1
11	7103	6,9	11,8	3,0
12	6705	8,4	10,1	2,9
13	9801	11,1	8,2	3,2
14	7094	6,2	12,7	2,5
15	3293	19,6	7,0	13,6
16	7885	13,4	8,9	4,5
17	6229	9,7	10,5	3,8
18	4503	6,3	13,6	2,3
19	10327	7,3	13,5	3,0
20	6454	4,8	17,7	3,2
21	8316	6,8	13,1	3,1
22	7490	6,0	13,7	2,3
23	7355	5,9	13,4	1,7
24	9323	6,2	14,7	1,7
25	111	4,1	32,4	4,1
26	7259	7,0	12,5	4,0
27	7161	2,9	23,4	2,8
28	171	0,5	238,3	0,5
29	1279	2,5	31,4	2,5
30	432	1,5	67,3	1,5
31	89	0,3	449,2	0,3
32	7369	3,2	21,8	2,9
33	5866	6,6	11,9	4,9
34	9240	3,9	18,1	3,3
35	7481	4,1	19,7	3,9
36	7636	2,9	26,8	2,9
37	3485	2,6	25,4	2,6
38	8780	6,2	12,7	6,1
39	15489	6,9	13,5	3,3
40	6908	3,3	28,7	1,9
41	8680	14,6	6,8	6,2
42	1711	2,5	22,9	2,5
43	8526	3,7	21,6	3,7
44	10396	5,4	12,7	5,1
45	19922	5,9	12,4	5,0

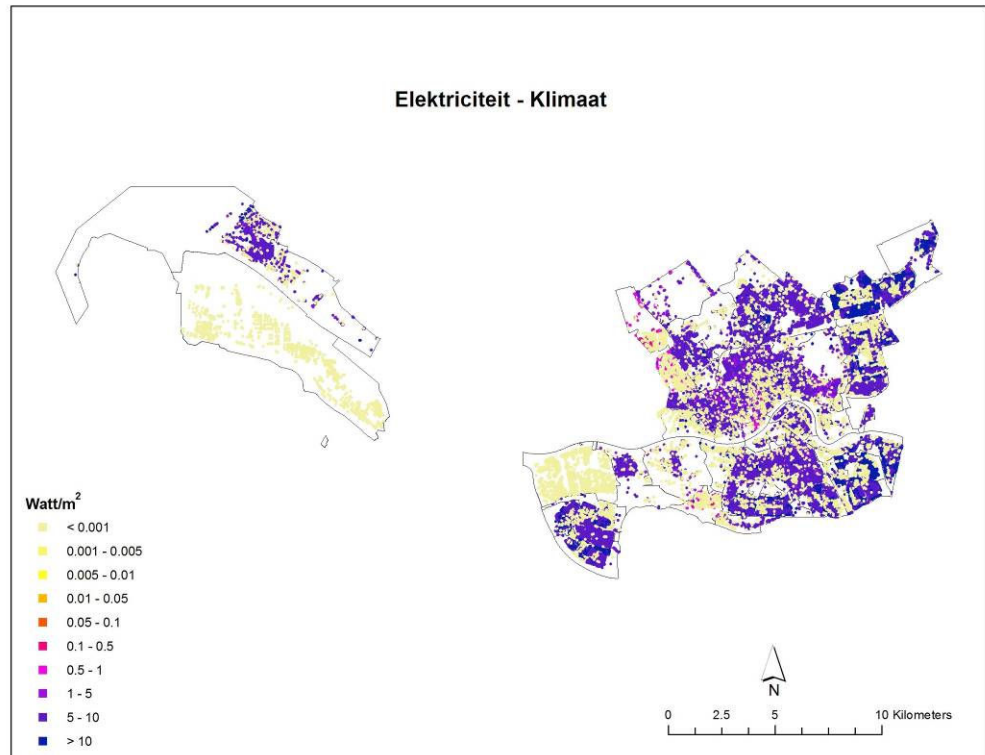
Nummer postcodegebied	Totaal aantal inwoners	Verdeeld inwoneraantal		
		Per gebouw	Per m <sup>2</sup> oppervlak	Per verdieping
46	22043	4,2	15,0	4,0
47	18934	4,8	13,1	4,7
48	18562	11,7	9,0	4,3
49	13319	9,8	9,1	3,6
50	13479	4,1	14,8	3,1
51	10652	6,0	13,3	2,7
52	12696	2,4	20,7	2,3
53	13020	5,5	13,6	4,0
54	18038	4,3	14,2	4,3
55	11362	5,2	10,6	5,2
56	15521	5,2	13,2	4,2
57	11219	6,2	13,1	3,1
58	10932	4,9	15,8	2,9
59	12182	8,7	12,4	6,0
60	2275	2,6	31,6	2,5
61	12144	6,1	12,0	4,1
62	11726	7,4	10,7	5,6
63	1854	10,7	11,2	9,1
64	12	0,2	666,5	0,2
65	1522	2,0	32,0	1,9
66	9435	2,6	26,2	2,6
67	9932	2,9	20,5	2,9
68	11731	4,8	14,7	4,0
69	6300	3,8	15,7	3,7
70	6941	3,7	16,8	3,6
71	4815	2,4	24,1	2,4
72	0	0	0	0
73	0	0	0	0
		Gemiddeld		
		6,1	34,1	3,4

## B Categorieën energiegebruik door inwoners

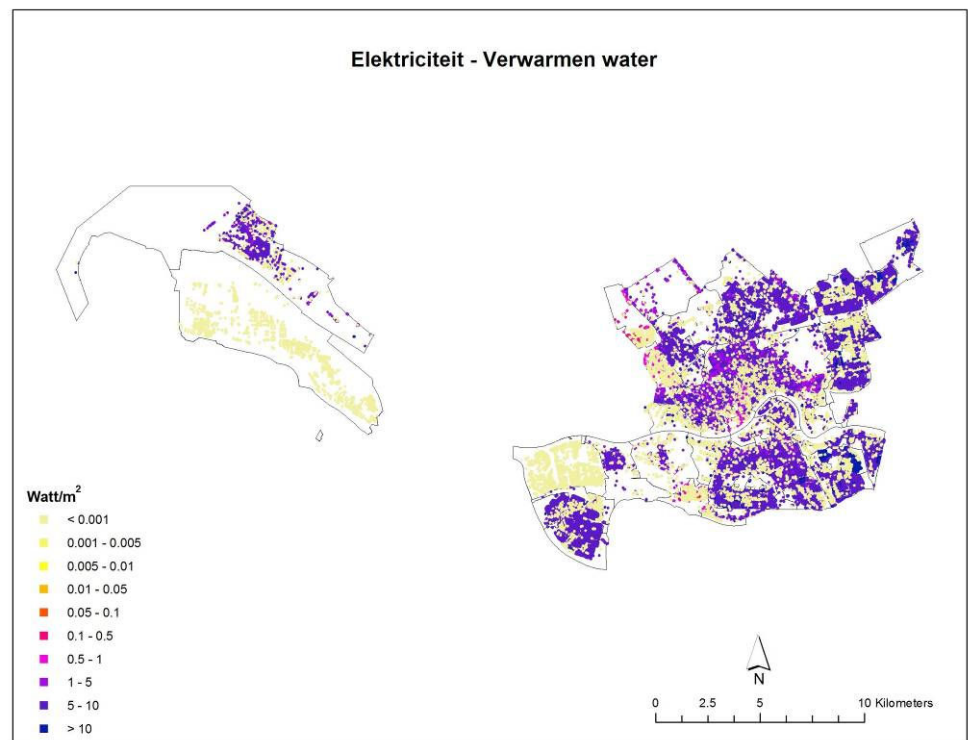
In dit deel worden figuren weergegeven met de warmteproducties veroorzaakt door inwoners van specifiek de verschillende categorieën van elektriciteits- en gasgebruik.

Tabel B1 Aandelen van verschillende categorieën binnen gas- en elektriciteitsgebruik

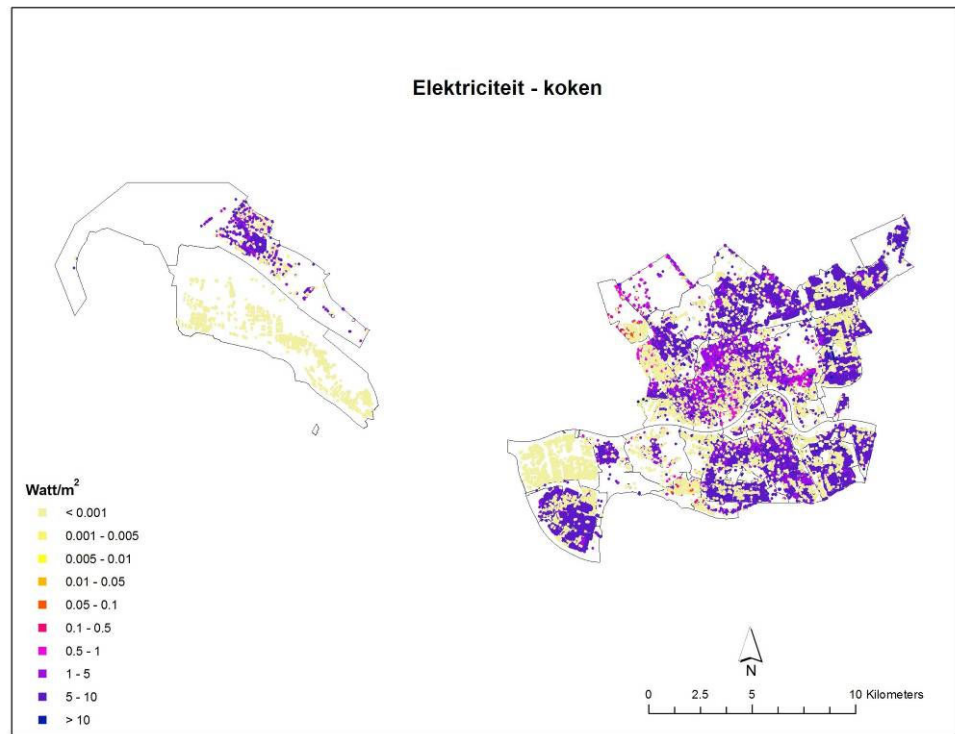
Categorie	Gebruik op een gemiddelde zomerdag		Gebruik op een gemiddelde zomerdag	
	Profielwaarde	Profielwaarde	Profielwaarde	Profielwaarde
	%	W/inw	%	W/inw
	<i>Electriciteit</i>		<i>Gas</i>	
Klimaat	12	79		
Warm tapwater	9	56	97	573
Koken	7	43	3	17
Koelen	18	113		
Reinigen	19	122		
Verlichting	16	104		
Audio/video	12	77		
Koken overig	4	28		
Persoonlijke verzorging	1	6		
Hobby	1	9		
Overig				
Totaal	100	635	100	591



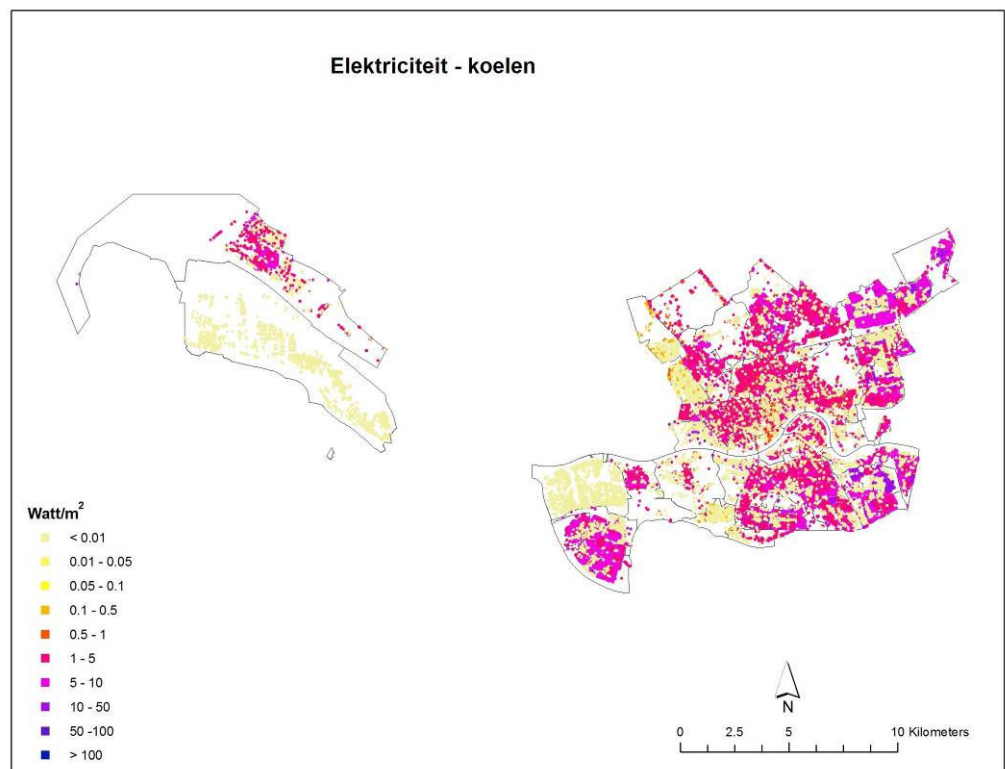
Figuur B1 Elektriciteit, warmteproductie ten behoeve van klimaat.



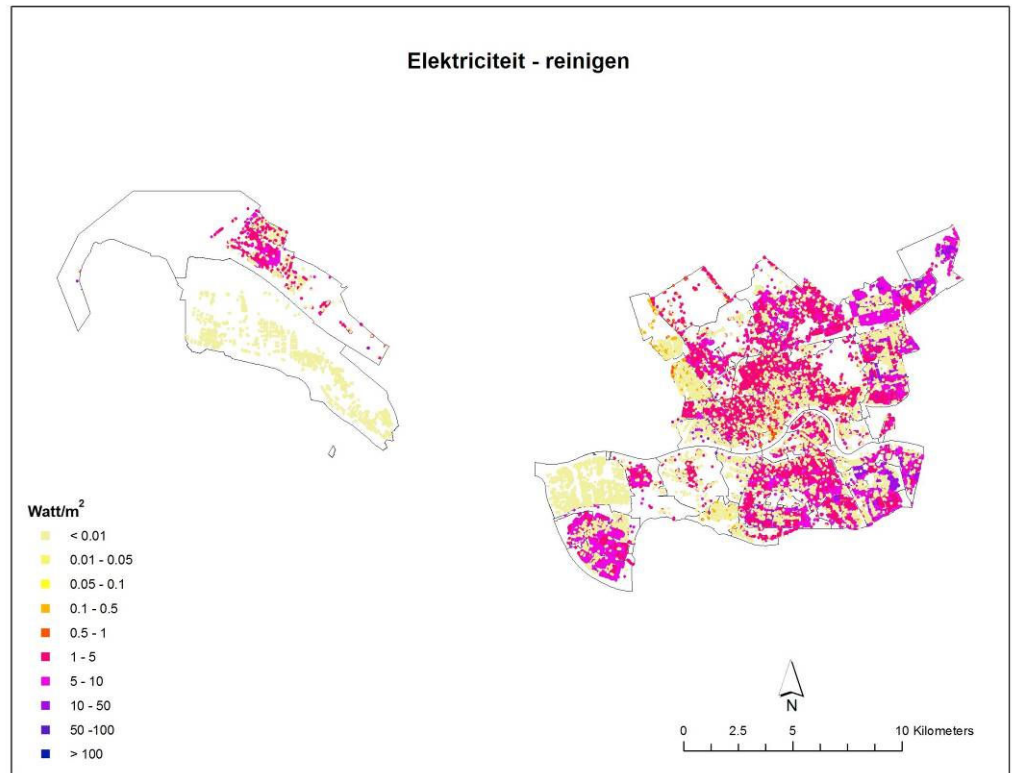
Figuur B2 Elektriciteit, warmteproductie ten behoeve van het verwarmen van water.



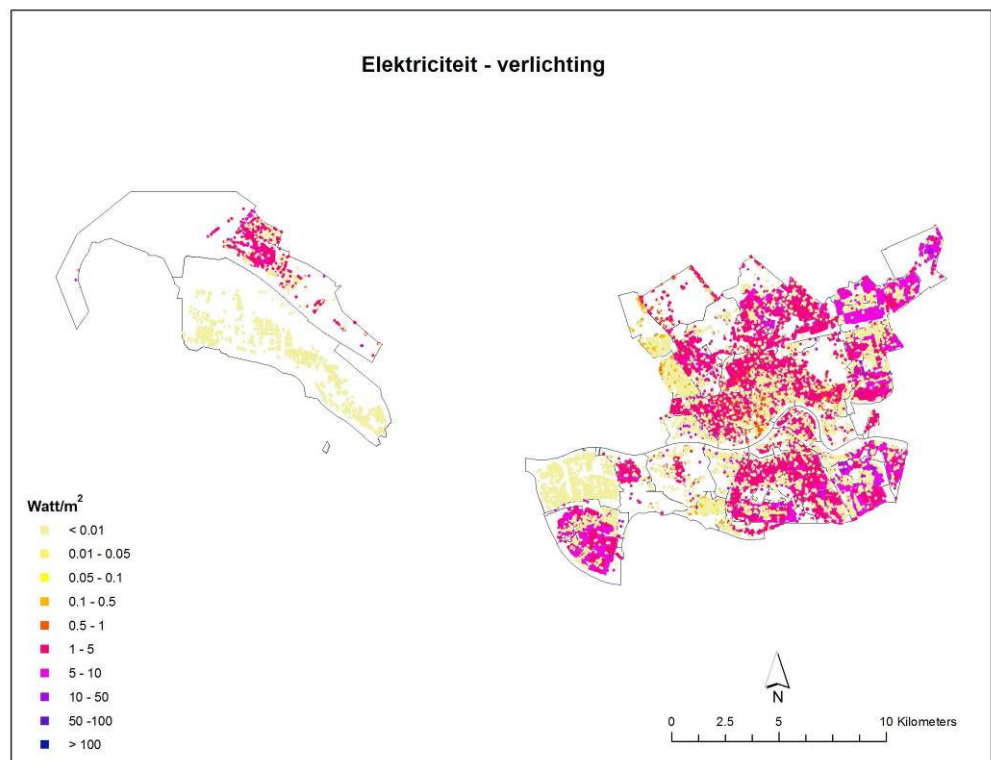
Figuur B3 Elektriciteit, warmteproductie ten behoeve van koken.



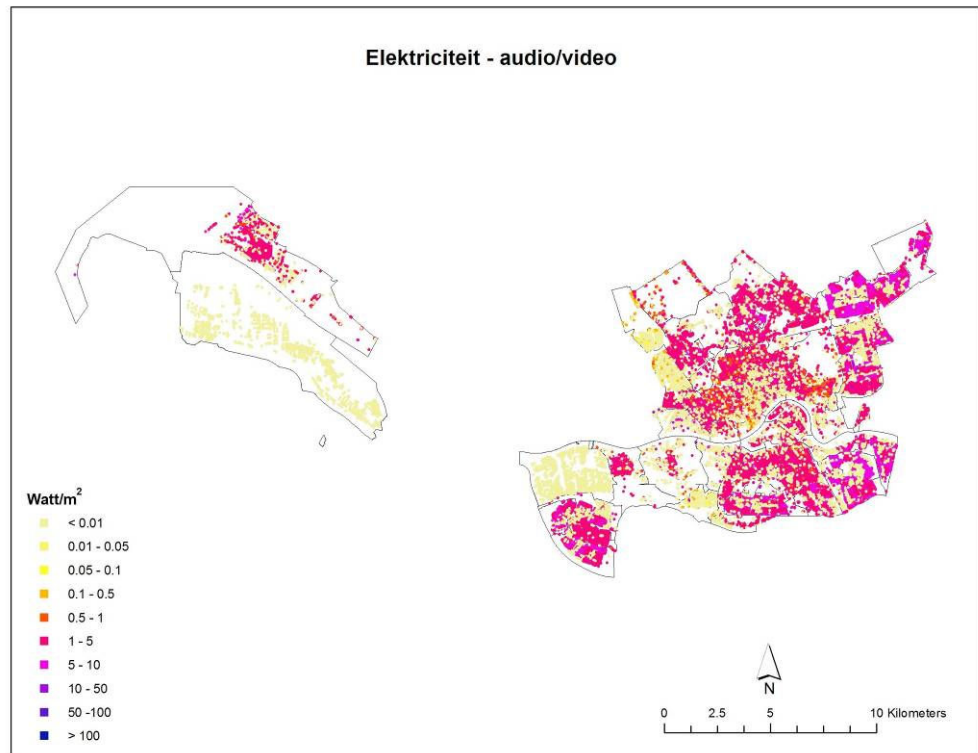
Figuur B4 Elektriciteit, warmteproductie ten behoeve van koeling.



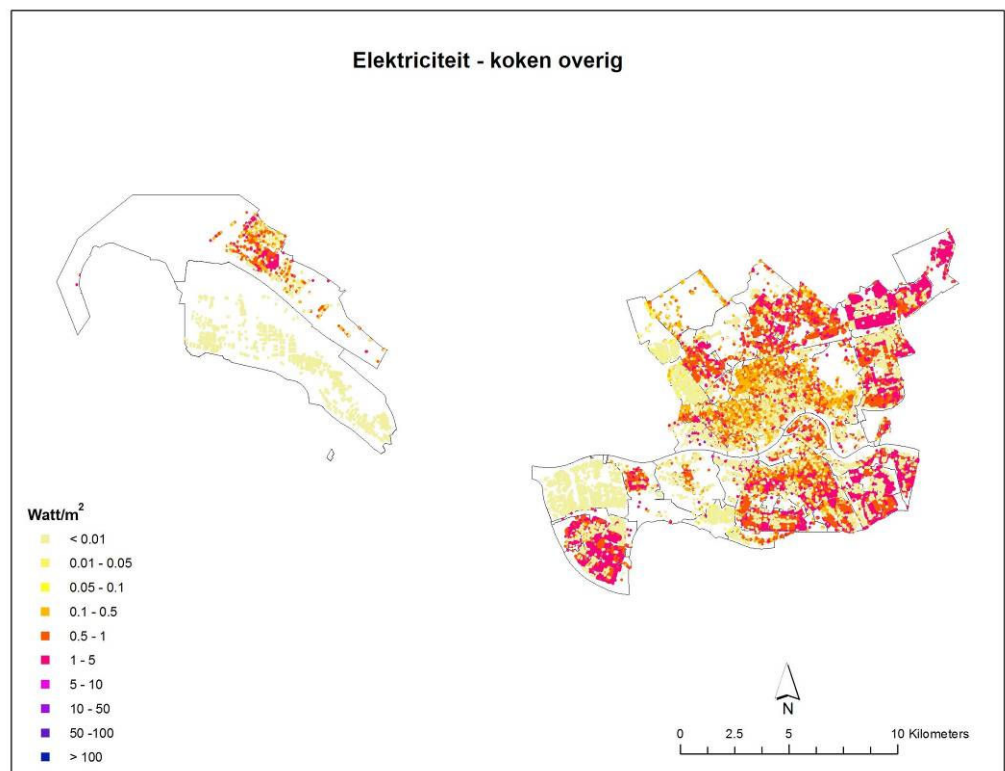
Figuur B5 Elektriciteit, warmteproductie ten behoeve van reinigen.



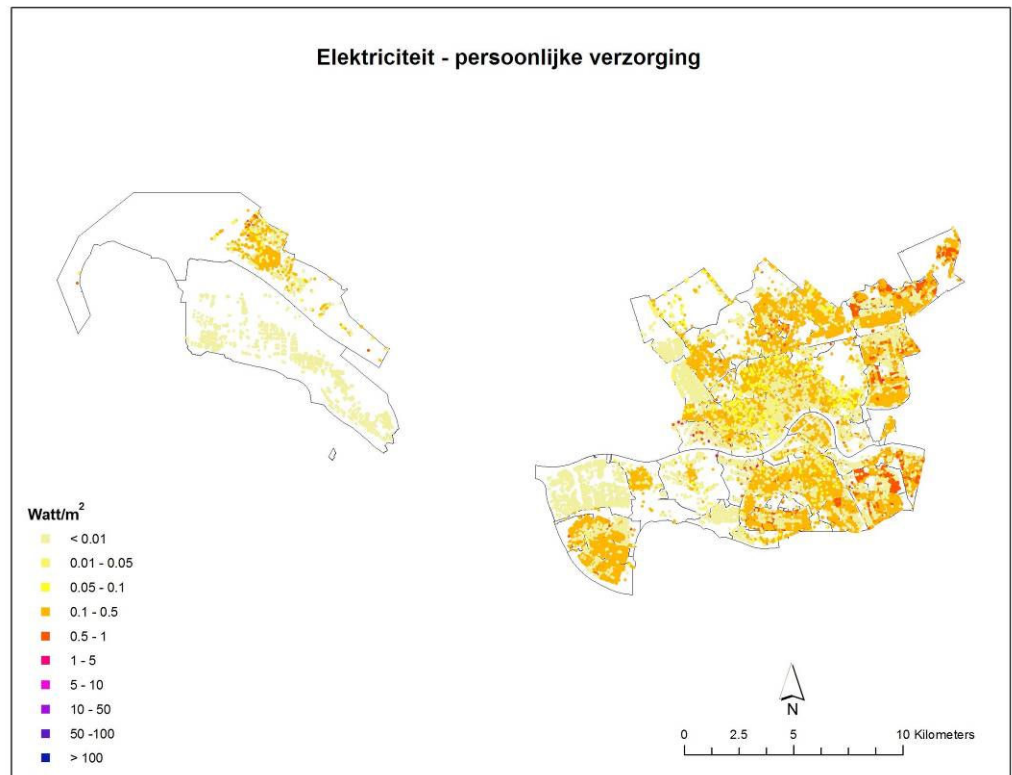
Figuur B6 Elektriciteit, warmteproductie ten behoeve van verlichting.



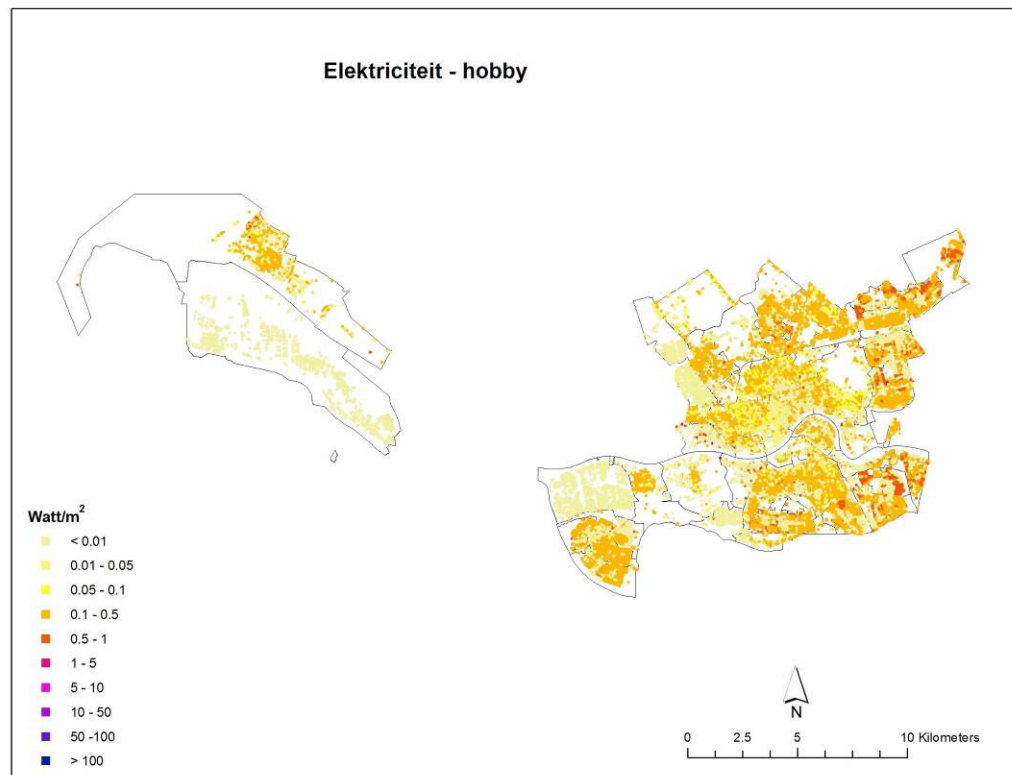
Figuur B7 Elektriciteit, warmteproductie ten behoeve van audio &amp; video.



Figuur B8 Elektriciteit, warmteproductie ten behoeve van koken (anders dan direct verhitten).

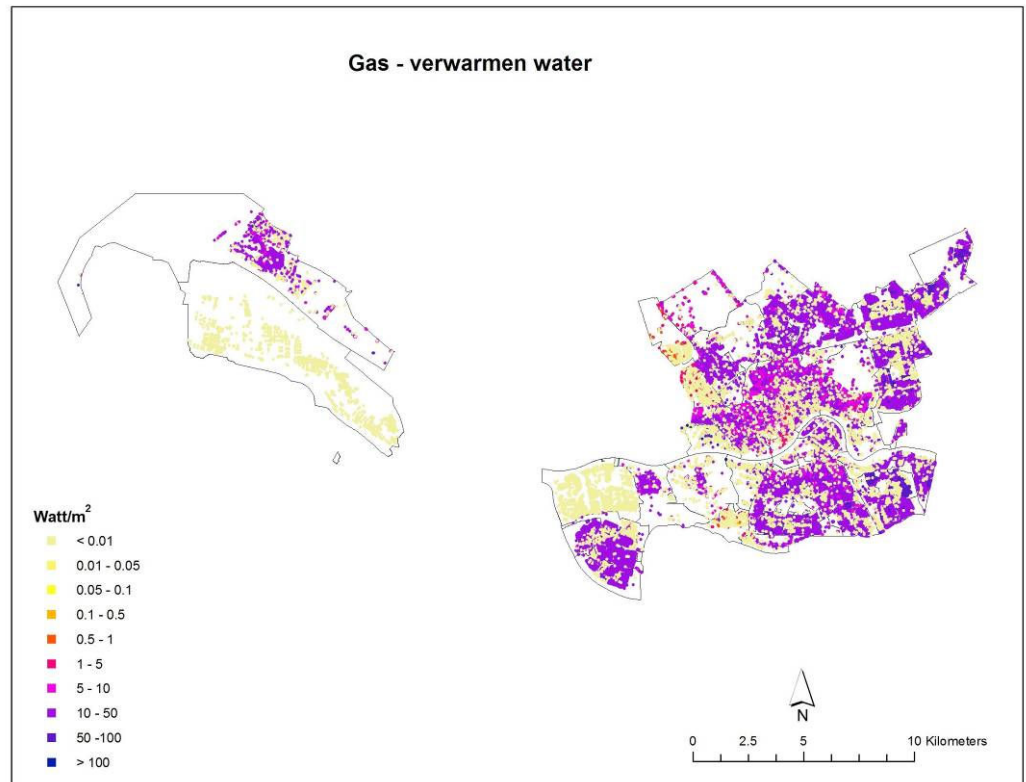


Figuur B9 Elektriciteit, warmteproductie ten behoeve van persoonlijke verzorging.

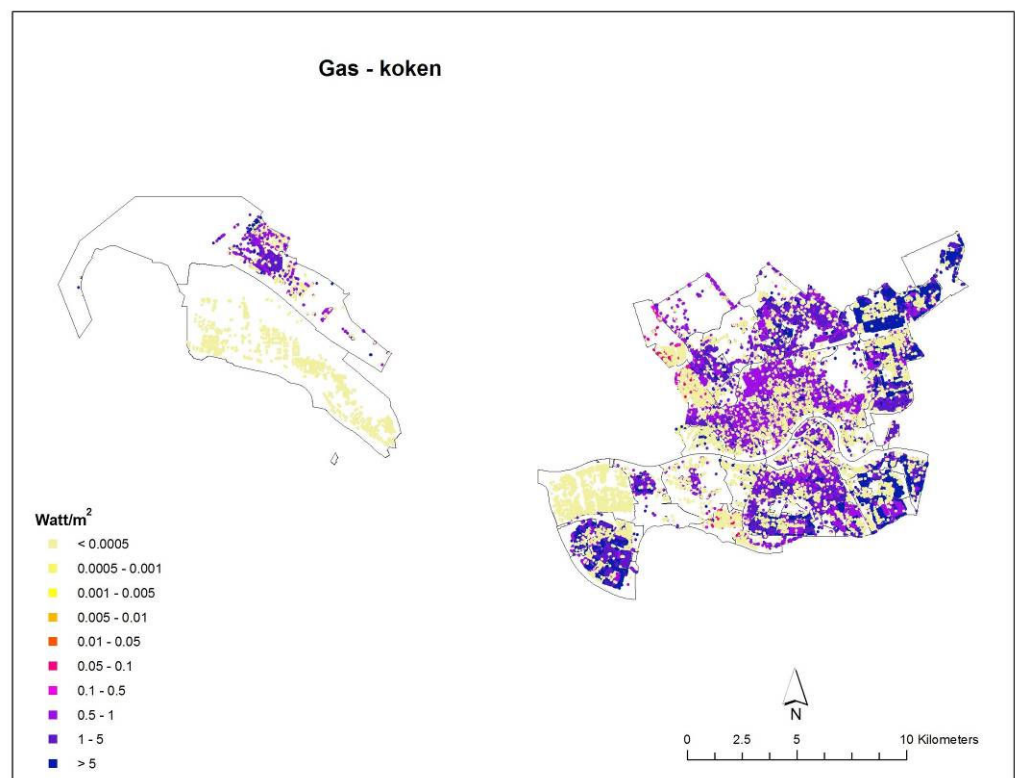


Figuur B10 Elektriciteit, warmteproductie ten behoeve van hobby's.





Figuur B11 Gas, warmteproductie ten behoeve van het verwarmen van water.



Figuur B12 Gas, warmteproductie ten behoeve van koken



## C Vergelijking van resultaten met eerder onderzoek voor Rotterdam

Het verschil in totale warmteproductie tussen onderhavig onderzoek en Van Harmelen *et al.* (2008) komt voornamelijk door de puntbronnen; in het onderhavige onderzoek is de warmteproductie met  $31 \text{ W/m}^2$  een factor 1,5 lager dan de warmteproductie van Van Harmelen *et al.* (2008) ( $48 \text{ W/m}^2$ ). In het onderzoek van Van Harmelen *et al.* (2008) is de warmteproductie berekend aan de hand van de  $\text{CO}_2$ -uitstoot van bedrijven. Het was niet bekend welke brandstoffen zijn gebruikt. Daarom is de uitstoot gedeeld door de emissiefactor (hoeveelheid geëmitteerde  $\text{CO}_2$  per geproduceerde hoeveelheid warmte) van gas, resulterend in een warmteproductie van  $15,0 \cdot 10^9 \text{ W}$ , met de aanname dat alle industrieën gas als brandstof gebruiken. In onderhavig onderzoek is gebruik gemaakt van actuele brandstofgegevens per specifieke puntbron. De warmteproductie als gevolg van brandstofgebruik van de puntbronnen in Rotterdam resulteerde met deze methode in  $9,5 \cdot 10^9 \text{ W}$ . Het verschil in deze waarden is toe te wijzen aan de volledigheid van de data; in Van Harmelen *et al.* (2008) is een aanname gedaan over het soort brandstof terwijl dat in dit onderzoek bekend was. De industrie gebruikt namelijk ook olie, cokes en andere brandstoffen die méér  $\text{CO}_2$  uitstoten per geproduceerde Watt dan aardgas. Dit heeft in de berekening van Van Harmelen *et al.* (2008) geresulteerd in een overschatting van de geproduceerde warmte. Gas stoot namelijk  $56100 \text{ kg CO}_2/\text{TJ}$  (IPCC, 2006) uit bij verbranding. Andere brandstoffen die veel worden gebruikt in de industrie zoals dieselolie of ruwe olie, hebben een hogere emissiefactor: dieselolie  $74100 \text{ kg CO}_2/\text{TJ}$ , ruwe olie  $73300 \text{ kg/TJ}$  (IPCC, 2006). Deze brandstoffen produceren dus méér  $\text{CO}_2$  per opgewekte eenheid energie. Het volgt dus dat wanneer de  $\text{CO}_2$  emissies gedeeld worden door de emissiefactor van olie, je minder energie overhoudt dan wanneer je deelt door de emissiefactor van gas.

De warmteproductie van het verkeer scheelt een factor 1,5 tussen de beide methodieken met  $4,7 \text{ W/m}^2$  als hogere waarde, in dit onderzoek bepaald. Het verschil is te verklaren door de grotere nauwkeurigheid van het verbruik (recente CBS-gegevens) en de uitgevoerde verkeerstelling.

De lichaamswarmte is in dit onderzoek eveneens een factor 1,5 hoger dan in het onderzoek van Van Harmelen *et al.* (2008). Dat komt omdat  $100 \text{ W/persoon}$  is aangenomen in het eerdere onderzoek tegenover  $150 \text{ W/persoon}$  in onderhavig onderzoek. Deze waarde is gekozen met de aanname dat het merendeel van de bevolking lichte arbeid verricht gedurende de dag.

Koken scheelt een factor 25 ( $0,02 \text{ W/m}^2$  in dit onderzoek tegenover  $0,5$  in dat van Van Harmelen *et al.* (2008) doordat in dit onderzoek gebruik van warm water is inbegrepen. De juiste vergelijking zou dus zijn wanneer warm water erbij opgeteld zou worden in dit onderzoek. Het wordt dan  $0,8 \text{ W/m}^2$  (dit onderzoek) tegenover  $0,5 \text{ W/m}^2$  met een factor 1,6 verschil. Het verschil zit in de bepaling van het energiegebruik. In dit onderzoek is het energiegebruik per inwoner als basis genomen met behulp van een energieprofiel, dit komt neer op  $380 \text{ W/inw.}$  (0, pagina 57). In het onderzoek van Van Harmelen *et al.* (2008) is dit  $280 \text{ W/inw.}$  (afkomstig van de LifeStyler tool<sup>1</sup>). Het voordeel van de profielen is dat ze gekoppeld worden aan een up-to-date

---

<sup>1</sup> <http://www.climacount.com/nl/lifestylercc/lifestyler.jsp>

verbruikscijfer, waardoor het verbruik representatief is. Waarschijnlijk is de waarde in dit onderzoek van recentere oorsprong en daarmee representatiever.

Tabel C1 Schatting van warmtebronnen in Rotterdam volgens Van Harmelen et al. (2008) en onderhavig onderzoek.

	Van Harmelen <i>et al.</i> (2008)			Onderhavig onderzoek			
	Warmtebron	Vaststellingsmethode	Volume: W/m <sup>2</sup> gemeente oppervlakte	Vaststellingsmethode	Volume: W/m <sup>2</sup> gemeente oppervlakte	Intensiteit: W/m <sup>2</sup> oppervlak (gemiddeld)	Oppervlakte waarover bepaald
Industrie	Grote puntbronnen	CO <sub>2</sub> uitstoot (individuele emissieregistratie)	48,0	Energiegegevens	31,2 totaal	1800 totaal	Bedrijventerrein
					→ 15 voelbaar op leefniveau	→ 820 voelbaar op leefniveau	
					→ 5 voelbaar uit schoorsteen	→ 300 voelbaar uit schoorsteen	
					→ 11 latent en naar koelwater	→ 675 latent en naar koelwater	
					0,12 voelbaar op leefniveau (in centrum)	35 voelbaar op leefniveau (in centrum)	
HDO	Kleine / middelgrote bedrijven	Diffuse CO <sub>2</sub> emissie	0,3	Niet gekwantificeerd	-	-	-
Verkeer	Vervoer	Diffuse CO <sub>2</sub> emissie	3,2	Verkeers-tellingen	4,7	13	Wegdek
Inwoners	Lichaams-warmte	Bottom-up (W/m <sup>2</sup> lichaamsopp/ persoon)	0,2	Bottom-up; aantal inwoners per woning	0,3	7,4	Woning
Gebouwen (consumenten)	Ruimtever-warming	Aangenomen als 0 op zomerdag	0	<i>Idem Van Harmelen et al.</i>	0	0	<i>Idem Van Harmelen et al.</i>
	Koken	Gasverbruik per woning	0,5	Gasgebruik per inwoner	0,02	0,9	Woning
	Elektriciteits-gebruik apparaten	Bottom-up (elektriciteits-gebruik per woning)	0,5	Elektriciteits-gebruik per inwoner	0,6	24	Woning
	Elektriciteits-gebruik verlichting	Bottom-up (elektriciteits-gebruik per woning, 6 u/d)	0,4	Elektriciteits-gebruik per inwoner	0,1	5	Woning
	Warm tapwater	Niet afzonderlijk gekwantificeerd; bij "Koken" inbegrepen	0	Gasgebruik per inwoner	0,8	29	Woning

<b>Totaal antropogene warmtebronnen</b>			<b>53</b>	<b>Totale warmte Wv voelbaar op leefniveau</b>	<b>38 22</b>		
Airco's	Scenario: Airco's (1 airco per woning)	Bottom-up (elektriciteits- gebruik per woning per dag)	0,8	Elektriciteits- gebruik airco	0,7	24	Woning

Het elektriciteitsgebruik van apparaten geeft een warmteproductie die in beide onderzoeken dicht bij elkaar ligt –  $0,5 \text{ W/m}^2$  (Van Harmelen *et al.*, 2008) tegenover  $0,6 \text{ W/m}^2$  uit dit onderzoek. Beide onderzoeken hanteerden de 'bottom-up' methode gebruikmakend van het elektriciteitsgebruik.

Het verschil in verlichting ( $0,4 \text{ W/m}^2$  in Van Harmelen *et al.* (2008) en  $0,1 \text{ W/m}^2$  in dit onderzoek) is ondanks dezelfde gebruikte methode echter flink. Door Van Harmelen *et al.* (2008) is het elektriciteitsgebruik op  $300 \text{ W/inwoner}$  geschat met als bron <http://www.duurzaambo.nl>. In onderhavig onderzoek is uitgegaan van een totaalgebruik aan elektriciteit van  $635 \text{ W/inwoner}$  met een profielwaarde van verlichting van 16%, resulterende in  $100 \text{ W/inwoner}$ , berekend aan de hand van het CBS en het energieprofiel van ECN. Omdat de gegevens van het CBS uit 2009 zijn en de bron uit Van Harmelen *et al.* (2008) van 1999<sup>2</sup> is de waarde van het CBS waarschijnlijk representatiever.

Airconditioning heeft in het onderzoek van Van Harmelen *et al.* (2008) gezien over heel Rotterdam een warmteproductie van  $0,8 \text{ W/m}^2$ . Dat is vrijwel identiek aan de warmteproductie in dit onderzoek, waarin airco's  $0,7 \text{ W/m}^2$  aan warmte produceren. Alhoewel in dit onderzoek een hoger energiegebruik van de airco's is gebruikt, namelijk  $1120 \text{ W/airco}$  – zie pagina 63 – tegenover  $1000 \text{ W}$  in Van Harmelen *et al.* (2008) – afkomstig van <http://www.milieucentraal.nl/> – is de allocatie van airco's aan de woningen in dit onderzoek anders. In het onderzoek van Van Harmelen *et al.* (2008) is namelijk uitgegaan van 1 airco per huishouden, waarbij aangenomen is dat een huishouden uit 2,5 personen bestaat (kort gezegd 1 airco per 2,5 personen). Dit resulteert in ca.  $240 \text{ MW}$  ( $600000 \text{ inwoners} \times 1000 \text{ W}$ , gedeeld door 2,5) in Rotterdam. De methode in dit onderzoek bestond uit het alloceren van airco's aan gebouwen, of specifiek gezien aan bewoonde verdiepingen. Met deze gegevens wordt de warmteproductie  $210 \text{ MW}$  ( $190000 \text{ bewoonde verdiepingen} \times 1120 \text{ W}$ ). Omdat in dit onderzoek een extra dimensie is toegevoegd (verdeling over de gebouwen) waarmee nauwkeurig berekend kan worden hoeveel personen gemiddeld een gebouw bezetten zal de nieuwe waarde van  $0,7 \text{ W/m}^2$  de meest representatieve zijn in het geval van een scenario "ieder huishouden voorzien van een airco".

<sup>2</sup> [http://www.duurzaambo.nl/DuurzaamMBO/CGE/CDelektron/CDromelektro/milieuitems/items/elekt\\_mc.htm](http://www.duurzaambo.nl/DuurzaamMBO/CGE/CDelektron/CDromelektro/milieuitems/items/elekt_mc.htm)