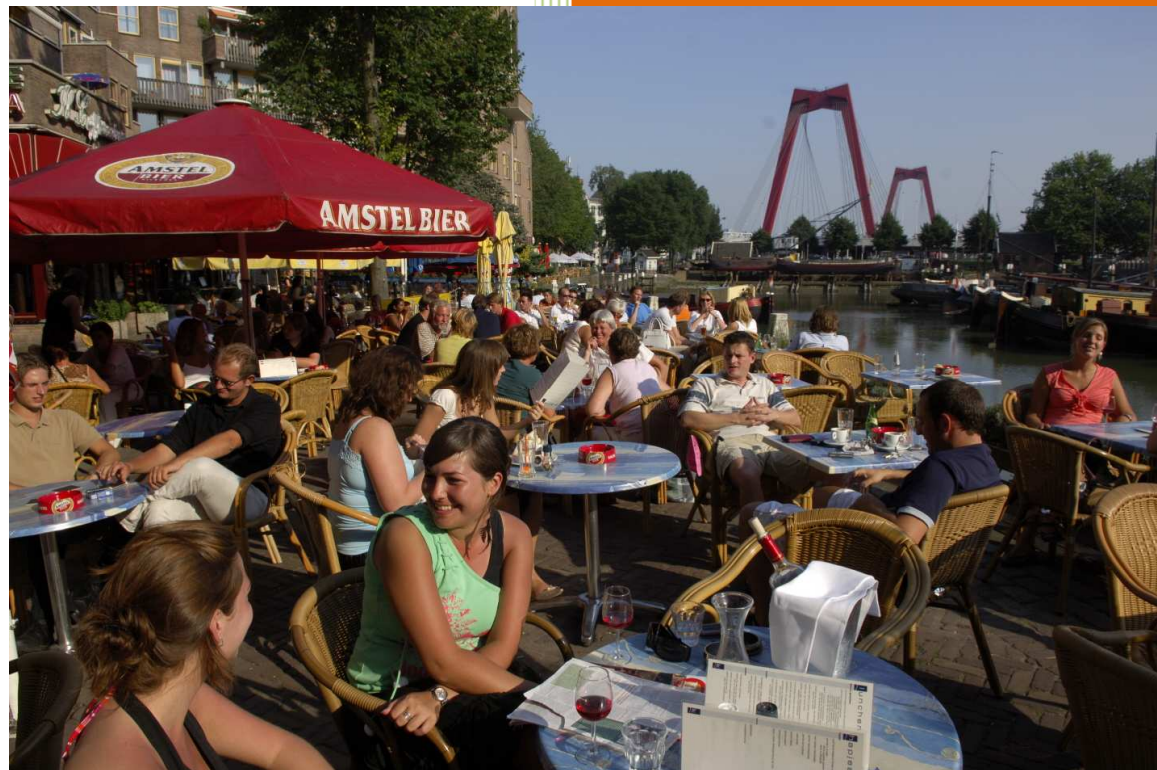


# 2011

## Hitte in de stad



Michiel van der Harst

Wageningen Universiteit

1 December 2011



## Inleiding

Bijna alle informatie over het klimaat komt van metingen op het platteland, terwijl tegenwoordig meer dan 50 % van de mensen op de aarde in de stad woont. In steden is het temperatuurverloop in de dag anders dan op het platteland waardoor meetgegevens niet overeen komen met wat mensen ervaren.

Over het algemeen is de temperatuur in de stad overdag en na zonsondergang hoger dan in de directe omgeving van de stad.. Dit temperatuurverloop is te verklaren door thermische eigenschappen van de stad. Het warmer zijn van de stad wordt ook wel stedelijk hitte-eiland effect genoemd, of op zijn Engels Urban Heat-Island effect (afgekort tot UHI).

Er bestaat een verband tussen het maximale temperatuurverschil, tussen binnen en buiten de stad, en de hoeveelheid inwoners van de stad of

agglomeratie. (Oke 1973) Ander onderzoek toont aan dat het percentage verharding zorgt voor een temperatuurstijging. Vanuit de thermodynamica kan gezegd worden dat de temperatuur wordt bepaald door het materiaalgebruik, percentage verharding, aanwezigheid van beplanting, warmteproductie van mensen, de mate van bebouwing, de gebouwhoogte, en andere factoren. Al deze factoren zorgen ervoor dat de temperatuur in de stad gemiddeld hoger is dan op het platteland.

In dit verslag wordt duidelijk gemaakt wat het stedelijk hitte-eiland is, wanneer het zich voordoet, wat de problemen zijn van het stedelijk hitte-eiland. De oorzaken worden verder uitgewerkt en er wordt in kaart gebracht hoe de problemen in een stad als Rotterdam ruimtelijk verdeeld zijn. Daarnaast wordt bekeken wat de mogelijke oplossingen zijn voor het verminderen van het stedelijk hitte-eiland in Rotterdam. Er is gekozen voor Rotterdam als voorbeeld, omdat deze stad bezig is om de problemen in kaart te brengen en dit onderzoek daaraan kan bijdragen.

# INHOUDSOPGAVE

## **1. STEDELIJK HITTE-EILAND** **6**

---

**WINTERSE STEDELIJK HITTE-EILAND** **7**

VOORBEELD **7**

**ZOMERSE STEDELIJK HITTE-EILAND** **7**

VOORBEELD **8**

## **2. PROBLEMEN** **10**

---

**GEVOELSTEMPERatuur** **10**

**KWALEN** **10**

**STERFTE** **11**

**SLAAPSTOORNIS** **11**

**VERSTERKING STEDELIJK HITTE-EILAND** **12**

## **3. OORZAKEN VAN DE HITTE** **14**

---

**ALBEDO** **14**

STRALING **14**

REFLECTIEFACTOR **14**

MATERIAAL **14**

*STREET CANYON* **15**

**ENERGIEBALANS** **15**

**ANTROPOGENE WARMTE** **16**

**WARMTE CAPACITEIT** **17**

**STEDELIJKE BROEIKASEFFECT** **18**

## **4. STEDELIJKE KLIMAAT KAART** **20**

---

**ANALYSE KAART** **20**

**KLIMATOPEN** **20**

**ROTTERDAM** **20**

**WERKMETHODE** **23**

**VERGELIJKING MET DATA** **23**

**WIND** **29**

## **5. WIND** **32**

---

**METEOROLOGISCHE GEGEVENS** **32**

**WINDMETINGEN** **32**

ALGEMEEN **32**

WARME DAGEN **32**

CONVECTIEVE WIND **33**

**TURBULENTIE** **36**

**WINDANALYSE KAART** **36**

## **6. AANBEVELINGEN** **38**

---

**MEER GROEN** **38**

PARKEN **38**

STROOKVEGETATIE **38**

GROENE DAKEN EN GEVELS **38**

GROEN ALS BARRIÈRE	39	HITTE IN DE BINNENSTAD	40
<b>WATER</b>	<b>39</b>	WINDCORRIDORS	41
STILSTAAND WATER IN DE ZON	39	TOEKOMSTIGE UITBREIDINGEN	41
STILSTAAND WATER IN DE SCHADUW	39		
STROMEND WATER	39	<b><u>7. DISCUSSIE</u></b>	<b>44</b>
<b>VORMGEVING BEBOUWING</b>	<b>39</b>		
WIND	39	<b><u>REFERENTIES</u></b>	<b>45</b>
SKY-VIEW-FACTOR	40		
<b>SPECIFIEKE AANBEVELINGEN</b>	<b>40</b>		
ZUIDWESTELIJKE WIND	40		



# 1. Stedelijk hitte-eiland

Het stedelijk hitte-eiland is een welbekend fenomeen in de meteorologie, sommigen zeggen zelfs het meest besproken fenomeen. In andere vakgebieden zoals stedenbouw en landschapsarchitectuur is het fenomeen minder bekend, terwijl het wel bepalend kan zijn voor het welzijn van de stad.

Pas onlangs is begonnen met onderzoek naar het fenomeen in Nederlandse steden, er werd namelijk aangenomen dat in het gematigd zeeklimaat (Cfb-klimaat volgens de indeling van Köppen), met zijn milde winters en koele zomers, geen sterk stedelijk hitte-eiland ontwikkeld kon worden. Maar deze aanname bleek onterecht te zijn.

Het stedelijk hitte-eiland wordt vaak beschreven als het temperatuurverschil tussen het platteland en de stad. Wiskundig uitgedrukt als de temperatuur in de stad ( $T_{stad}$ ) minus de temperatuur buiten de stad ( $T_{platteland}$ ) zoals in formule 1.

$$\text{stedelijk hitte-eiland} = T_{stad} - T_{platteland} \quad (1)$$

In deze vorm is het stedelijk hitte-eiland positief op het moment dat de temperatuur in de stad hoger is dan de temperatuur buiten de stad en negatief wanneer de temperatuur in de stad lager is dan de temperatuur buiten de stad.

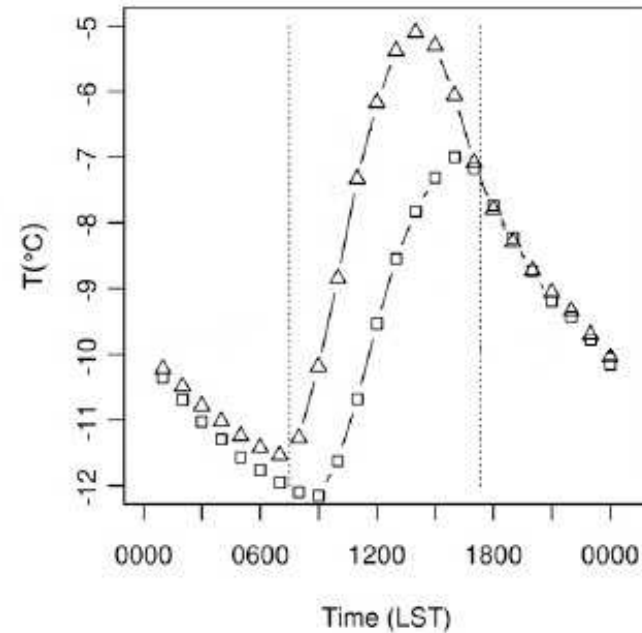


Fig. 1 gemiddelde temperatuur in de winterperiode 2008/2009 in Minneapolis (Malevich and Klink 2011)

Het temperatuurverschil is te verklaren door verschillende factoren. Men kan zich voorstellen dat in steden:

- meer en andere materialen gebruikt worden dan buiten de stad,
- er is minder groen aanwezig dan buiten steden,
- veel steden kenmerken zich door de aanwezigheid van hoogbouw,
- er wonen meer mensen,
- er is meer transport,
- er is meer industrie en
- er zijn energiecentrales die warmte produceren.

Dit zijn allemaal zaken die bijdragen aan het temperatuurverschil. Over de oorzaken wordt verder ingegaan in hoofdstuk 3.

## Winterse stedelijk hitte-eiland

Zowel in de winter als in de zomer kan een stedelijk hitte-eiland zich ontwikkelen in de stad. 's Winters heeft dit vooral te maken met de productie van warmte door de mens, ook wel antropogene warmte genoemd. De warmte geproduceerd in industrie, huishoudens en door transport zorgen ervoor dat de stad minder koud is dan de omgeving. Doordat kou onplezierig en soms zelfs gevaarlijk is voor mensen, is deze vorm van stedelijk hitte-eiland niet slecht voor de mens.

### Voorbeeld

In figuur 1 is de gemiddelde temperatuur weergegeven van de wintermaanden van 2008/2009 in Minneapolis voor het gemiddelde van 22 stedelijke meetpunten ( $\Delta$ ) en het meetstation op het vliegveld buiten de stad ( $\square$ ). Vanaf iets voor zonsopkomst tot zonsondergang (verticale lijnen) is de temperatuur in de stad hoger dan daarbuiten. Volgens de onderzoekers is dit te verklaren doordat op die momenten openbare gebouwen, scholen en huizen worden verwarmd. De warmte is aanwezig op het moment dat mensen actief zijn. Dit beeld is vergelijkbaar met andere steden en geeft een goed beeld van het winterse stedelijk hitte-eiland, in sommige steden is het ook 's nachts warmer in de stad door de aanwezigheid van industrie die 24 uur per dag doorgaat.

## Zomerse stedelijk hitte-eiland

In de zomer en in warme klimaten zijn er naast de antropogene warmte nog andere factoren waardoor het stedelijk hitte-eiland wordt veroorzaakt. Veel materialen die gebruikt worden in de stad slaan warmte goed op en staan deze warmte later weer af. De warmte wordt voornamelijk overdag opgeslagen en komt 's avonds weer vrij. Hierdoor is het stedelijk hitte-eiland, volgens de definitie in formule 1, in de uren na zonsondergang het

grootst. Ook de hoeveelheid verhard oppervlakte en de daarbij behorende mate van verdamping hebben zomers effect. Over het algemeen kan gesteld worden dat de zomerse versie van het stedelijk hitte-eiland zich ontwikkelt op warme dagen met een stabiele atmosfeer en weinig tot geen bewolking. Vooral hittegolven, met meerdere warme dagen achter elkaar, kunnen problematisch zijn, doordat de warmte in de stad zich in de loop van de hittegolf kan opbouwen. Deze gegevens laten duidelijk zien dat het stedelijk hitte-eiland niet constant aanwezig is, maar dat het varieert in de loop van de dag en in de loop van het jaar.

's Zomers zorgt het stedelijk hitte-eiland voor weinig warmteverlies in de avond, waardoor de nachten onaangenaam warm kunnen zijn. Juist op deze momenten ontstaan gezondheidsproblemen welke besproken worden in hoofdstuk 2.

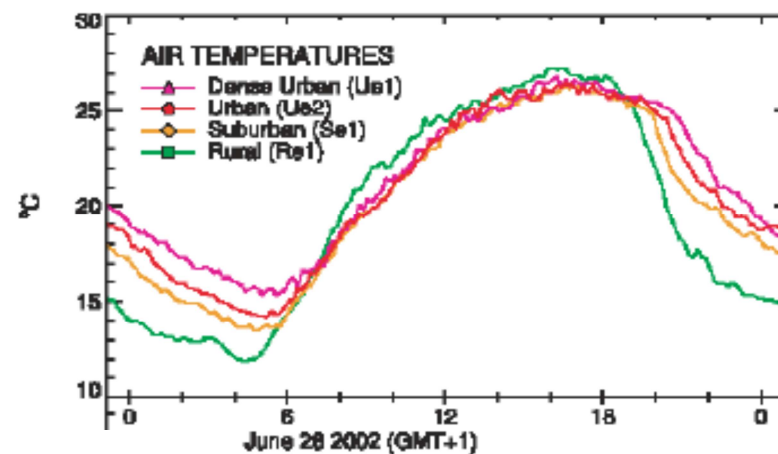


fig.2. Temperatuur op 3 verschillende plekken in de stad en 1 buiten de stad uit (Rotach, Vogt et al. 2005)



### **Voorbeeld**

Figuur 2 geeft de temperatuur op 3 verschillende plekken in de stad en 1 plek buiten de stad Basel op 26 juni 2002. Deze dag werd beschreven als één met een zeer heldere lucht, geen enkel wolkje te bekennen. Gecombineerd met de tijd van het jaar is het de ideale broedplaats voor het stedelijk hitte-eiland. De waarnemingen laten zien dat de temperatuur in de stad overdag iets lager is dan buiten de stad, dit komt door de grote opslag van warmte-energie in gebouwen en andere materialen. Na zonsondergang gaat de temperatuur buiten de stad snel naar beneden, maar in de stad gaat dit veel minder snel, de warmte blijft hangen. De energie die zat opgeslagen in de gebouwen komt er 's avonds weer uit en zorgt voor een hogere temperatuur. Dit is een klassiek voorbeeld van hoe een zomers stedelijk hitte-eiland verloopt.



## 2. Problemen

Uit onderzoek in Rotterdam is gebleken dat de verschillen in temperatuur tussen binnen en buiten de stad op sommige momenten kunnen oplopen tot 8° Celsius. Deze hogere temperatuur kan in de stad als onprettig worden ervaren, dit is hittestress. Het kan ook zorgen voor grote gezondheidsproblemen. Hitte-uitslag, hittekrampen, hitte-uitputting en hitteberoerte zijn kwalen die veroorzaakt worden door extreem hoge temperaturen. Vooral kwetsbare groepen als ouderen, mensen met overgewicht, mensen met hart- of bloeddrukproblemen en zwangere vrouwen kunnen hier last van krijgen, maar ook bij hevige inspanningen of wanneer er alcohol, medicijnen of drugs in het spel zijn worden de risico's groter. De problemen lijken zich het meest voor te doen bij sterke fluctuaties van temperaturen. Wanneer de temperatuur een langere periode hoog is, zwakken de risico's af door acclimatisering. (Daanen, Simons et al. 2010)

### Gevoelstemperatuur

De werkelijke temperatuur is niet van groot belang voor de gezondheid van mensen, er moet vooral gekeken worden naar de gevoelstemperatuur. Deze gevoelstemperatuur is afhankelijk van de temperatuur, de sterkte van de wind, de hoeveelheid ontvangen zonnestraling, de luchtvochtigheid en de lichamelijke condities en omstandigheden van de persoon (bv. kleding en activiteit). Een goede index voor de gevoelstemperatuur is PET, Physiologically Equivalent Temperature. Hierin worden de lichamelijke condities en omstandigheden van de persoon gelijk gehouden zodat het gemakkelijker wordt situaties te vergelijken (Höppe 1999). Een PET tussen de 18° en 23° Celsius wordt als prettig ervaren, een PET tussen 23° en 29° Celsius leidt tot lichte

hittestress. Tussen 29° en 35° Celsius is sprake van matige hittestress, een PET tussen 35° en 41° Celsius komt overeen met sterke hittestress en boven de 41° Celsius treedt extreme hittestress op.

### kwalen

Theoretisch gezien zou het cardiovasculaire systeem (hart en bloedvaten) de grootste problemen moeten hebben met hitte, via dit systeem wordt warmte afgevoerd. In de praktijk is er echter geen overeenkomst te zien tussen ziekenhuisopnames en sterfte vanwege cardiovasculaire problemen en warme dagen. Veel voorkomende problemen bij hitte zijn dehydratie, hitte-uitputting, nierfalen en respiratoire problemen, wat terug te zien is in ziekenhuisopnames. Volgens de GGD zijn in 2006 in de twee warmste weken meer dan 600 hitte-gerelateerde klachten bij huisartsen in de regio Rotterdam binnen gekomen. (Daanen, Simons et al. 2010)

Daarnaast veroorzaakt het Stedelijk hitte-eiland een extra probleem doordat de warmte 's avonds en 's nachts blijft hangen. Dit is vooral in Noord-Europa een probleem omdat we hier niet gewend zijn aan hoge temperaturen. Dit alles brengt extra ziektegevallen in de stad met zich mee ten opzichte van het platteland.

Voor langere termijn kan extreme hitte leiden tot lagere geboortegewichten en aangeboren afwijkingen. Wanneer hitte plaatsvindt over een langere tijdspanne ontstaat echter een acclimatiseringseffect waardoor de problemen afnemen (Kovats and Hajat 2008).

## Sterfte

In Nederland is de sterfte het laagst bij een temperatuur van 16.5° C. Bij hogere en lagere temperaturen zijn er hogere sterftcijfers, bij hogere temperaturen neemt dit gemiddeld toe met 12 % per graad celsius (figuur 3). In de zomer van 2003 zijn er in Nederland tussen de 1400 en 2200 doden gevallen als gevolg van hogere temperaturen. Dit fenomeen is goed zichtbaar in onderzoek gedaan in Parijs, waar een duidelijk verband is te zien tussen de hittegolf, van 2 tot 13 augustus, en de daarbij optredende sterftegevallen (figuur 4) Mensen met bijvoorbeeld hart- of longproblemen krijgen tijdens de hitte extra problemen waardoor sterfte plaatsvindt. Uit ziekenhuisopnames blijkt dat tijdens warme dagen meer mensen last hebben van nierproblemen en ademhalingsproblemen die samen kunnen hangen met respectievelijk uitdroging en luchtvervuiling. (Daanen, Simons et al. 2010)

## Slaapstoornis

Volgens onderzoek gedaan door Janssen, Vos et al. (2011) bestaat er een verband tussen het slaapcomfort en de buitentemperatuur in het voorafgaande etmaal. Bij een hoge temperatuur is de slaap korter, minder efficiënt en onrustiger. Daarnaast duurt het langer voordat men in slaap valt. Tussen de laagste en hoogste geobserveerde temperatuur zit een gemiddeld verschil van 11 minuten slaap. Daarentegen hebben vochtigheidsgraad en geluidsbelasting geen invloed op de slaapkwaliteit.

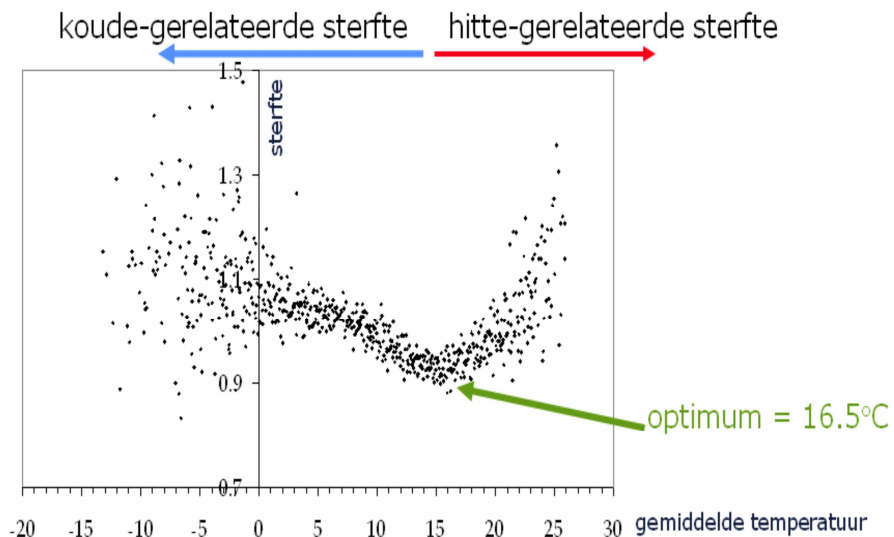


Fig. 3 Verband tussen gemiddelde dagtemperatuur (°C) en sterfte in Nederland, duidelijk V-profiel met een optimum bij 16.5° C. (Daanen, Simons et al. 2010)Fig.

## Versterking stedelijk hitte-eiland

Er wordt verwacht dat in de toekomst het aantal hittegolven zal toenemen als gevolg van de opwarming van de aarde. (Parry and Intergovernmental Panel on Climate 2007) Tijdens hittegolven is de atmosfeer stabiel en is er weinig wind, hierdoor ontstaat een sterk stedelijk hitte-eiland. Door de hoge temperaturen zullen de gezondheidsproblemen en de kosten voor gezondheidszorg toenemen.

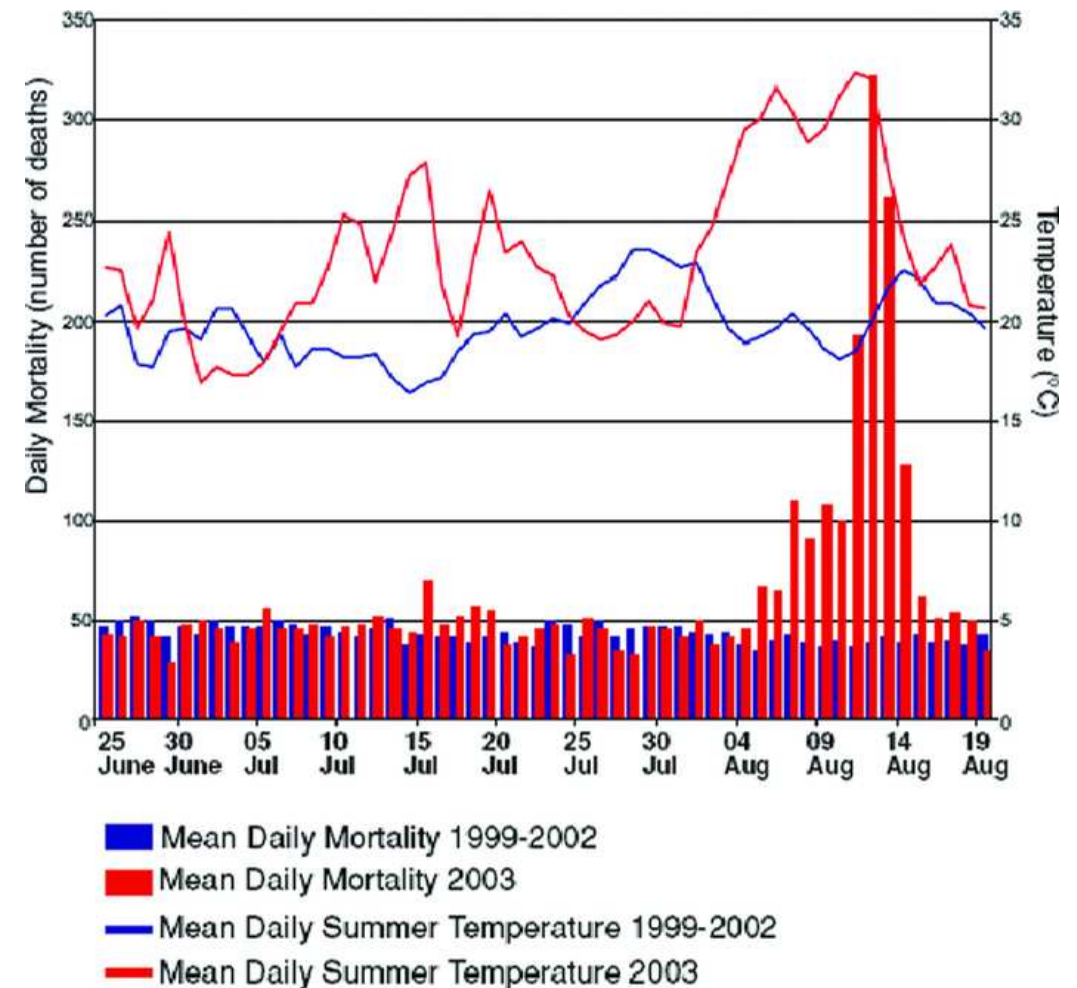


Fig. 4 gemiddelde sterfgevallen in de periode 1999 – 2002 en in 2003 en de temperatuur in dezelfde periode. (IPCC, 2007) (Vandentorren, Empeur-Bissonnet et al. 2005)



### 3. Oorzaken van de hitte

Het hitte eiland-effect wordt veroorzaakt door een aantal verschillende factoren. Deze kunnen worden opgedeeld in de categorieën albedo, warmte capaciteit en antropogene warmte.

#### Albedo

##### Straling

De zon zendt energie uit in de vorm van elektromagnetische straling. Volgens de wet van Wien is het maximum van de stralingscurve afhankelijk van de temperatuur van het uitstralende voorwerp. De uitstraling van de zon (temperatuur  $\pm 6000$  K) heeft volgens deze wet een maximum bij de golflengte van  $0.5 \mu\text{m}$ . De aarde heeft een veel lagere temperatuur ( $300$  K) en straalt daardoor uit bij een golflengte van  $10 \mu\text{m}$ . Ter vergelijking: het zichtbare licht heeft een golflengte tussen de  $380$  nm en  $740$  nm ( $0.38 \mu\text{m}$  tot  $0.74 \mu\text{m}$ ). De zon zendt ook uit in het golflengtegebied rond de  $10 \mu\text{m}$ , maar door de grote afstand tussen de zon en de aarde ontvangen wij slechts een klein deel van deze straling. Daarentegen zendt de aarde bijna niet uit in het golflengtegebied rond de  $0.5 \mu\text{m}$ . Wanneer we op aarde straling tegen komen in het golflengtegebied rond de  $0.5 \mu\text{m}$ , kortgolvlige straling, weten we zeker dat dit van de zon afkomstig is. Daarnaast is straling in het golflengtegebied rond de  $10 \mu\text{m}$ , langgolvlige straling, afkomstig van de aarde. (Kump, Kasting et al. 2004; Kroon, Holtslag et al. 2011)

##### Reflectiefactor

Niet alle kortgolvlige straling wordt geabsorbeerd door het aardoppervlak, een gedeelte wordt gereflecteerd. De Albedo is de fractie kortgolvlige straling die wordt gereflecteerd. Het wordt uitgedrukt als een fractie of percentage, waarbij het een waarde heeft van 0 of 0% als er geen reflectie plaatsvindt en 1 of 100 % wanneer alle kortgolvlige straling wordt gereflecteerd. De albedo van de gehele aarde is ongeveer 0.3, wat betekent dat 30 % van de binnenkomende straling wordt teruggekaatst. Van deze 30 % wordt 67 % gereflecteerd door wolken, 13 % door het aardoppervlak en 20 % door verstrooiing in de atmosfeer. In tabel 1 staan enkele voorbeelden van oppervlakten en het daarbij behorende albedo. (Kump, Kasting et al. 2004; Kroon, Holtslag et al. 2011)

Oppervlak	Albedo
Droge gronden	14 – 45 %
Vochtige grond	2 – 16 %
Sneeuw	30 – 95 %
Water	2 – 60 %
Vegetatie	10 – 20 %

Tabel 1 (Kump, Kasting et al. 2004; Kroon, Holtslag et al. 2011)

De straling die overblijft, en dus niet wordt terug gekeatst, wordt de netto straling (Q) genoemd. Dit is de belangrijkste term van de energie balans.

##### Materiaal

Over het algemeen kan worden gesteld dat donkere kleuren een laag albedo hebben en lichte kleuren een hoog albedo. Daarnaast kan worden gesteld dat doffe materialen een laag en glanzende of spiegelende materialen een hoog albedo hebben. Bij deze vuistregels wordt echter alleen rekening gehouden met het zichtbare licht en niet met voor de mens onzichtbaar licht zoals het nabij infrarood. Ongeveer de helft van de

straling van de zon bevindt zich in het nabij infrarood en is niet zichtbaar voor het menselijk oog. Bij conventionele materialen kan worden gesteld dat de absorptie in het zichtbare licht overeenkomt met de absorptie in het nabij infrarood. Echter in de afgelopen jaren zijn er materialen in omloop gekomen die een donkere kleur hebben, maar die in het nabij infrarood geen straling absorberen. Deze materialen ogen donker, maar hebben een relatief hoog albedo.

### **Street canyon**

Het albedo van de stad als geheel wordt verlaagd door het *street canyon* effect. Licht dat binnenkomt aan de bovenkant van de stad, komt terecht in een zogenaamde *street canyon*, een kloof met aan 2 of meer zijden bebouwing. In deze kloof kan straling op verschillende zijden terecht komen en geheel of gedeeltelijk geabsorbeerd worden in de kloof. Het effectieve albedo, het albedo van de gehele straat, wordt hierdoor verlaagd.

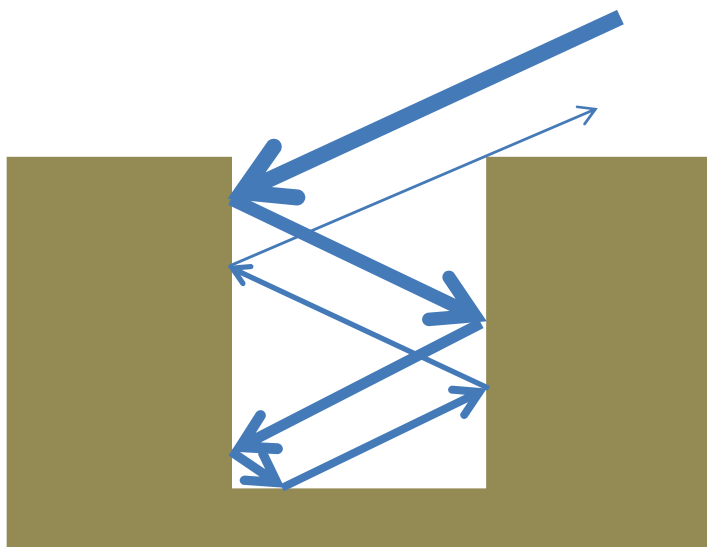


Fig. 5. Een weergave van een street canyon .

## **Energiebalans**

Met de netto energie die op het aardoppervlak binnen komt ( $Q$ ) kunnen 3 dingen gebeuren. De energie kan worden omgezet in voelbare warmte ( $H$ ), de energie kan worden gebruikt voor verdamping, de latente warmte ( $LE$ ), en de energie kan opgenomen worden door de bodem ( $G$ ). Deze vier zaken bij elkaar wordt de energiebalans genoemd en kan worden beschreven met formule 2. (Kroon, Holtslag et al. 2011)

$$Q = H + LE + G \quad (2)$$

De hoeveelheid energie die wordt opgenomen door de bodem is afhankelijk van de warmtecapaciteit en de temperatuur van de bodem. Over het algemeen kan gesteld worden dat in het voorjaar de bodem opwarmt en in het najaar de bodem afkoelt. Daarnaast is er een dagelijkse cyclus waarbij overdag de bodem opwarmt en 's nachts de bodem afkoelt. De hoeveelheid energie die door de bodem wordt opgenomen, is normaal gesproken relatief klein. Een groot deel van de netto energie wordt gebruikt voor de opwarming van lucht en voor verdamping. De verhouding tussen deze twee wordt de Bowen constante ( $\beta$ ) of Bowen verhouding genoemd (formule 3).

$$\beta = H / LE \quad (3)$$

De Bowen verhouding is afhankelijk van de hoeveelheid water die aanwezig is om te verdampen. Bij oppervlakten met vegetatie is een Bowen verhouding van 0.8 tot 1.5 normaal (figuur 6), dit wil zeggen dat de hoeveelheid energie die gebruikt wordt voor verwarming van lucht ongeveer gelijk is aan de energie die gebruikt wordt voor verdamping. In regenwouden is een Bowen verhouding van 0.2 normaal en bij oceanen een verhouding een 0.1. Dit wil zeggen dat respectievelijk 5 en 10 keer zoveel energie wordt gebruikt voor verdamping dan voor verwarming van lucht. (Taha 2004)



In steden gebeurt het omgekeerde doordat er weinig tot geen water kan verdampen. De Bowenverhouding loopt op tot 4 of 5, wat een sterke opwarming van de lucht tot gevolg heeft. (figuur 7)

## Antropogene warmte

In de stedelijke omgeving wordt veel warmte geproduceerd. De grootste warmtebron is de industrie, maar transport (verbrandingsmotoren) en huizen (verwarming/airconditioning) kunnen ook meespelen. Daarnaast hebben mensen vaak een lichaamstemperatuur die hoger is dan de omgevingstemperatuur, waardoor warmte wordt afgestaan aan de omgeving. Al deze dingen bij elkaar worden antropogene warmte genoemd en kunnen worden opgenomen in de energiebalans. Hierdoor ontstaat de nieuwe formule:

$$Q + A = H + LE + G \quad (4)$$

De antropogene warmte komt bij de netto energie en versterkt de hoeveelheid energie (en dus warmte) in de stad.

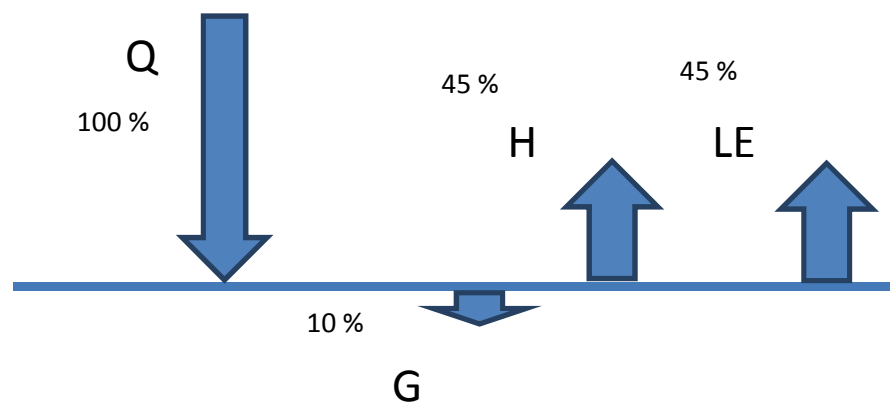


Fig. 6 Energie balans op een grasland. Bowen verhouding van 1. .

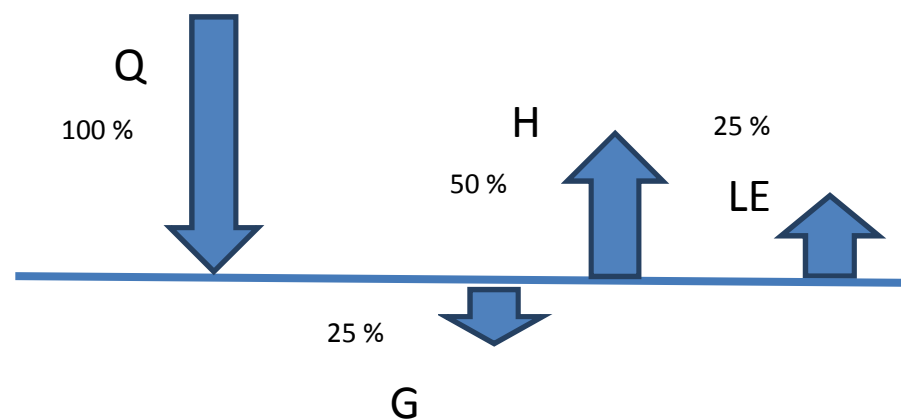


Fig. 7 Energie balans in de stad. Bowen verhouding van 2. .

## Warmte capaciteit

Ieder voorwerp heeft een bepaalde warmte capaciteit, dit is de hoeveelheid energie die nodig is om een voorwerp op te warmen. De warmtecapaciteit (C) is gedefinieerd als de verhouding tussen energie (Q) die opgenomen wordt door een voorwerp en de bijbehorende toename in temperatuur( $\Delta T$ ).

$$C = Q / \Delta T \quad (5)$$

Materialen die veel worden gebruikt in steden zoals beton, steen en asfalt hebben een hoge warmtecapaciteit, wat betekent dat ze veel energie kunnen opslaan bij een relatief lage temperatuurstijging. (Taha 2004) Dit heeft gevolgen voor de energiebalans in een stad, waar deze materialen veel voorkomen. Overdag kan veel energie worden opgeslagen in bebouwing en bestrating. Deze energie komt er 's nachts weer uit in de vorm van warmte.

Een ander fenomeen is de totale hoeveelheid oppervlak per horizontale oppervlak, de zogenoemde Surface-to-Area Ratio (SAR). Een open vlakte heeft een SAR van de 1, het totale oppervlakte is gelijk aan het

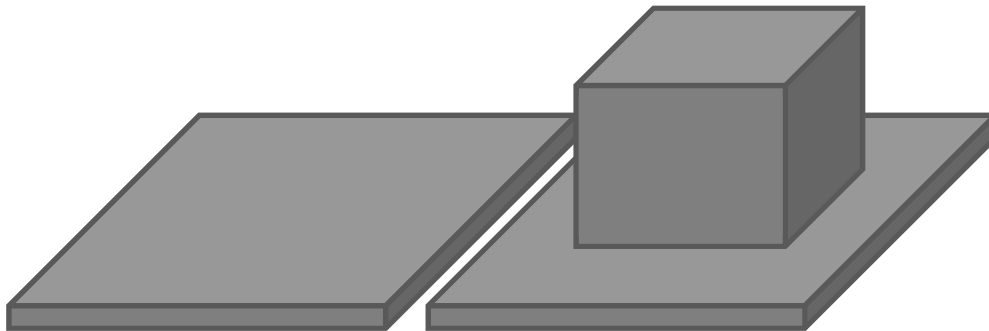


Fig. 8 Het linker figuur heeft een SAR van 1. Het oppervlak is gelijk aan totaal horizontaal oppervlak. Rechter figuur heeft een SAR van  $\pm 2$ , naast het horizontale oppervlakte is er ongeveer evenveel verticaal oppervlakte.

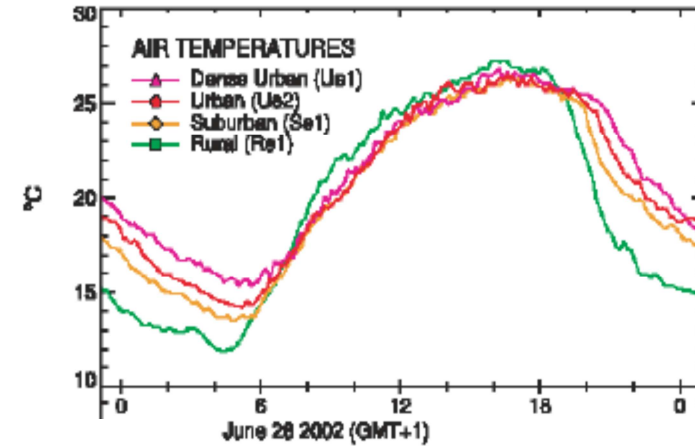


Fig. 9 Temperatuur op 3 verschillende plekken in de stad en 1 buiten de stad uit (Rotach, Vogt et al. 2005)

horizontale oppervlakte, in steden kan de SAR oplopen tot 2 á 3, bij veel hoogbouw tot 5, in Manhattan is er zelfs een SAR van 10 (figuur 8). Hoe groter de SAR hoe meer energie opgeslagen kan worden.

De hoeveelheid energie die wordt opgeslagen (G in de energiebalans) is met bebouwing veel groter dan zonder bebouwing. Dit heeft gevolgen voor de beschikbare hoeveelheid energie voor verwarming en verdamping ( $H + LE$ ). Overdag is deze energie minder dan in normale omstandigheden, 's nachts is deze hoeveelheid groter. Uit onderzoek gedaan in Basel (Rotach, Vogt et al. 2005) is gebleken dat de grootte van de opslag van energie (G) zorgt voor een lagere temperatuur overdag en een hoge temperatuur 's nachts in bepaalde omstandigheden (figuur 9). Deze bevindingen zijn vergelijkbaar met de situatie in ander steden.

Een andere factor die meespeelt is de snelheid waarmee warmte afgestaan kan worden aan de atmosfeer. Hoe sneller dit warmtetransport gaat, hoe kleiner het stedelijk hitte-eiland effect kan worden. Dit

warmtetransport is afhankelijk van de hoeveelheid atmosfeer die beschikbaar is om hitte aan af te staan. Hiervoor is de Sky-View-Factor (SVF) een goede indicatie. De SVF is het percentage van de lucht dat zichtbaar is vanaf het midden van een straat.(Barring, Mattsson et al. 1985) Hoe meer hoogbouw, hoe kleiner de zichtbare hoeveelheid lucht en hoe moeilijker het is om warmte kwijt te raken.



*Fig. 10. Zeer lage SVF door hoge gebouwen en een smalle straat.*

## **Stedelijke broeikaseffect**

Er kan rond steden een lokaal broeikaseffect ontstaan, doordat broeikasgassen zich in de stad ophopen. Er is meer productie van broeikasgassen door transport, industrie en mensen, daarnaast is er minder afbraak van deze gassen door vegetatie en chemische processen.

Zeker onder stabiele omstandigheden, omstandigheden die 's nachts ontstaan bij een stedelijk hitte-eiland, is er een verminderde verplaatsing en uitwisseling van deze gassen mogelijk.(Kroon, Holtslag et al. 2011) Dit heeft tot gevolg dat deze gassen kunnen bijdragen aan een verhoging van de inkomende langgolvlige straling en daarmee warmte. (Santamouris and Asimakopoulos 2001)



## 4. Stedelijke klimaat kaart

Een stedelijke klimaat kaart, in veel gevallen Urban Climatic Map (UCMap) genoemd, is een kaart waarbij een verbinding wordt gelegd tussen klimatologische data en ruimtelijke planning. De stedelijke klimaat kaart bestaat uit twee kaarten; een analyse kaart, ook wel Urban Climatic Analysis Map (UC-AnMap) genoemd, en een kaart met aanbevelingen voor de ruimtelijke planning, de Urban Climatic Recommendation Map (UC-ReMap). (Ren, Ng et al. 2010)

### Analyse kaart

De analyse kaart is een visualisatie van een aantal gevarieerde ruimtelijke klimatologische eigenschappen. Er wordt een samenvatting en waardering gegeven van de input van klimatologische parameter en landgebruiksdata voor een gegeven tijdinterval, meestal jaarlijks of voor een specifiek seizoen. Voor veel analyse kaarten worden grofweg 3 thema's behandeld. Het eerste thema is het thermische aspect, waarbij gekeken wordt naar het stedelijk hitte-eiland effect en het stedelijke-bio-klimaat, daarbij wordt speciaal bedoeld op hitte-stress. Het tweede thema is de wind, waarbij gekeken wordt naar lokale wind circulatie, zoals land- en zeewind, berg- en dalwind en de meest voorkomende windrichting. Daarnaast wordt gekeken naar bestaande en mogelijke wind-paden, ventilatiezones en de locatie van barrières zoals gebouwen en beplanting. De laatste factor is de luchtvervuiling die hier niet verder behandeld zal worden.

## Klimatopen

Voor het thermische aspect is het gebruik van klimatopen handig. Klimatopen zijn beschrijvingen van geografische gebieden met vergelijkbare microklimatologische aspecten. Hierbij kan onder anderen worden gekeken naar de dagelijkse temperatuurverschillen, de windfactoren, topografische situaties, materiaalgebruik en landgebruik.

Gebieden met vergelijkbare omstandigheden vallen onder dezelfde klimatoop. Hierdoor wordt in één oogopslag duidelijk waar problemen kunnen worden verwacht en waar niet. In het Climate Booklet for Urban Development (Stuttgart Stadtklimatologie, 1-12-2011) worden de verschillende klimatopen vernoemd naar de belangrijkste landgebruiksvorm of gebouwtypes, omdat het type ontwikkeling en het landgebruik het meeste effect hebben op het microklimaat. In het Climate Booklet komen klimatopen met de volgende benamingen voor: water, open land, bos, groene gordel, tuinstad, stedelijke periferie, stad, binnenstad, commercieel, industrie en trein. Het hangt echter van de omstandigheden af welke klimatopen van toepassing zijn en dus beschreven moeten worden, het kan dan ook voorkomen dat er klimatopen ontstaan of juist wegvallen.

## Rotterdam

Voor de situatie van Rotterdam worden de aanbevelingen met betrekking tot de verschillende klimatopen grotendeels overgenomen. De stedelijke klimatopen hebben een andere benaming gekregen die beter past bij de situatie. De groene gordel is vervangen door de vergelijkbare klimatoop park en de gehele infrastructuur vormt een vervanging van de klimatoop trein. Daarnaast is een nieuwe klimatoop kassen bijgevoegd. Hieronder

wordt kort beschreven wat de verschillende klimatopen inhouden en de eigenschappen zijn weergegeven in tabel 2.

- Water: Bestaat uit oppervlakte water of land dichtbij water, en daardoor in de invloedssfeer hiervan.
- Open land: Omvat agrarische gebieden, zoals akkerbouw en weidebouw. De meeste meetstations van het KNMI bevinden zich op grasland.
- Bos: Bestaat uit grote gebieden bedekt met volgroeide bomen.
- Park: Een tussenvorm tussen de open land en bos klimatopen. Stadsparken, sportvelden, golfbanen en volkstuinen zijn voorbeelden hiervan.
- Kassen: Klimatoop die bestaat uit aaneengesloten kassengebieden.
- Industrie: Havengebieden, maar ook chemische industrie, zoals de raffinaderijen bij Pernis. Qua materiaalgebruik vergelijkbaar met de commerciële klimatoop.

Commercieel: Gebieden met grote winkels, zoals Gamma of Praxis, en veel parkeerplaatsen. Kenmerkt zich door veel gebruik van beton, ijzer en asfalt.

Infrastructuur: Grote aaneengesloten gebieden, zoals de snelwegen rond Rotterdam, maar ook de spoor- en metrolijnen.

Tuinstad: De groenste stedelijke vorm. Voorbeelden zijn groene villawijken, lintbebouwing en volkstuincomplexen met veel bebouwing.

Laag stedelijk: Omvat wijken met rijtjeshuizen en lage appartementengebouwen.

Stedelijk: Bestaat uit twee verschillende types. Hoogbouw met veel groen in de omgeving en zeer compacte laagbouw zonder groen.

Hoog stedelijk: Bestaat uit hoogbouw, woontoren en kantoren, zonder groen.

	Albedo	Bowenverhouding	Warmtecapaciteit	Antropogene warmte	Sky-View-Factor
Bos	+	---	-	---	--
Park	+	--	-	--	<b>0</b>
Open Land	+	-	--	--	<b>+++</b>
Water	+	---	<b>0</b>	-	<b>+++</b>
Tuinstad	<b>0</b>	--	-	<b>0</b>	<b>0</b>
Infrastructuur	-	<b>++</b>	-	<b>++</b>	<b>++</b>
Laag Stedelijk	-	-	+	<b>0</b>	-
Commercieel	<b>0</b>	<b>++</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	-
Kassen	<b>0</b>	<b>++</b>	<b>0</b>	<b>++</b>	-
Industrie	--	<b>++</b>	+	<b>++</b>	--
Stedelijk	--	+	<b>++</b>	<b>0</b>	--
Hoog Stedelijk	---	<b>+++</b>	<b>+++</b>	<b>0</b>	---

Tabel 2. Lage waarden worden aangegeven met mintekens (-), gemiddelde waarden met een rondje (o), hoge waarden met een plusteken (+). Meer min- of plustekens betekent respectievelijk een lagere of hogere waarde. Bij albedo en sky-view-factor betekent een lage waarde veel warmte, bij de Bowenverhouding, warmtecapaciteit en antropogene warmte betekent een lage waarde weinig warmte.

## Werkmethode

De thermische kaart (figuur 16) is gemaakt met behulp van de topografische kaart 1:50.000 (figuur 11), waar de water- en groengebieden en de bebouwing uit geselecteerd zijn (figuur 12, 13 en 14). De gebouwhoogtekaart (figuur 15) is verkregen door de bebouwingkaart te combineren met de algemene hoogtekaart. Hierbij gaat het om de hoogte ten opzichte van het NAP. De gebouwhoogte op de kaart klopt hierdoor niet helemaal, het zou vergeleken moeten worden met de straathoogte. Hierdoor zit er een foutmarge in de kaart van  $\pm 5$  meter. Door het ontbreken van een landgebruikskaart is google streetview, satellietfoto's, de topografische kaart (1:10.000 en 1:50.000) en eigen waarnemingen gebruikt voor het bepalen van de verschillende klimatopen.

## Vergelijking met data

Om de geldigheid van de thermische analysekaart te controleren is deze vergeleken met metingen gedaan door de leerstoelgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit van de Wageningen Universiteit. Deze metingen werden uitgevoerd met behulp van een bakfiets met verschillende meetapparatuur aan boord. De metingen zijn hierna omgerekend naar gevoelstemperatuur uitgedrukt in PET, Physiologically Equivalent Temperature, die beschreven is in hoofdstuk 2.

Op 6 augustus 2009 is er twee keer een ronde gefietst van ongeveer 2 uur, de eerste keer was overdag de tweede 's avonds na zonsondergang. 6 augustus was een warme dag met een gemiddelde temperatuur van 23.3°C en een minimum en maximum temperatuur van respectievelijk 15.1°C en 29.9°C. Er was een oostelijke wind met een gemiddelde windsnelheid van 2.9 m/s.

De meting van 14:00 tot 16:00 (figuur 17) geeft een beeld dat niet goed past bij de klimatopen. In het noordelijk deel van de route gaat de meting gedeeltelijk de stad uit, hier is het volgens de klimatopen koeler maar de metingen laten dit niet zien. Daarnaast zit er veel variatie tussen gebieden met dezelfde klimatoop.

De metingen van 22:00 tot 24:00 (figuur 18) komen al veel beter overeen met de klimatopen. Te zien is dat de hoogste gevoelstemperatuur zich ook daadwerkelijk in het centrum van de stad bevindt en de laagste temperatuur in de groene gebieden. Wat opvalt is de relatief koele oostkant van de route. Het lijkt hier een stuk koeler te zijn dan in vergelijkbare gebieden aan de westkant van de route. Een duidelijk voorbeeld hiervan zijn de twee bruggen over de Maas, de oostelijke Van Brienenoordbrug is veel koeler dan de westelijke Erasmusbrug. Daarnaast bevinden de warmste gebieden zich ook niet in de warmste klimatopen, maar daar net westelijk van. Dit zou te verklaren zijn doordat de oostelijke wind koelere lucht van buiten de stad aanvoert. Dit geeft al aan dat de wind een belangrijke rol speelt bij de gevoelstemperatuur.



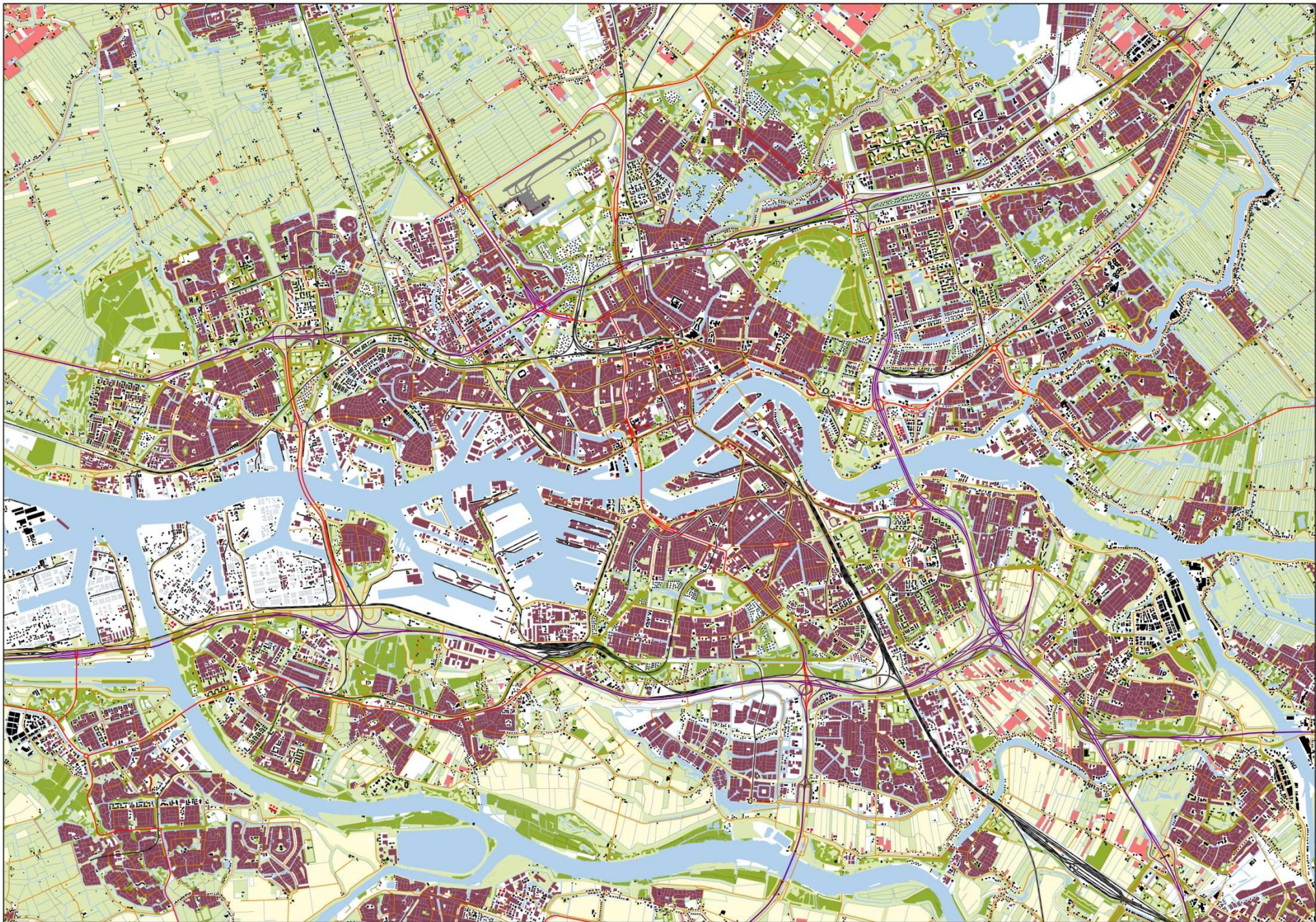


Fig. 11 topografische kaart 1: 50.000

0 0.5 1 2 3 4 5 Kilometers





Fig. 12 Watergebieden 1:50.000





Fig. 13 Groengebieden 1: 50.000



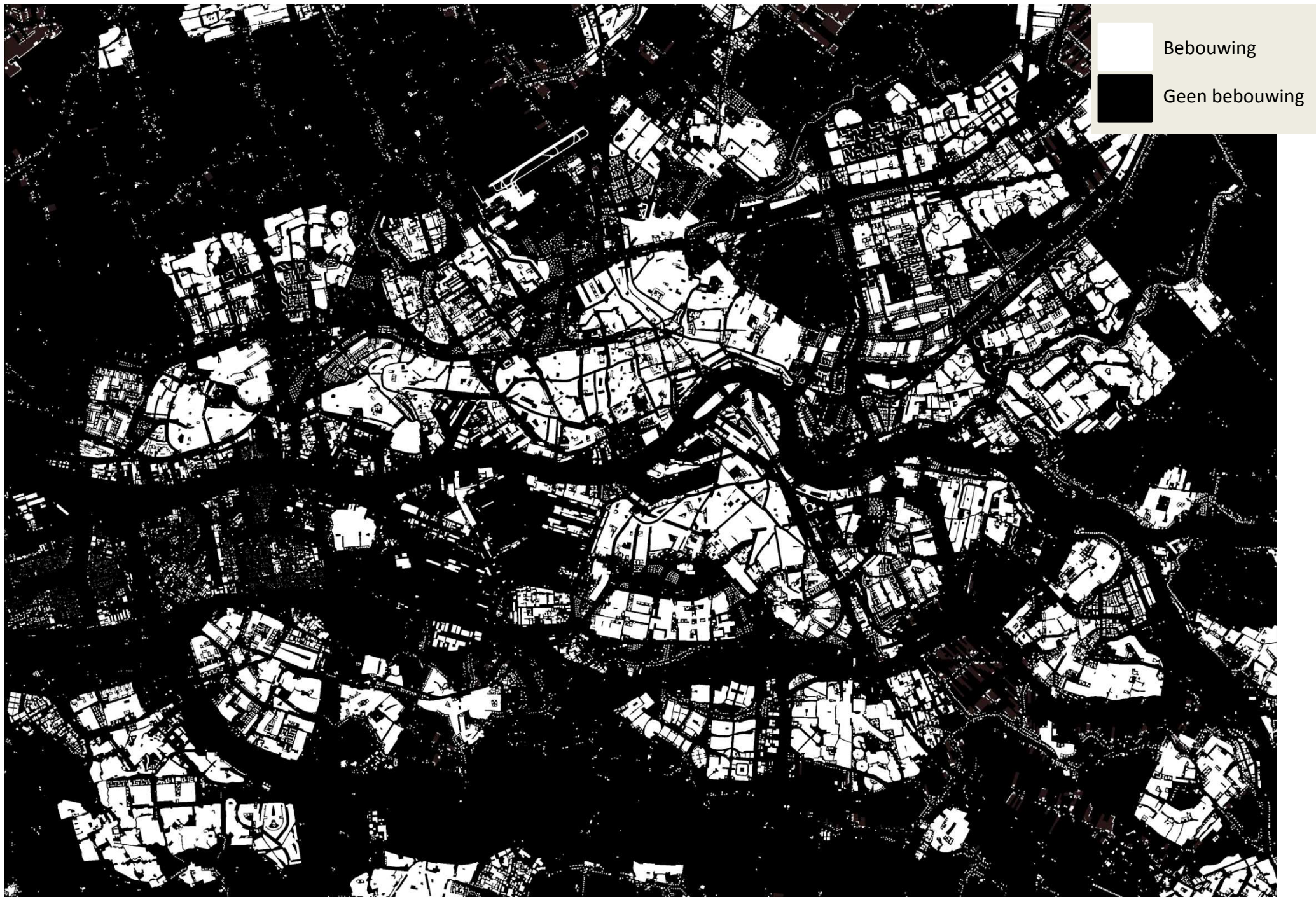


Fig. 14 Bebouwing 1: 50.000



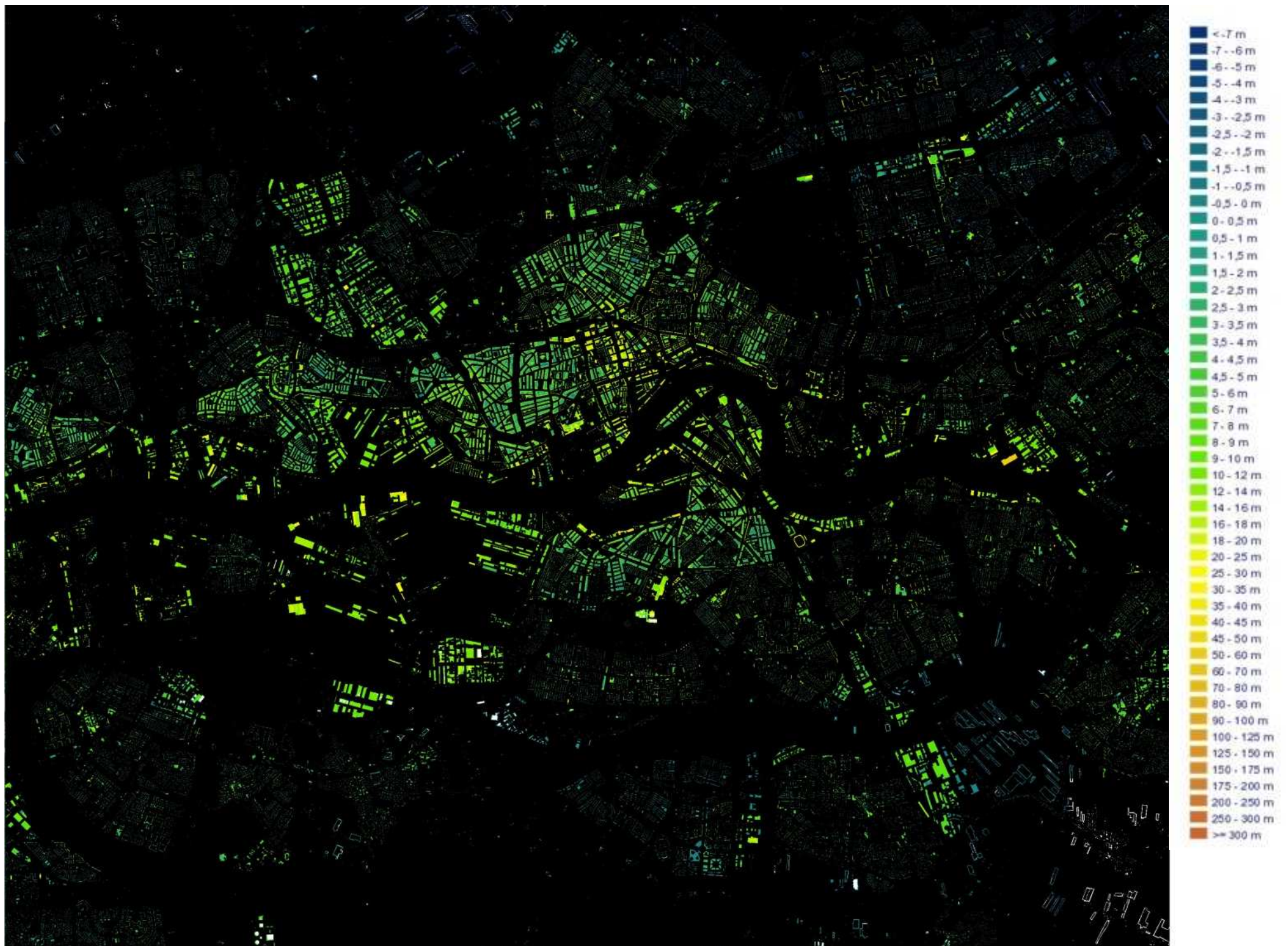


Fig. 15 gebouwhoogtes 1: 50.000. Hoogte uitgedrukt in meter boven NAP.





Fig. 16. Thermische analysekaart. 1: 50.000

0 0.5 1 2 3 4 5 Kilometers



Fig. 17. Thermische analysekaart gecombineerd met meetgegevens gemeten tussen 14:00 en 16:00 uur op 6 augustus 2009. Gevoelstemperatuur uitgedrukt in PET. 1:50.000 (Heusinkveld, Hove et al. 2010)

0 0.5 1 2 3 4 5 Kilometers



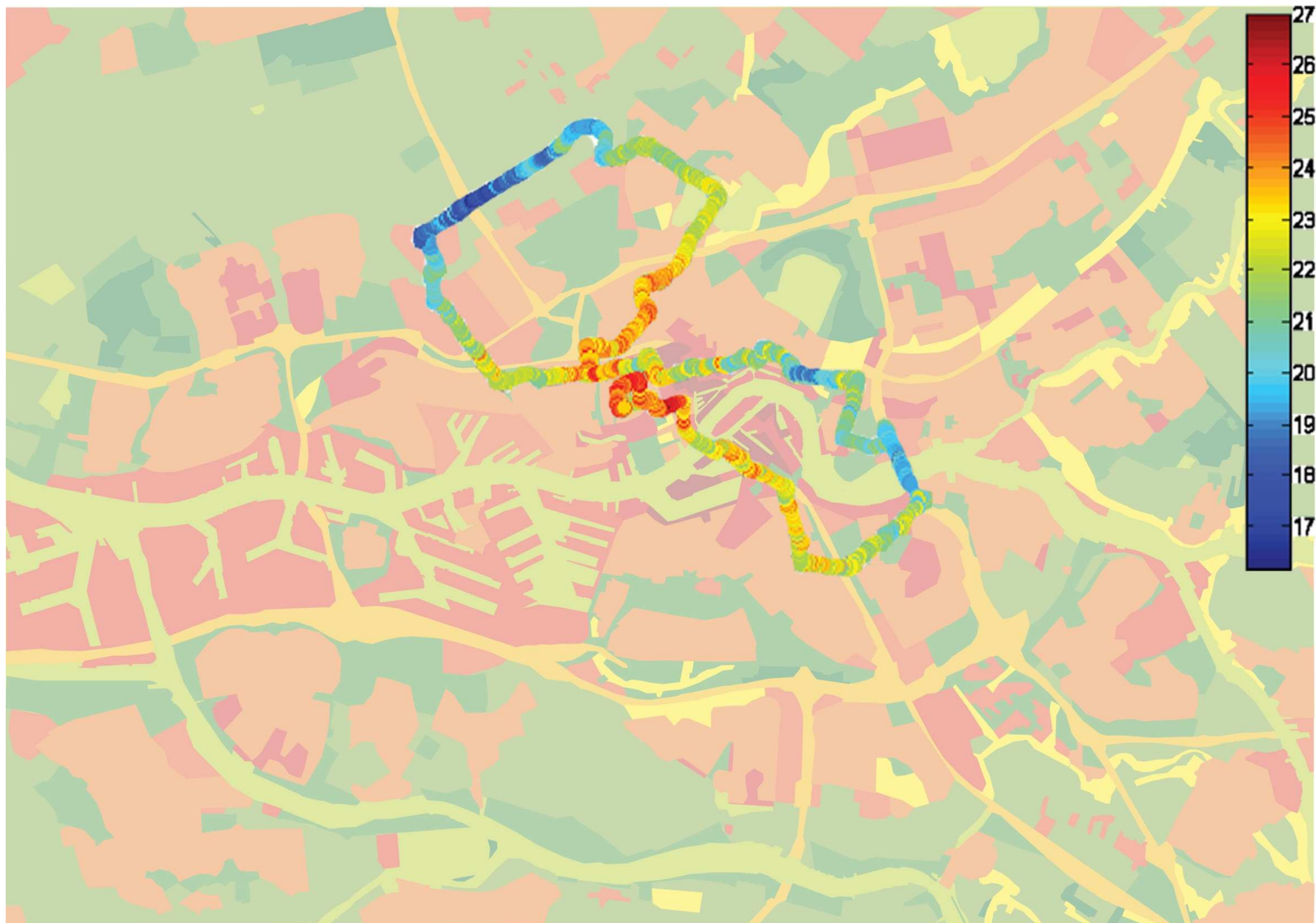


Fig. 18. Thermische analysekaart gecombineerd met meetgegevens gemeten tussen 22:00 en 24:00 uur op 6 augustus 2009. Gevoelstemperatuur uitgedrukt in PET. 1:50.000 (Heusinkveld, Hove et al. 2010)

0 0.5 1 2 3 4 5 Kilometers



## 5. Wind

De gevoelstemperatuur wordt naast de werkelijke temperatuur ook bepaald door wind, vandaar dat dit aspect bij een UCMaP extra benadrukt wordt. In het Nederlandse landschap moet rekening gehouden worden met de overheersende zuidwestelijke windrichting en in de kustgebieden met land- en zeewind. Berg- en dalwinden spelen een veel minder belangrijke rol in Nederland door het ontbreken van grote hoogteverschillen. In gebieden zoals de Veluwe en in Limburg kan het fenomeen zich wel voordoen op een kleine schaal. Voor wind in de stad moet gekeken worden naar de aanwezige wind, windbanen, mogelijke windbanen en windblokkades.

### Meteorologische gegevens

Vlakbij het centrum van Rotterdam, bij Rotterdam The Hague Airport, worden al sinds 1956 metingen gedaan door het KNMI. Er werd begonnen met metingen van temperatuur, luchtdruk en vochtigheid, maar in de loop van de tijd zijn daar windcomponenten, zicht en neerslag bij gekomen. Van de verschillende type metingen is sinds het begin in 1956 of sinds de jaren 60/70 een onafgebroken reeks gegevens beschikbaar. Dit maakt deze meetgegevens geschikt om een goed beeld te krijgen van de meteorologische situatie in Rotterdam.

### Windmetingen

In het begin van de jaren 60 werd een begin gemaakt aan de windmetingen. Hierbij werden de metingen nog wel eens een dag

overgeslagen, maar vanaf 1962 zijn er van iedere dag meetgegevens beschikbaar.

Om een goed beeld krijgen uit welke richting de wind komt is er een analyse hiervan gemaakt. Hiervoor is de gemiddelde windrichting gebruikt tussen 1 januari 1962 en 9 oktober 2011, in totaal gaat het daarbij over bijna 50 jaar, ruim 18000 metingen. Klimatologisch gezien is dit slechts een klein tijdsbestek, maar toch geeft het een goed beeld van de overheersende windrichting rond Rotterdam.

### Algemeen

Wanneer gekeken wordt naar al deze data, kan gezegd worden dat de overheersende windrichting zuidwest is, zoals te zien is in figuur 20. Daarnaast is te zien dat vooral de zuidwestelijke winden vrij sterk zijn (figuur 21). Dit past in de theorie van de atmosferische circulatie, waarbij in onze omgeving de zogenaamde *westerlies* voorkomen. Zuidwestelijke winden die warme lucht transporteren van de subtropische hogedrukgebieden, rond 30° Noorderbreedte, naar de subpolaire lagedrukgebieden, rond 60° Noorderbreedte. (Kump, Kasting et al. 2004) Deze sterke winden kunnen op plekken waar mensen ermee in contact komen als onaangenaam worden ervaren.

### Warme dagen

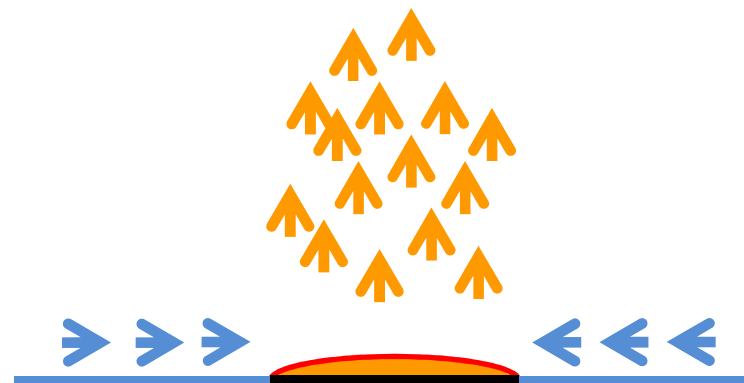
Een vergelijkbare analyse is gemaakt van de windrichtingen op dagen dat de maximum temperatuur boven de 25° Celsius uitkomt. Op dit soort dagen kan een sterk stedelijk hitte-eiland worden verwacht. Dit hangt van meer omstandigheden af dan alleen de temperatuur waardoor er geen direct causaal verband is. Toch geeft het een indicatie van de omstandigheden tijdens een stedelijk hitte-eiland.

Tijdens deze warme dagen is de zuidwestelijke wind veel minder sterk aanwezig, er is zelfs een overheersende windrichting vanuit het oosten zichtbaar (figuur 22). De noordoostelijke en zuidwestelijke winden zijn in deze situatie het sterkst (figuur 23), maar een stuk minder sterk dan gezien over het algemeen. In de zomer is het in het binnenland van Europa, waar een landklimaat heerst, een stuk warmer dan in onze omgeving, waar we veel invloed ondervinden van de oceaan en zeeën. Wanneer we in de zomer te maken krijgen met een (noord)oostelijke windstroming wordt de warme lucht van het Europese binnenland langzaam onze kant op geduwd, de temperatuur kan in dat geval flink oplopen.

Er moet gezegd worden dat de hoeveelheid beschikbare data beperkt is, er zijn slechts 900 dagen dat de maximum temperatuur boven de 25° C komt. Het beeld is dan ook een stuk onregelmatiger dan wanneer er meer data beschikbaar is.

### **Convectieve wind**

Naast de algemeen voorkomende wind, komt in de stedelijke omgeving nog een ander soort wind voor, die omschreven kan worden als convectieve wind. Door de opwarming van de stad ontstaat convectie, warme lucht die opstijgt. Er ontstaat hierdoor een lichte onderdruk in de stad. Deze onderdruk zorgt voor aantrekking van lucht uit de omgeving (figuur 19). De stadbries, die ontstaat door de convectiestromen, kan zich dus alleen ontwikkelen wanneer er sprake is van een groot temperatuurverschil over een relatief kleine afstand. Vooral aan de randen van de stad kan de bries voor verkoeling zorgen, maar het doordringend vermogen is beperkt.



*Fig. 19. Schematische weergave van convectieve wind.*

### frequentie van de windrichting

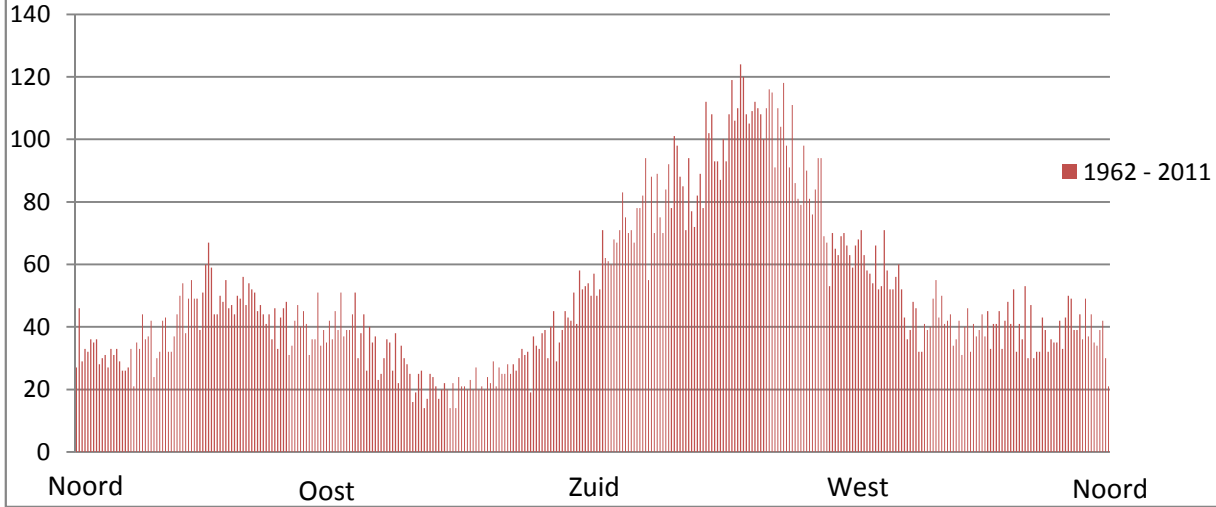


fig. 20. Van iedere windrichting is de frequentie bepaald voor de periode 1962-2011.

### Etmaalgemiddelde windsnelheid

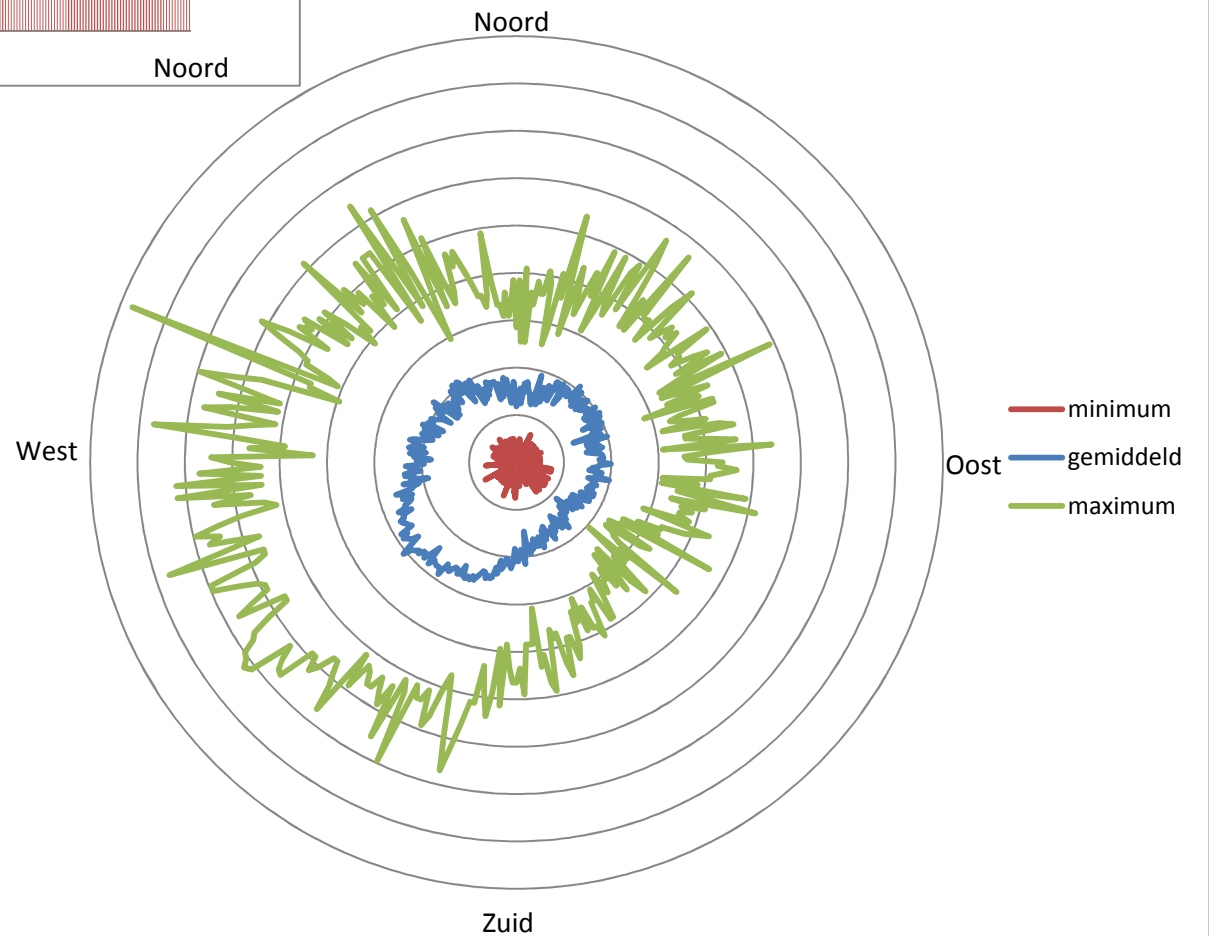


Fig. 21. De windsnelheid vergeleken met de windrichting, voor de periode 1962-2011. Hoe verder van het middelpunt hoe harder de wind.

## frequentie van de windrichting

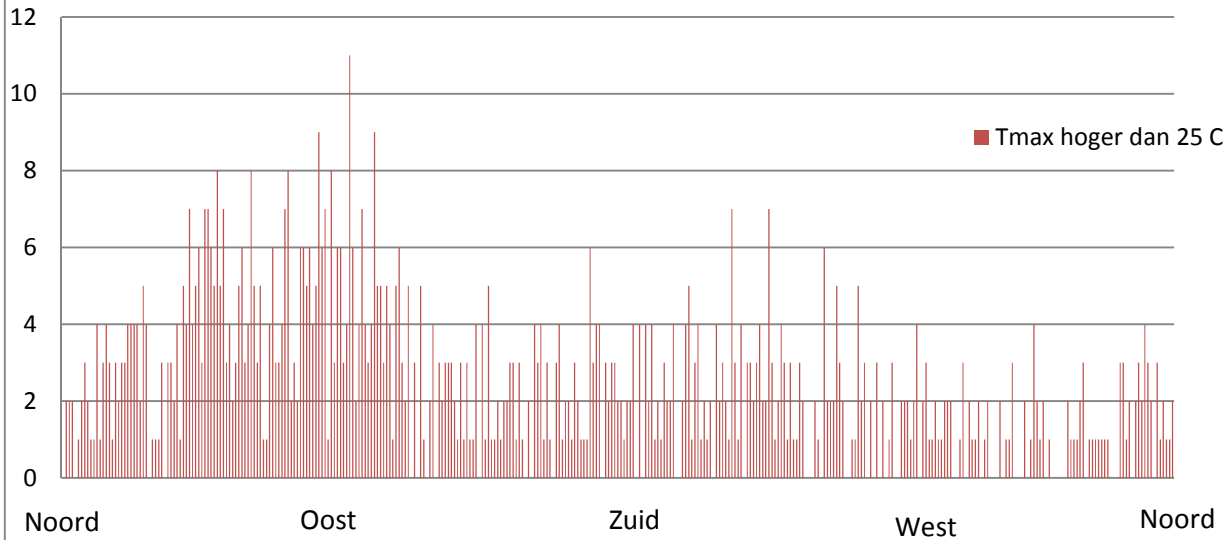


fig. 22. Van iedere windrichting is de frequentie bepaald voor de dagen met een maximum temperatuur hoger dan 25°C in de periode 1962-2011.

## etmaalgemiddelde windsnelheid

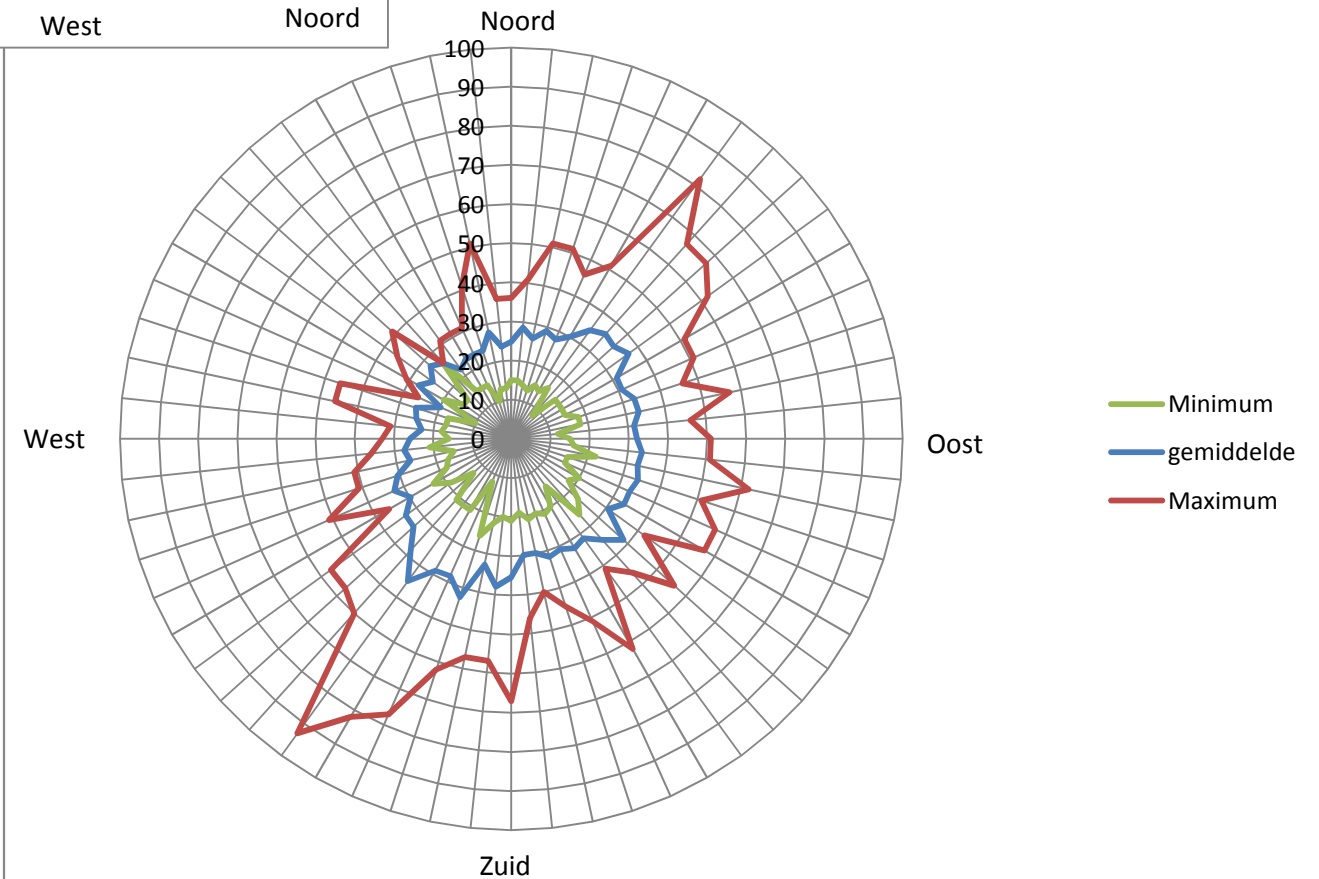


Fig. 23. De windsnelheid vergeleken met de windrichting, voor de dagen met een maximum temperatuur hoger dan 25°C in de periode 1962-2011. Hoe verder van het middelpunt hoe harder de wind.

## Turbulentie

Wind ondervindt wrijving aan het aardoppervlak, waardoor de windsnelheid met de hoogte toeneemt. Aan het oppervlakte of daar iets boven bevindt zich een punt waar de windsnelheid 0 m/s is. Wanneer er meer wrijving is, zoals in een stad, zal dit punt zich hoger bevinden. Onder dit punt is er nog maar in beperkte mate sprake van wind, en is er sprake van beschutting.

Wanneer hoogteverschillen tussen gebouwen groot zijn ontstaat er turbulentie rond de hoogste gebouwen. Afhankelijk van de vorm en positionering van het gebouw ten opzichte van de windrichting kan er op verschillende plaatsen rond het gebouw een versterking of afzwakking van de wind plaatsvinden. Dit kan, zelfs in het beschutte centrum van een stad, op straatniveau gevoeld worden. Langdurig verblijf in deze gebieden, zoals een terrasbezoek, zal niet aangenaam zijn.

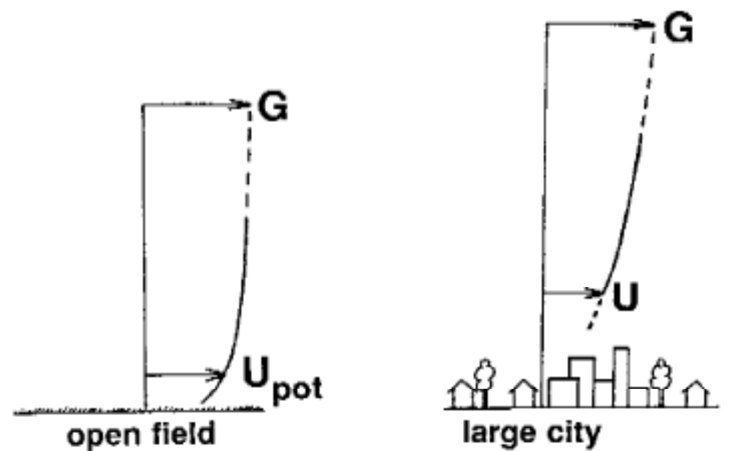


Fig. 24. Vermindering van de wind op straatniveau door wrijving aan het oppervlakte (Bottema 1992)

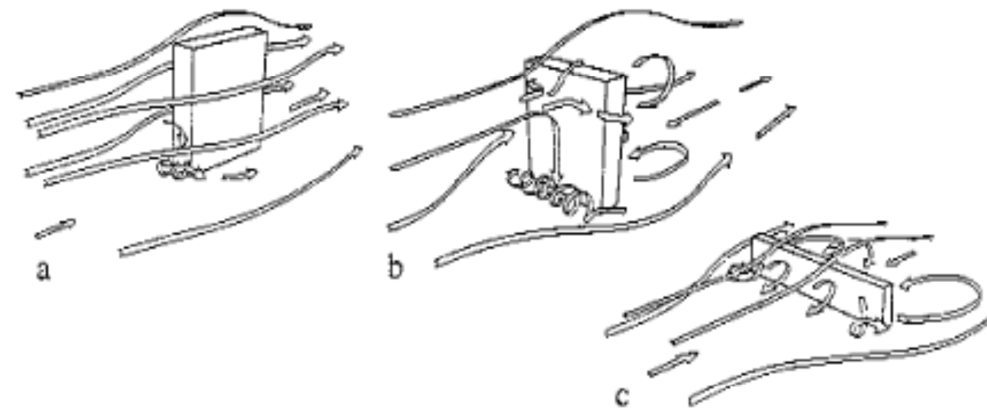


Fig. 25. Turbulentie is afhankelijk van de vorm en plaatsing van de gebouwen ten opzichte van de windrichting. (Bottema 1992) origineel uit (Beranek 1984)

## Windanalyse kaart

In figuur 26 is alle informatie die is verzameld over wind, vertaald naar de specifieke situatie van Rotterdam. Open gebieden waar wind vrij spel heeft zijn gearceerd, de stadsranden waar deze wind voor problemen kan zorgen zijn aangegeven. De grote windstromen in de stad zijn aangegeven. Op plaatsen waar een groot verschil kan ontstaan tussen warme en koude oppervlakte kan convectieve wind ontstaan, deze gebieden zijn aangegeven met witte pijlen. In gebieden met grote verschillen in gebouwhoogtes kan turbulentie verwacht worden, deze gebieden zijn ook aangegeven.



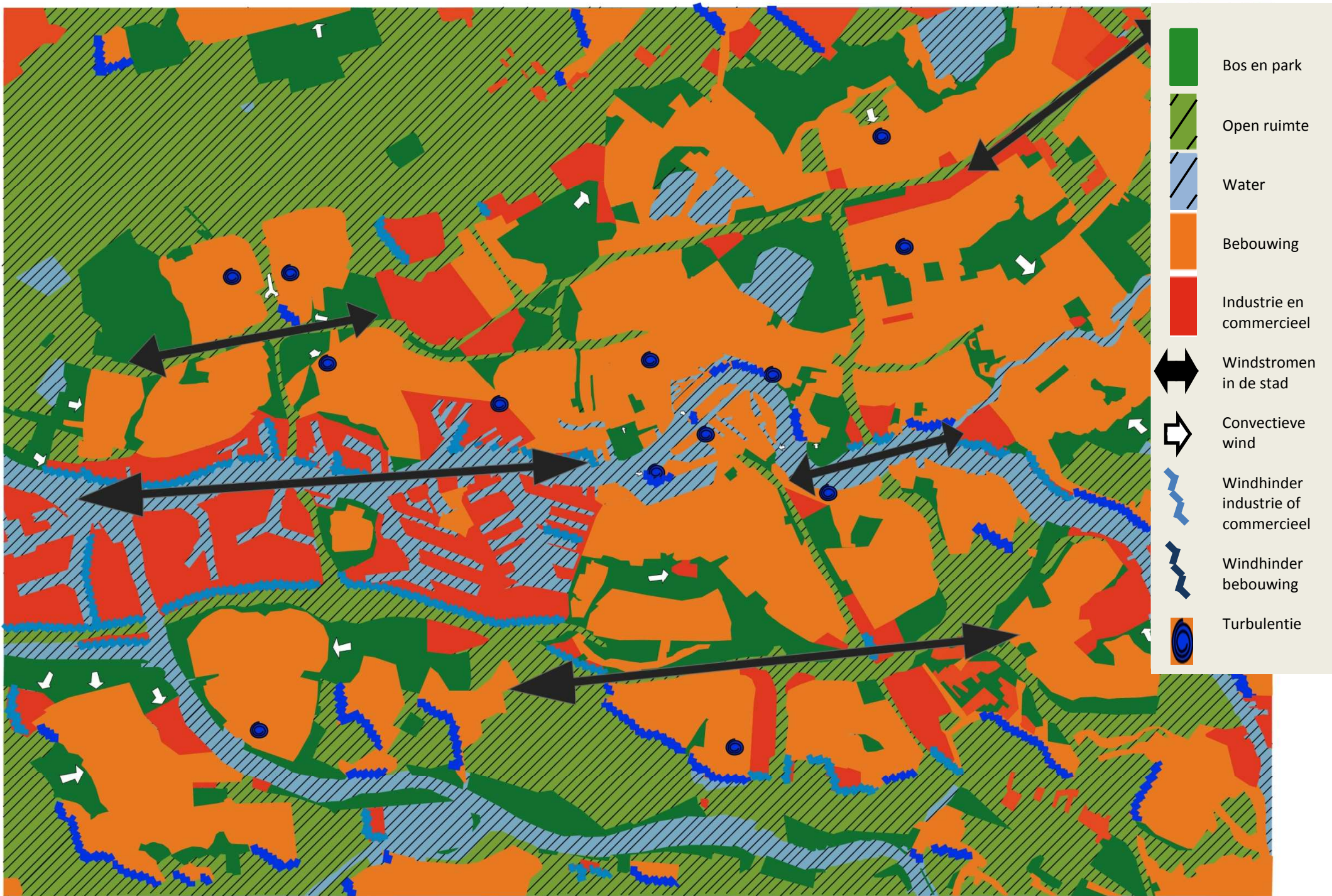


Fig. 26. Windanalyse kaart. 1:50.000

0 0.5 1 2 3 4 5 Kilometers

## 6. Aanbevelingen

Een aantal van de oorzaken van het stedelijk hitte-eiland kunnen beïnvloed worden door ruimtelijke ingrepen, andere kunnen worden beïnvloed door het gedrag van mensen. De geometrie van straten heeft grote invloed op het albedo en turbulentie. Mate van beplanting heeft effect op albedo en de energiebalans. Materiaalkeuze heeft effect op albedo en warmtecapaciteit.

### Meer groen

Een invloedrijke oplossing lijkt de plaatsing van groen te zijn. Bomen, struiken en grassen zorgen voor verdamping, waardoor er minder energie overblijft voor voelbare warmte. Bomen zorgen voor schaduw waardoor de temperatuur onder de bomen lager zal zijn dan er boven of er naast.

### Parken

Parken fungeren als een ontmoetingsplek voor mensen, een oase van rust, een ontsnapping aan de stedelijke drukte, een recreatief beginpunt, maar zijn ze ook verkoelend?

Door de aanwezigheid van vegetatie kan worden gesteld dat er meer energie wordt gebruikt voor verdamping dan in de omringende gebieden. De Bowen verhouding zal rond de normale waarde (0.8 tot 1.5) zitten. Daarnaast is er in een park minder beton, steen en asfalt aanwezig waardoor de warmtecapaciteit lager is dan de omgeving. Parken hebben dus, theoretisch gezien, een microklimaat dat vergelijkbaar is met het buitengebied. Dit microklimaat kan vervolgens weer effect hebben op de

omliggende gebieden. Dit gebeurt echter pas vanaf een bepaalde grootte, die afhankelijk is van de klimatologische omstandigheden, klimaat, opbouw van de stad en bestaande hitte-eiland effect. In Lissabon had een park van 0.57 ha tijdens 6 extreem warme dagen in 2006 en 2007 een gemiddelde temperatuur die 4.8 graden lager was dan de omgeving. De directe omgeving, tot 250 meter, was ook koeler dan elders in de stad. (Oliveira, Andrade et al. 2011) In Nederland wordt zelfs uitgegaan van een effect tot 300 meter afstand van het groen. (Steenefeld, Koopmans et al. 2011) Bij dit onderzoek is een negatief verband tussen de hoeveelheid groen in de buurt en de temperatuur gevonden, alhoewel het verband niet sterk was ( $R^2 = 0.418$ ) is het wel een goede indicatie.

Een park waarbij de bomenkroon aansluit op de omliggende huizen werkt het beste. In deze situatie komt er geen zonlicht op straatniveau en kan er geen klein hitte-eiland ontstaan. (Oliveira, Andrade et al. 2011)

### Strookvegetatie

Bepanting in straten kan zorgen voor een beter microklimaat op straatniveau. Vooral bomen hebben dit effect doordat ze tweezijdig werken, ze produceren schaduw en zorgen voor verdamping. Het effect is echter een stuk kleiner dan bij parken doordat de watervoorziening bij veel straatbepanting slechter geregeld is. De wortel structuur is minder goed ontwikkeld waardoor water uit slechts een beperkt gebied kan komen.

### Groene daken en gevels

Door het aanbrengen van groen op de gevel of op daken wordt de isolatie van gebouwen versterkt, hierdoor is de binnentemperatuur stabiel met als gevolg dat er in de winter minder verwarming en in de zomer minder airconditioning nodig is. Er zijn echter ook onderzoeken die uitwijzen dat



groene daken zorgen voor warmte accumulatie in het gebouw, waardoor extra airconditioning nodig is. Groene daken zouden bijdragen aan de vermindering van piekafvoer van regenwater doordat water wordt vastgehouden op het dak. Daarnaast gelden dezelfde principes als bij normaal groen met betrekking tot verdamping.

### **Groen als barrière**

Groen kan een efficiënte barrière vormen tussen plekken van hitteproductie zoals een industriegebied of een drukke verkeersas en woon- of verblijfgebieden van mensen. De hoeveelheid groen die nodig is om de verwarming te stoppen is afhankelijk van de hoeveelheid warmte die geproduceerd wordt. Bijkomend voordeel is de opvang van luchtvervuiling, zoals fijnstof.

## **Water**

Verwacht mag worden dat water een positief effect heeft op de verdamping en in die zin bijdraagt aan afkoeling van de atmosfeer. Uit metingen in Nederland is echter gebleken dat er geen verband bestaat tussen de hoeveelheid oppervlaktewater zichtbaar vanuit de lucht en de gemeten temperatuur. (Steenefeld, Koopmans et al. 2011) In hetzelfde onderzoek werden metingen gedaan op 5 meter boven een straat, een kanaal en een groenstrook. Op dat niveau was er geen meetbaar verschil tussen de verschillende soorten oppervlakte.

Wel kan gezegd worden dat daar waar water is geen bebouwing is, wat bijdraagt aan een verlaging van de temperatuur.

### **Stilstaand water in de zon**

Stilstaand water in de zon kan negatieve gevolgen hebben voor het stedelijk hitte-eiland. De temperatuur van het water stijgt overdag door

de binnenkomst van straling. Door de hoge warmtecapaciteit staat het water zijn warmte slechts langzaam af, dit gaat zelfs trager dan de rest van de stad. Hierdoor ontstaat een situatie waarbij het water warmte afstaat aan de stad.

### **Stilstaand water in de schaduw**

Wanneer stilstaand water zich de gehele dag in de schaduw bevindt zal de opwarming minimaal zijn. Daarnaast is de hoeveelheid verdamping minder, overdag kan het water minder koelte produceren voor de omgeving, maar 's avonds hoeft het water minder af te koelen.

### **Stromend water**

Wanneer water beweegt ontstaat menging van verschillende waterlagen. De opwarming van het water verloopt hierdoor een stuk langzamer. Stromend water zal in de loop van de dag minder opwarmen, waardoor het 's nachts maar weinig of zelfs geen warmte kan afstaan aan de stad. Overdag zal het waarschijnlijk koelte produceren voor de omliggende gebieden. Doordat de temperatuur boven het water kouder is dan in de omliggende gebieden.

## **Vormgeving bebouwing**

Met de positionering van gebouwen kunnen veel problemen opgelost worden. De positionering en de verhouding tussen straatbreedte en gebouwhoogte hebben namelijk effect op de binnenkomende straling, wind, Sky-View-Factor (SVF) en albedo.

### **Wind**

Voor wind is het belangrijk te kijken naar de positionering van gebouwen ten opzichte van de overheersende windrichting. Gebouwen die haaks op de windrichting staan veroorzaken de meeste problemen met wind. Er



ontstaat een luchtzak voor het gebouw, waarin relatief veel wind kan worden verwacht. Achter het gebouw ontstaat een beschut gebied, hier is bijna tot geen wind, verder van het gebouw komt er steeds meer wind bij. Problemen doen zich voor bij de hoeken aan de windzijde van het gebouw. Hier ontstaan sterke windstromingen die veroorzaakt worden door de concentratie van de luchtstromingen op dit kleine gedeelte.

Wanneer gebouwen met een hoek naar de windrichting geplaatst worden ontstaan grotere en sterkere windstromingen op de hoeken en wordt het beschutte gebied kleiner.

Brede gebouwen, gebouwen die breder zijn dan hoog, hebben een groter beschutgebied dan smalle gebouwen. Daarnaast komt dat brede gebouwen relatief kleine en zwakke luchtstromingen op de hoeken hebben.

Lange straten, of street canyons, zorgen voor grote windsnelheden. Langer dan 20 keer de gebouwhoogte mag zo'n straat niet zijn, omdat de wind dan te hard wordt. Bij een straatlengte die 4 keer de gebouwhoogte bedraagt wordt luchtvervuiling goed tegen gegaan. Wanneer de breedte van de straat groter is dan 2 keer de gebouwhoogte ontstaat veel windvermindering.

### **Sky-View-Factor**

De verhouding van de hoogte en de breedte van de straten, H/W ratio, heeft effect op de sky-view-factor. Hoe meer lucht zichtbaar is hoe makkelijker warmte kan worden afgestaan aan de atmosfeer. Aangezien de sky-view-factor van bestaande bebouwing moeilijk of niet aan te passen is, kan alleen aangeraden worden om er bij nieuwbouw rekening mee te houden.

## **Specifieke Aanbevelingen**

In sommige gebieden zullen de algemene aanbevelingen zorgen voor een aangenamer klimaat, maar de grote problemen zullen daar niet mee opgelost worden. Vandaar dat er in bepaalde gebieden specifieke aanbevelingen worden gedaan.

### **Zuidwestelijke wind**

We hebben gezien dat er door de zuidwestelijke wind op verschillende plekken problemen kunnen ontstaan. Deze gebieden kunnen aangenamer worden door de zuidwestelijke windhinder te voorkomen. Dit kan gedaan worden door een blokkade op te werpen tussen de open gebieden en de woongebieden. Deze blokkade kan in de vorm van bebouwing, maar ook in de vorm van beplanting. Bosschages kunnen zorgen voor reductie van de windsterkte, bijkomend voordeel is de verkoelende werking van de bosschages voor de nabijgelegen bebouwing.

### **Hitte in de binnenstad**

De binnenstad heeft te maken met de meeste hitte, maar er is een beperkte mogelijkheid om lokaal groen toe te voegen. Vandaar dat gekeken moet worden naar de inpassing van grootschalige groene gebieden.

In de omgeving van het centrum bevinden zich enkele industrie- en commerciële gebieden waarvan de vraag is of ze in stand kunnen blijven. Het (voormalig) havengebied Nieuw Mathenesse en de waterzuiveringsinstallatie van Evides bij de Van Brienoordbrug zouden enkele suggesties kunnen zijn. De herstructurering van deze gebieden is volledig afhankelijk van politieke en economische omstandigheden. Er kan ook gedacht worden aan verouderde woongebieden.

### **Windcorridors**

Uit de analyse van de windgegevens bleek dat op warme dagen oostelijke winden overheersen. Omdat deze winden niet sterk zijn zullen deze winden het stadcentrum moeilijk bereiken. Bij toekomstige plannen kan echter wel rekening gehouden worden met deze winden. Door windcorridors vanuit het Kralingse Bos naar het stadcentrum te creëren kan ervoor gezorgd worden dat de koele, aangename wind het centrum van de stad bereikt.

### **Toekomstige uitbreidingen**

De stad Rotterdam zal in de toekomst zeker de behoefte hebben aan uitbreiding. Er is daarbij waarschijnlijk veel vraag naar binnenstedelijke inbreidingen, maar vanuit klimatologisch oogpunt is dit niet verstandig. Versterking van het stedelijk karakter zorgt voor meer warmte en

daarmee een vergroting van het probleem, terwijl het probleem al groter zal worden door de verwachte wereldwijde klimatologische veranderingen.

Een uitbreiding in de vorm van één grote wijk is niet gewenst in verband met de te verwachte warmte in het centrum van die wijk. Vandaar dat er in de aanbevelingenkaart voor gekozen is om de nieuwe wijken relatief smal te maken. Doordat ze zijn omgeven door groenen gebieden is de kans op convectieve winden groot. De gekozen posities zijn slechts suggestief en er is geen rekening gehouden met mogelijke uitbreiding van steden in de omgeving, zoals Delft en Dordrecht.



Fig. 27. Aanbevelingen kaart. 1:50.000





## 7. Discussie

Ondanks dat er veel literatuur is bestudeerd kan het zijn dat sommige gegevens inmiddels verouderd zijn of dat er betere literatuur beschikbaar is.

De kaarten die gemaakt zijn voor deze thesis zijn gebaseerd op basis van topografische kaarten aangeleverd door de leerstoelgroep Landschapsarchitectuur en Ruimtelijk Planning, satellietbeelden en google Street view. Het is mogelijk dat de werkelijke situatie niet meer overeenkomt met de gegevens op de kaart, waardoor er op kleine schaal fouten kunnen zitten in de geproduceerde kaarten. Daarnaast zijn een aantal onderdelen van kaarten, zoals de indeling in verschillende klimatopen, voor een deel gebaseerd op de beoordeling van de auteur en kunnen daardoor afwijken van de werkelijkheid.

De thermische analyse kaart is vergeleken met meetgegevens van slechts één dag, het bakfiets-experiment. Het is mogelijk dat deze dag niet representatief is voor de alle dagen waarop een sterk stedelijk hitte-eiland optreed. Er is namelijk niets zo veranderlijk als het weer.

## Referenties

- Barring L, et al. (1985) Canyon geometry, street temperatures and urban heat island in Malmo, Sweden. *Journal of Climatology*. 5(4):433-444.
- Beranek WJ (1984) WIND ENVIRONMENT AROUND SINGLE BUILDINGS OF RECTANGULAR SHAPE. *Heron*. 29(1):3-31.
- Bottema M (1992) Wind climate and urban geometry, Bottema.
- Daanen HAM, et al.: 2010, De invloed van hitte op de gezondheid, toegespitst op de stad, TNO-DV 2010 D248
- Heusinkveld B, et al. (2010) Use of a Mobile platform for assessing urban heat stress in Rotterdam. not yet published.
- Höppe P (1999) The physiological equivalent temperature - A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*. 43(2):71-75.
- Kovats RS and Hajat S: 2008, Heat stress and public health: A critical review, 41-55.
- Kroon LJM, et al. (2011) Inleiding atmosfeer. Wageningen Universiteit, Leerstoel Meteorologie en Luchtkwaliteit, Wageningen.
- Kump LR, et al. (2004) The earth system. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J. [etc.].
- Malevich SB and Klink K (2011) Relationships between snow and the wintertime minneapolis urban heat island. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 50(9):1884-1894.
- Oke TR (1973) City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967). 7(8):769-779.
- Oliveira S, et al. (2011) The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment*. 46(11):2186-2194.
- Parry M and Intergovernmental Panel on Climate C (2007) Climate change 2007 : impacts, adaptation and vulnerability : contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge [etc.].
- Ren C, et al. (2010) Urban climatic map studies: a review. *Int. J. Climatol.*:n/a-n/a.
- Rotach MW, et al. (2005) BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project. *Theoretical and Applied Climatology*. 81(3):231-261.
- Santamouris M and Asimakopoulos DN (2001) Energy and climate in the urban built environment. James & James, London.
- Steenefeld GJ, et al. (2011) Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*. 116(20).
- Stuttgart Stadtklimatologie LS-AfU-A, Climatebooklet for Urban Development, [http://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?climate\\_booklet](http://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?climate_booklet), 1 December 2011.
- Taha H (2004) Heat islands and energy, *Encyclopedia of Energy* vol 3.
- Vandentorren S, et al. (2005) Health Impact of the 2003 Heat-Wave in France Extreme Weather Events and Public Health Responses. Springer Berlin Heidelberg.

